



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

MĚŘENÍ VYBRANÝCH FYZIKÁLNÍCH VELIČIN

MEASUREMENT OF SELECTED PHYSICAL QUANTITIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matouš Zajíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radomír Pruša

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Matouš Zajíček
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	Ing. Radomír Pruša
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření vybraných fyzikálních veličin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Předmětem bakalářské práce je návrh programu pro měření vybraných fyzikálních veličin pomocí vývojové platformy Arduino. Zacíleno bude zejména na hmotnost, teplotu a atmosférický tlak. Předpokládané využití soustavy je celoroční diagnostika včelího díla. Celkový důraz bude kladen na malé energetické nároky navrženého systému. Samotná práce se doplní o literární rešerši na téma snímače fyzikálních veličin a ostrovní zdroje elektrické energie.

Cíle bakalářské práce:

Literární rešerše na téma snímače fyzikálních veličin (hmotnost, teplota a atmosférický tlak) a ostrovní zdroje elektrické energie.

Vytvořit program pro měření hmotnosti, teploty a atmosférického tlaku.

Implementovat navržený program do vývojové platformy Arduino.

Realizovat zkušební měření a následně porovnat hodnoty s vhodnými etalony.

Zhodnotit celkovou energetickou náročnost měřicího systému.

Seznam doporučené literatury:

ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. Senzory a měřicí obvody. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-010-1500-9.

RIPKA, Pavel a Alois TIPEK. Modern sensors handbook. Newport Beach, CA: ISTE USA, 2007. ISBN 978-1-905209-66-8.

VODA, Zbyšek. Průvodce světem Arduina. Vydání druhé. Bučovice: Martin Stříž, 2017. ISBN 978-8-87106-93-8.

MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V úvodu této práce je provedena stručná literární rešerše existujících typů a principů funkcí vybraných senzorů teploty, atmosférického tlaku, relativní vlhkosti, hmotnosti a ostrovních zdrojů elektrické energie. Následující část je zaměřena na realizaci měřicího systému těchto veličin, určeného pro aplikaci na včelím úlu, pomocí vývojové platformy Arduino. V posledních částech práce je provedeno kontrolních měření pro ověření funkčnosti systému a vyhodnocení energetické náročnosti systému spolu s návrhem vhodného napájení.

ABSTRACT

In the introduction of this thesis a brief literary research of existing types and principles of function of selected sensors of temperature, atmospheric pressure, relative humidity, weight and island electric energy sources is performed. The next part is focused on realization of measuring system, meant for usage on beehive, using Arduino development platform. In the final parts of thesis, a control measurement, verifying function of the system, is performed and energy consumption is evaluated, along with designing a suitable power supply.

KLÍČOVÁ SLOVA

Diagnostika včelího úlu, Arduino, měření teploty, měření tlaku, měření relativní vlhkosti, měření hmotnosti, teplotní kompenzace váhy.

KEYWORDS

Diagnostics of beehive, Arduino, temperature measurement, pressure measurement, relative humidity measurement, weight measurement, temperature compensation of scale.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZAJÍČEK, Matouš. *Měření vybraných fyzikálních veličin*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124848>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Radomír Pruša.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval Ing. Radomíru Prušovi za cenné rady, vstřícnost a věnovaný při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Radomíra Pruši a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne ...

.....

Matouš Zajíček

OBSAH

ÚVOD	10
1 LITERÁRNÍ REŠERŠE	11
1.1 Senzory Teploty.....	11
1.1.1 Odporové senzory teploty	11
1.1.2 Kovové odporové senzory teploty.....	11
1.1.3 Polovodičové odporové senzory teploty	12
1.1.4 Monokrystalické PN senzory teploty	13
1.2 Senzory hmotnosti	14
1.2.1 Odporové tenzometry	14
1.2.2 Deformační členy	15
1.3 Senzory atmosférického tlaku	16
1.3.1 Membránové senzory tlaku	16
1.3.2 Piezorezistivní odporové snímače	16
1.4 Senzory vlhkosti vzduchu.....	17
1.4.1 Odporové senzory vlhkosti.....	17
1.4.2 Kapacitní senzory vlhkosti	17
1.4.3 Elektrolytické senzory vlhkosti	18
1.5 Ostrovní systémy	19
1.5.1 Fotovoltaické články	19
1.5.2 Akumulátory.....	20
2 TVORBA MĚŘICÍ SOUSTAVY	21
2.1 Vývojová platforma arduino.....	21
2.2 Arduino Leonardo	21
2.3 Návrh programu.....	22
2.4 Režim spánku	24
2.4.1 Probuzení pomocí tlačítka	25
2.4.2 Probuzení pomocí RTC	26
2.4.3 Základní vlastnosti modulu DS3231	26
2.4.4 Zapojení Modulu DS3231	27
2.4.5 Programová realizace obsluhy DS3231	27
2.5 Měření teploty, vlhkosti a tlaku.....	29
2.5.1 Senzor BME280	29
2.5.2 Zapojení BME280	30
2.5.3 Programová realizace obsluhy BME280.....	31
2.6 Měření hmotnosti.....	32
2.6.1 Návrh konstrukce váhy.....	32
2.6.2 Zapojení sestavy pro měření hmotnosti	33
2.6.3 Programová realizace měření hmotnosti	34
2.6.4 Kompenzace tečení za studena.....	34
2.6.5 Kompenzace vlivu teploty.....	35
2.7 Ukládání dat.....	37
2.7.1 Zapojení čtečky SD karty	37
2.7.2 Programová realizace ukládání dat	38
2.8 Realizace rozhraní pro volbu módu měření.....	38
2.9 Optimalizace využití programové paměti	39
3 KONTROLNÍ MĚŘENÍ	40
3.1 Kontrolní měření teploty, relativní vlhkosti a atmosférického tlaku.....	40

3.2	Kontrolní měření hmotnosti.....	41
3.3	Měření na včelím úlu	43
4	MĚŘENÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI A NÁVRH NAPÁJENÍ SYSTÉMU.....	44
4.1	Měření energetické náročnosti.....	44
4.2	Výpočet energetické náročnosti systému.....	46
4.3	Návrh napájení měřicího systému.....	47
4.3.1	Návrh kapacity akumulátoru	47
4.3.2	Návrh výkonu solárního panelu.....	47
5	ZÁVĚR.....	49
	BIBLIOGRAFIE	50
	SEZNAM OBRÁZKŮ	54
	SEZNAM TABULEK.....	56
	SEZNAM PŘÍLOH	57
	PŘÍLOHY.....	58

ÚVOD

Včelařství je jedním z nejstarších oborů lidské činnosti s velkou tradicí, do kterého v poslední době začalo pronikat užívání moderních technologií, které slouží pro sledování zdraví včelstva, pozorování chování včelstva při různých meteorologických podmínkách, pozorování schopností včelstva kontrolovat podmínky prostředí uvnitř úlu, určení, zda má včelstvo dostatek potravy během zimních měsíců nebo zvýšení výnosu včelích produktů.

Právě asi nejčastěji rozšířeným zařízením pro pozorování včelstva jsou úlové váhy. Cílem této práce bude tedy takové zařízení sestavit. Vytvořené zařízení má být schopné dlouhodobě měřit hmotnost včelího úlu. Toto zařízení má ale být schopno měřit i teplotu, vlhkost ovzduší a atmosférický tlak. Pro realizaci tohoto zařízení bude využito široce rozšířené vývojové platformy Arduino, kdy bude proveden návrh hardwaru zařízení, návrh mechanické konstrukce váhy a následně vytvoření programu pro uvedení tohoto zařízení do chodu.

Další částí práce bude ověření správnosti funkce tohoto zařízení porovnáním získaných naměřených údajů s vhodně zvolenými etalony. Nakonec bude provedeno zhodnocení energetické náročnosti vytvořeného systému a bude navržen vhodný napájecí systém, umožňující umístit zařízení i do odlehklých oblastí bez možnosti připojení na veřejnou rozvodnou síť.

1 LITERÁRNÍ REŠERŠE

1.1 Senzory Teploty

Senzory pro měření teploty patří asi vůbec k nejčastěji využívaným sensorům, a to hlavně z toho důvodu, že teplota je velice důležitá nejenom pro velké množství výrobních a jiných procesů, ale i pro schopnost využívat široké spektrum sensorů jiných fyzikálních veličin jejichž funkce může být značně teplotně závislá. Kvůli tomuto rozsahu využití existuje celá řada typů teplotních snímačů, fungujících na rozdílných fyzikálních principech [1] [2].

Senzory teploty můžeme rozdělit do dvou základních skupin, a to na dotykové a bezdotykové. Obě tyto skupiny obsahují mnoho podskupin teplotních snímačů pracujících na základě různých fyzikálních principů. Vzhledem k zamýšlenému užití na včelím díle budou dále popsány pouze základní principy funkce a charakteristiky vybraných typů sensorů teploty, a to především odporové senzory teploty a polovodičové senzory teploty s PN přechodem [1] [2].

1.1.1 Odporové senzory teploty

Odporové senzory teploty jsou dotykové senzory, jejichž základním principem funkce je teplotní závislost odporu materiálů. Prakticky využívané materiály jsou kovy a polovodiče, a proto tedy odporové teplotní senzory dělíme právě na kovové a polovodičové [1] [2].

1.1.2 Kovové odporové senzory teploty

Kovové odporové senzory jsou dotykové senzory jejichž funkce je založena na teplotní závislosti odporu kovů, kdy s rostoucí teplotou roste odpor. Pro provozní teploty malého rozsahu, to je 0 °C až 100 °C, můžeme předpokládat lineární závislost danou vztahem 1,

$$R = R_0 (1 + \alpha t) \quad (1)$$

kde $\alpha[\text{K}^{-1}]$ je teplotní součinitel odporu, materiálová konstanta. R_0 je odpor senzoru při teplotě 0 °C, t je teplota.

Pro kovové odporové senzory je dále také definován poměr odporu čidla W_{100} , který je dán vztahem 2, kde R_{100} je odpor čidla při teplotě 100 °C.

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \quad (2)$$

Při aplikacích teplotních sensorů pro vyšší teplotní rozsahy už není možné považovat lineární závislosti za správné a musí se využívat jiných vztahů, které jsou specifické pro různé materiály a provedení teplotních čidel [1].

Mezi nejvyžívanější kovy pro výrobu odporových kovových snímačů patří především platina a nikl. K jejich konstrukci se využívá drátkové nebo tenkovrstvé technologie. Jak platinové, tak niklové senzory se vyrábí s různými parametry, základním parametrem je pak odpor senzoru při teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, R_0 , kdy se vyrábí senzory s odporem 50, 100, 200, 500, 1000 a 2000 Ω , kterým odpovídá značení jako např. Pt100, Pt1000, Ni100. Senzory s různými odpory se potom využijí především v závislosti na zapojení při dané aplikaci. Například Pt1000 je vhodné využít pro aplikace napájené bateriemi, protože pro jeho funkci je potřeba nižší proud, a proto méně zatěžuje baterie, dále jsou také senzory s vyšším odporem méně ovlivňovány odporem vedení [1] [2] [3].

Obecnou výhodou kovových odporových senzorů je vysoká linearita závislosti odporu a teploty a vysoký rozsah měřitelných teplot viz obrázek 3. Mezi nevýhody patří pomalá reakce na změnu teploty [1] [2] [3].



Obr. 1 příklad zapouzdření platinového čidla Pt100 [42]

1.1.3 Polovodičové odporové senzory teploty

Stejně jako u kovových odporových senzorů je principem funkce polovodičových odporových senzorů teplotní závislost odporu. Polovodičové odporové senzory dále dělíme na termistory a monokrystalické odporové senzory. Jejich obecnou výhodou oproti kovovým senzorům je velká citlivost, nevýhodou je ale nižší rozsah a nižší stabilita [1] [2] [3].

Termistory

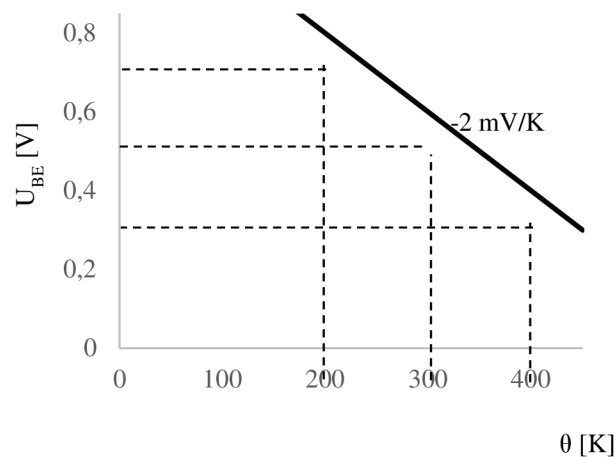
Termistory se dále dělí na negastory a pozistory. Rozdíl mezi nimi je charakter teplotní závislosti odporu, kdy u negastoru (obecně označovaný jak NTC) s rostoucí teplotou klesá odpor, a u pozistoru (značené jako PTC) s rostoucí teplotou odpor mírně klesá, ale po překročení určité teploty velice strmě roste (teplotní závislost obou můžeme vidět v obrázku 3), kvůli tomu se pozistory velice často užívají jako dvoustavové senzory. Tyto rozdílné vlastnosti negastorů a pozistorů jsou dány odlišnými technologiemi výroby a materiály, ze kterých jsou vyráběny, kdy negastory jsou vyráběny práškovou technologií z oxidů kovů (např. oxidy železa, niklu a jiné) a pozistory jsou vyráběny z polykrystalické feroelektrické keramiky. Výhodou termistorů je obecně vysoká citlivost a malé rozměry. Mezi nevýhody patří poměrně malý teplotní rozsah, poměrně velká nelinearita a menší stabilita [1] [2] [3].

Monokrystalické odporové senzory teploty

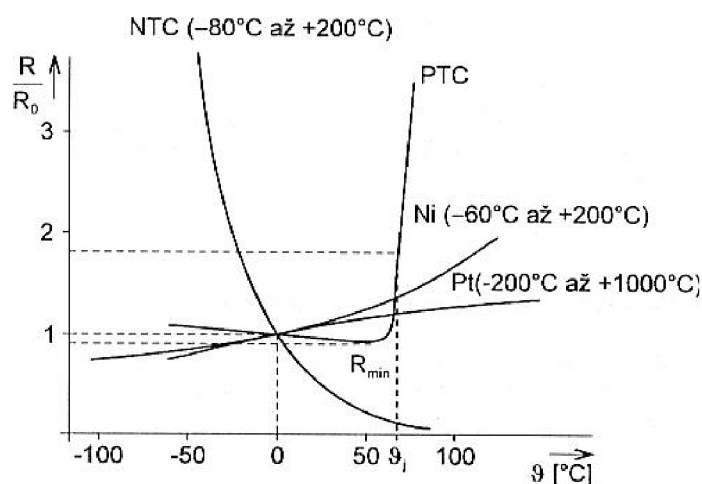
Tyto senzory podobně jako termistory využívají teplotní závislosti odporu. Nejčastěji v praxi tvořeny jako monokrystalické Si senzory. Tyto senzory jsou založeny na polovodiči typu N, to je tedy polovodič s dominantní elektronovou vodivostí. Podobně jako u kovů s rostoucí teplotou roste odpor. Výhodou monokrystalických senzorů oproti termistorům je linearita, nevýhodou je nižší citlivost [1] [2] [3].

1.1.4 Monokrystalické PN senzory teploty

Princip funkce monokrystalických PN senzorů je založen na teplotní závislosti napětí PN přechodu v propustném směru. Monokrystalické PN senzory se dají rozdělit na diodové, tranzistorové, popřípadě integrované. Všechny však pracují na stejném fyzikálním principu. Například u tranzistorových senzoru se využívá PN přechodu báze-emitor tranzistoru a závislosti napětí mezi bází a emitorem U_{BE} na teplotě Obrázek 2. Výhodou těchto senzorů je dobrá citlivost, linearita a nízká cena, nevýhodou je poměrně nízký teplotní rozsah [1] [2] [3].



Obr. 2 Závislost napětí mezi bází a emitorem pro monokrystalické PN senzory [43]



Obr. 3 charakteristika různých typů dotykových odporových senzorů teploty [44]

1.2 Senzory hmotnosti

Principem funkce senzorů pro měření hmotnosti je využití fyzikálních účinků síly na tělesa. Proto se dá říct, že převážná většina senzorů pro měření hmotnosti (síly obecně) je založena na převodu síly na deformaci. Samotné měření deformace je dnes nejčastěji realizováno pomocí odporových tenzometrů kombinovaných s vhodnými deformačními členy [2] [4].

1.2.1 Odporové tenzometry

Fyzikálním principem funkce odporových tenzometrů je změna odporu vodiče (nejčastěji kovového) vlivem deformace. Zatížený vodič nejenom že změní svůj průřez S a délku l , ale i vlivem mikrostrukturálních změn materiálu také svoji vodivost ρ , a proto dochází ke změně odporu R , vztah 3, které využijeme pro určení deformace, pomocí které můžeme určit sílu působící na tenzometrický senzor.

$$R = \frac{l}{S} \rho \quad (3)$$

Charakteristickou veličinou odporových tenzometrů je součinitel deformační citlivosti $K_{\varepsilon,0}$ daný vztahem 4.

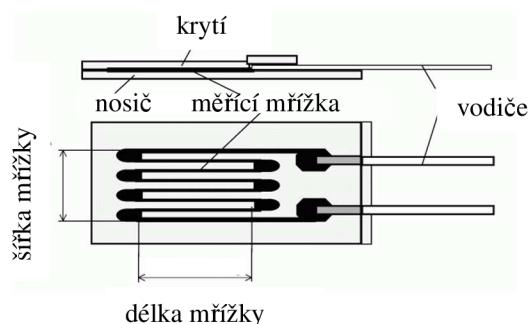
$$K_{\varepsilon,0} = \frac{d\left(\frac{\Delta R}{R_{0,0}}\right)}{d\varepsilon} \quad (4)$$

Kde ΔR vyjadřuje změnu odporu při deformaci, $R_{0,0}$ vyjadřuje nominální odpor tenzometru při nulovém zatížení a ε relativní deformaci tenzometru ve směru délky tenzometru.

Pro tenzometrické snímače je vhodné využívat materiálů s co nejnižšími mikrostrukturálními změnami při deformaci, a proto můžeme závislost na ε zanedbat. Mezi nejužívanější materiály patří konstantan, Ni-Cr slitiny a slitiny platiny a wolframu [4].

Mezi nejvyužívanější tenzometrické snímače dnes patří, mimo jiné, lepené fóliové tenzometry, tvořené tenkou kovovou fólií připevněnou na nosnou vrstvu [4] [5].

Tenzometrické senzory mívají typicky poměrně vysoké odpory (120, 350 a 1000 Ω), které umožňují potlačení vlivu odporu vedení [2] [4].

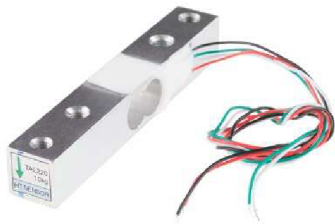


Obr. 4 Základní provedení jednoho fóliového tenzometru [45]

1.2.2 Deformační členy

Deformační členy jsou základní součástí senzorů měření hmotnosti, respektive síly. Jejich úkolem je převést účinky síly na měřitelnou deformaci. Deformační členy se vzájemně liší použitými materiály a geometrií. Požadavky na materiály jsou mimo jiné minimální teplotní roztažnost a teplotní koeficient Youngova modulu pružnosti, homogenní struktura, malé účinky tečení (relaxace materiálu při zátěži) a korozivzdornost. Geometrie ovlivňuje především typ deformace – ohyb, tlak.

U deformačních členů užívaných při určování hmotnosti je kladen důraz na optimalizaci možnosti hromadné výroby se zachováním dostatečné přesnosti. Některými z užívaných tvarů jsou členy ve tvaru písmene S, ve tvaru písmene E, nosíkové deformační členy a diskové deformační členy [2] [4] [5].



Obr.5 tenzometrický snímač s nosíkovým deformačním prvkem [32]



Obr. 6 tenzometrický snímač s deformačním prvkem ve tvaru E [33]



Obr. 7 tenzometrický snímač s diskovým deformačním prvkem [34]

1.3 Sensory atmosférického tlaku

Princip funkce senzorů atmosférického tlaku vychází z faktu, že tlak prostředí p je definován jako poměr elementu síly dF působící na element plochy dS , vztah 5, a proto pokud působení tlaku vystavíme známou plochu S , můžeme převést měření tlaku na měření síly. Z toho důvodu jsou principy senzorů tlaku a sil podobné, nicméně jejich konstrukční realizace se může značně lišit [2] [4] [6].

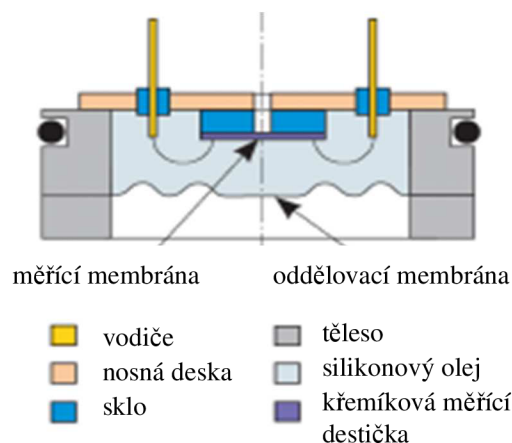
$$p = \frac{dF}{dS} \quad (5)$$

1.3.1 Membránové senzory tlaku

Mezi dnes nejužívanější senzory tlaku patří membránové senzory tlaku. Tyto senzory využívají jako deformační člen tenkou pružnou membránu. Při deformaci membrány rovnoměrně rozloženým tlakem dochází ke vzniku dvou složek napětí, stejně jako deformace, a to radiální a tangenciální. Vlastní realizace membrány se může vzhledem k zamýšlenému využití senzoru značně lišit. Pro zvýšení kvality senzoru je vhodné se vyhnout spojování membrány s tělem senzoru, a proto je nevhodnější, pokud jsou tvořeny jedním kusem. Samotné měření napětí je pak realizováno tenzometry, které mohou být různé konstrukce, např. kovové tenzometry a piezoresistory. Asi nejrozšířenějším řešením je právě využití piezoresistorů [2] [4] [6].

1.3.2 Piezorezistivní odporové snímače

Tyto snímače stejně jako jiné odporové tenzometry využívají zavislosti odporu na mechanickém namáhání. Měřicím členem piezorezistivního snímače je monolitická křemíková destička s vysokým odporem, na které jsou vytvořeny vodivé cestičky vytvořené podobnými metodami, jako se vyrábí integrované obvody (difúze, iontová implantace). Piezorezistivní snímače mají mnoho výhod mimo jiné to jsou malé rozměry, velmi malá deformace membrány, malé účinky tečení a malá hystereze. Nevýhodou těchto senzorů je poměrně velká citlivost na přítomnost agresivních látek a vlhkosti v měřeném prostředí, proto je jejich využití často omezené na měření neagresivních plynů a dále je nutná ochrana proti vlhkosti, která je nejčastěji realizována pomocí silikonového gelu [2] [6].



Obr. 8 Řez snímačem tlaku s Piezorezistivní čidlem a oddělovací membránou [35]

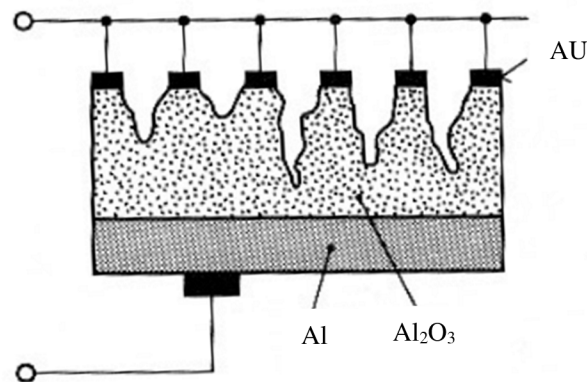
1.4 Senzory vlhkosti vzduchu

Vlhkost vzduchu chápeme jako množství vodních par ve vzduchu. Vlhkost lze vyjádřit několika způsoby, jako absolutní (hmotnost vodní páry vztahená k objemu vzduchu), měrnou (hmotnost vodní páry vztahená k hmotnosti suchého vzduchu) a relativní vlhkost (hmotnost vodní páry ve vzduchu vzhledem k hmotnosti vodní páry nasyceného vzduchu) [4] [7].

Mezi nejčastěji využívaní senzory vlhkosti vzduchu patří, mimo jiné, absorpční senzory, jejich základní princip funkce spočívá ve změně fyzikálně-chemických vlastností látky, jako je vodivost nebo kapacita. Podle toho se pak senzory dělí právě na odporové, kapacitní a elektrolytické [4].

1.4.1 Odporové senzory vlhkosti

Principem funkce odporového snímače vlhkosti je, jak je již zmíněno výše, změna vlastností materiálu v závislosti na množství absorbované vody. Senzor je tvořen vrstvou hydrofobické látky (nejčastěji iontová sůl) s poměrně nízkým odporem, který se ale značně mění v závislosti na množství absorbované vody, nanesenou na základní keramickou desku. Odpor hydrofobické vrstvy je dán nejenom relativní vlhkostí prostředí, ale i teplotou prostředí, proto je nutné provádět měření za konstantní teploty, popřípadě změnu teploty kompenzovat [4] [7].

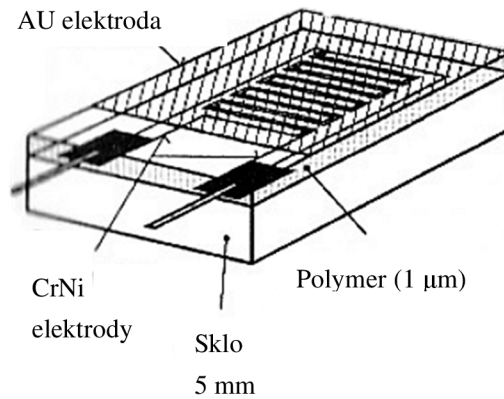


Obr. 9 Struktura odporového senzoru vlhkosti [36]

1.4.2 Kapacitní senzory vlhkosti

Princip funkce kapacitního snímače je velice podobný odporovému. Senzor je tvořen kondenzátorem, jehož dielektrikum je tvořeno hydrofobickou vrstvou (nejčastěji polymer, ale může být i pouhý vzduch), která mění svoji relativní permeabilitu v závislosti na množství absorbované vody. Jedna z elektrod musí být realizována tak aby umožňovala průchod vodní páry. Relativní permeabilita pro vzduch ϵ_r je pak dána vztahem 6, kde T je absolutní teplota v Kelvinech, P je tlak vlhkého vzduchu, P_s je tlak nasycené vodní páry při teplotě T , H je relativní vlhkost v %. Jak je tedy ze vztahu 6 patrné, tak pro určení relativní vlhkosti vzduchu je třeba znát i teplotu prostředí a atmosférický tlak [2] [4] [7].

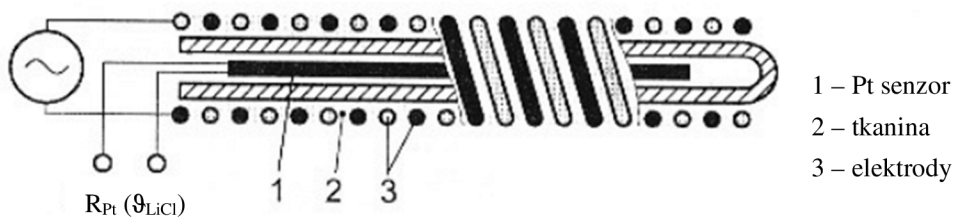
$$\epsilon_r = 1 + \frac{211}{T} \cdot \left(P + \frac{48P_s}{T} H \right) \cdot 10^{-6} \quad (6)$$



Obr. 10 Struktura kapacitního senzoru vlhkosti [37]

1.4.3 Elektrolytické senzory vlhkosti

Tyto senzory využívají kapalného elektrolytu (roztok iontové soli např. LiCl). Tkanina obsahující drátkové elektrody je nasáklá elektrolytem a navinutá na nevodivou, nejčastěji skleněnou, trubičku. Procházející proud zahřívá elektrolyt, z toho se odpařuje voda a klesá jeho vodivost a snižuje se proud i teplota. Při zvýšení vlhkosti vzduchu opět roste vodivost elektrolytu, tím se zvyšuje proud procházející elektrodami a tím teplota. Dochází tedy k udržování stálé teploty elektrolytu. Z rovnovážné teploty zjištěné tepelným čidlem umístěným uvnitř nevodivé trubičky je pak možné dopočítat vlhkost vzduchu [4] [7].



Obr. 11 Uspořádání LiCl vlhkoměru (upraveno) [38]

1.5 Ostrovní systémy

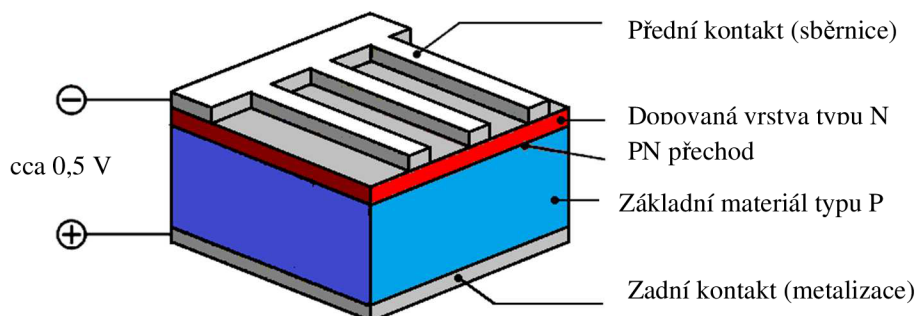
Pojmem ostrovní systém se většinou rozumí taková energetická soustava, která není připojena k žádnému centrálnímu distribučnímu systému elektrické energie (např. celostátní rozvodná síť). Taková soustava tedy zabezpečuje výrobu elektrické energie, její rozvod a využití sama. Užití ostrovního systému je zpravidla spojeno s nemožností připojení k centrální distribuční síti, například z důvodu odlehlosti polohy zařízení. Jako ostrovní systémy se nejčastěji označují větší elektrické soustavy, jako celé budovy, ale tuto definici splňují i menší systémy určené pro napájení různých zařízení jako třeba meteorologické stanice, nebo i třeba zařízení pro měření na včelím díle, které je předmětem této práce [8] [9] [10].

Jako zdroje elektrické energie jsou nejčastěji využívány obnovitelné zdroje energie, ať už solární, větrná, vodní nebo geotermální. Pro malé systémy je pak prakticky realizovatelné především využití solární energie pomocí fotovoltaického panelu [8] [9] [10].

Dva základní typy ostrovních systémů jsou systémy s přímým napájením a systémy s akumulací elektrické energie. Asi nejjednodušším systémem s přímým napájením je systém spoléhající na obnovitelný zdroj energie, nejčastěji fotovoltaického panelu. Takový systém se pak často skládá pouze ze zdroje energie, měniče napětí a samotného spotřebiče. Nevýhodou takového systému je že připojený spotřebič funguje pouze po dobu dostatečné intenzity slunečního záření. Příkladem takového systému může být solární nabíječka pro malá zařízení. Prakticky využitelnější jsou systémy s akumulací elektrické energie. Na rozdíl od systému s přímým napájením je do nich zakomponován akumulátor ukládající přebytečnou energii v době kdy produkce převyšuje spotřebu. Kromě samotného zdroje a akumulátoru je systém nejčastěji doplněn o regulátor dobíjení akumulátoru a měniče napětí pro praktické využití energie [8] [9] [10].

1.5.1 Fotovoltaické články

Nejvyužívanější články jsou tvořeny křemíkovým polovodičem typu P, na který se nanese vrstva polovodiče typu N, a tak se vytvoří PN přechod. Po ozáření takové součástky světlem dochází k uvolňování nosičů elektrického náboje. Nosiče náboje, tedy elektrony a díry jsou separovány PN přechodem a dochází ke vzniku elektrického napětí. Fyzikální princip vysvětlující princip funkce fotovoltaického článku se nazývá fotoelektrický jev, kdy po ozáření látky světlem dochází k excitaci elektronů na vyšší energetickou úroveň. Pokud energie dopadajícího fotonu je dostatečně velká (vlnová délka menší než mezí), je schopný uvolnit elektron z elektronového obalu atomu a nastává fotoelektrický jev [9] [11].



Obr. 12 Schéma struktury fotovoltaického článku z krystalického křemíku [39]

Dnes prakticky využívané fotovoltaické články nejčastěji dosahují účinnosti 10-16 %, ale technologie fotovoltaických článků je stále předmětem intenzivního výzkumu, především se snahou zvýšit jejich efektivitu [11].

1.5.2 Akumulátory

Jako akumulátor elektrické energie se označuje zařízení schopné ukládat elektrickou energii. Vzhledem k tomu, že přímé uložení elektrické energie je v současnosti stále velice obtížný úkol, který je pořád spíše ve stádiu výzkumu (využití supravodivých materiálů – superkondenzátory, ukládání do magnetického pole), je využíváno převodu elektrické energie na mechanickou, chemickou nebo tepelnou energii. Pro praktické využití na malých soustavách je nejvyužitelnější uložení elektrické energie pomocí přeměny na chemickou [11].

Stále nejvyužívanějším typem elektrochemického akumulátoru je galvanický článek. Galvanický článek se obecně skládá ze dvou elektrod a elektrolytu. Vůbec prvním galvanickým článkem byl Voltův článek, skládající se z měděné a zinkové elektrody, s elektrolytem ve formě kyseliny sírové. Mezi dnes stále často využívané články patří olověné články jejichž elektrody jsou tvořeny olovem a oxidem olovičitým, s elektrolytem ve formě kyseliny sírové. Olověné články můžeme nalézt, především u automobilů, ale také se s nimi můžeme setkat ve formě záložních zdrojů. V současné době asi nejvíce se prosazujícími články jsou lithiové články, z důvodů jejich dlouhé životnosti i schopnosti dodávat vysoké proudy. Současně nejvyužívanější lithiové články využívají elektrod z lithia a oxidu manganického, s elektrolytem ve formě lithiové soli [11].

Celá oblast technologií pro uložení elektrické energie je pořád předmětem intenzivního výzkumu a vývoje s cílem zdokonalit už používané technologie, popřípadě přijít s novými možnostmi uložení elektrické energie, nejenom z důvodu stále více prosazované elektromobility, ale také kvůli možnosti efektivněji využívat obnovitelné zdroje energie [11].

2 TVORBA MĚŘÍCÍ SOUSTAVY

Cílem praktické části této práce je pomocí vývojové platformy arduino a potřebných senzorů a dalších doplňujících komponentů vytvořit měřicí systém a program pro měření hmotnosti, teploty, atmosférického tlaku a relativní vlhkosti vzduchu. Dále také zhodnotit energetickou náročnost měřicího systému a realizovat zkušební měření s porovnáním změřených hodnot s vhodnými etalony.

2.1 Vývojová platforma arduino

Vývojová platforma arduino je otevřená hardwarová a softwarová platforma, jejíž původně zamýšleným cílem bylo vytvořit jednoduchou prototypovací platformu pro studenty. Tato platforma zaznamenala velký úspěch a stala se jednou z široce užívaných platform. Díky tomuto úspěchu vznikla široká škála doplňkových komponentů, ovládacích prvků a senzorů spolu s velkým množstvím komunitní podpory, stejně tak jako velké množství informačních materiálů.

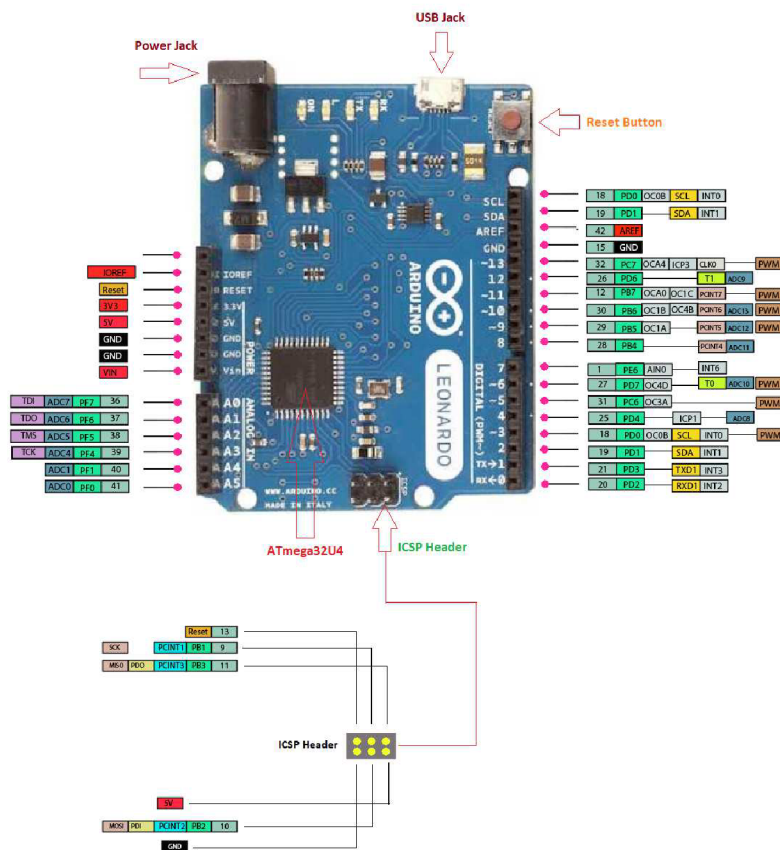
Pro programování desek arduino je užíváno rozhraní Arduino IDE, které je dostupné zdarma na webové stránce arduino. Samotné programování se nejčastěji realizuje pomocí programovacího jazyka C++ s využitím knihovny Wiring. Nespornou výhodou prostředí Arduino IDE je velké množství knihoven funkcí obsažených v tomto prostředí a dále také podpora komunitních knihoven funkcí.

Na trhu existuje celá řada základních desek arduino. Jejich společnou vlastností je, že jsou založeny na procesoru Atmel. Jednotlivé desky se od sebe potom liší v závislosti na perifériích daných desek, popřípadě počtu digitálních či analogových pinů. Mezi asi nejznámější a nejčastěji užívané desky patří arduino Uno, Leonardo, Mini, Micro a Mega. Existují však i mnohé klony.

Vzhledem k požadavkům této práce bylo vyhodnoceno jako nevhodnější využití desky arduino Leonardo nebo Uno, a to kvůli potřebným perifériím, vyhovujícímu počtu digitálních pinů a celkové dostupnosti těchto desek. K samotné realizaci byla nakonec vybrána deska arduino Leonardo [12] [13].

2.2 Arduino Leonardo

Arduino Leonardo je mikrokontroler založený na 8bitovém čipu ATmega32u. Tento čip pracuje na 5 V logické úrovni, obsahuje 32 KB programovou Flash paměť, 2,5 KB SRAM paměť a 1 KB EEPROM paměti. Dále obsahuje 16 MHz krystalový oscilátor, podporuje sériovou komunikaci pomocí sběrnice UART, podporuje sběrnici I2C a SPI. Arduino Leonardo je vybaveno 20 vstupně výstupními piny, z kterých 7 podporuje výstup PWM a 12 je možné využívat jako analogové, 5 je možné využívat pro externí interrupt. Rozložení pinů je vidět na obrázku č. 13.



Obr. 13 Rozložení pinů na desce arduino Leonardo (upraveno) [40]

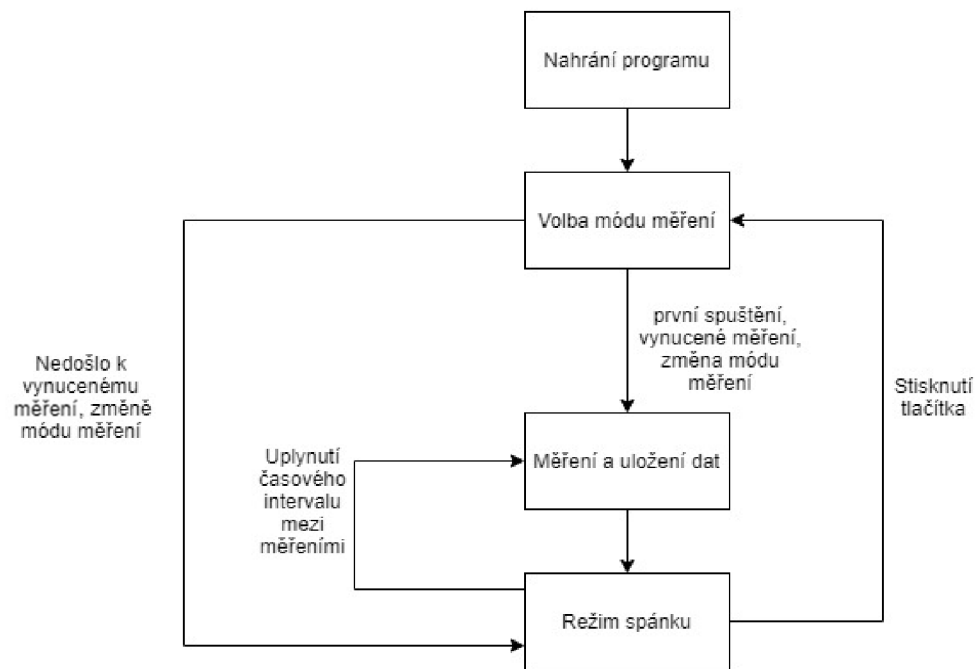
Arduino Leonardo obsahuje jako první deska arduino vestavěný mikro USB port, díky kterému je umožněna přímá komunikace desky s počítačem. Jak již bylo zmíněno dříve je deska Leonardo velice podobná arduinu Uno, nicméně liší se rozložením pinů, například připojení SPI sběrnice na samostatný ICSP konektor, nebo jiným umístěním pinů pro sběrnici I2C.

Napájení desky je možné pomocí vestavěného mikro USB, nebo z externího zdroje, doporučená napájecí napětí je 5 V pomocí USB a 7–12 V z externího zdroje [13] [14] [15].

2.3 Návrh programu

Cílem té to práce je navrhnout pomocí vývojové platformy arduino, měřící sestavu pro měření teploty, atmosférického tlaku, relativní vlhkosti vzduchu a hmotnosti na včelím díle. Pro realizaci byly stanoveny požadavky, jako snaha o nízkou energetickou náročnost sestavy, z které vyplývá například nutnost užití nějaké formy režimu spánku. Dále byl stanoven požadavek na jednoduchou možnost stanovení objemu získávaných dat, nastavením různých intervalů mezi měřeními, požadavek na uložení naměřených dat a jiné. Bylo také usouzeno, že by bylo vhodné implementovat 2 senzory pro měření teploty a vlhkosti, kdy jeden by byl umístěn uvnitř včelího díla a druhý vně. Díky tomu by bylo umožněno sledovat schopnost včelstva regulovat podmínky uvnitř včelího díla. Dalším požadavkem byla dostatečná přesnost měření hmotnosti včelího díla, z které vyplývá například možná nutnost kompenzovat vliv teploty na měření hmotnosti.

S uvážením těchto požadavků byla tedy navržena struktura programu znázorněna blokovým schématem na obrázku č. 14.



Obr. 14 Blokové schéma návrhu programu

Po úsporu energie je měřicí soustava uvedena do režimu spánku. Po uplynutí stanovené doby od posledního měření dojde k probuzení soustavy. Pro probuzení byly uvažovány mezi dvěma možnými realizacemi, a to využití Watchdogu nebo externího modulu hodin reálného času. Vzhledem k omezeným možnostem Watchdogu a to zejména maximální možné doby než dojde k přetečení časovače 8 sekund [15], a tedy nutnosti probudit soustavu každých 8 vteřin a následně ji hned uvést do režimu spánku, bylo vyhodnoceno jako výhodnější využití modulu hodin reálného času, díky kterému je možno probouzet soustavu po teoreticky jakkoliv dlouhém časovém intervalu. Po probuzení soustavy tedy dojde k realizaci měření teploty, relativní vlhkosti, atmosférického tlaku a hmotnosti, následně dojde k uložení dat a poté k nastavení doby pro další probuzení, nakonec k uvedení soustavy do režimu spánku.

Pro volbu délky intervalu mezi měřeními bylo navrženo jednoduché rozhraní využívající jednoho tlačítka a LED diody k indikaci současně zvoleného módu měření, kdy jednou z možností je trvalé uložení do režimu spánku. Stisknutím tlačítka je tedy soustava probuzena z režimu spánku a uvedena do stavu volby měřicího módu. Po uplynutí daného časového intervalu dojde k měření podle nového nastaveného módu, uložení dat, nastavení doby příštího probuzení a následnému přechodu do režimu spánku.

Dále bylo využito průběžné ukládání některých proměnných do paměti EEPROM, díky kterému například při výpadku napájení systému nedojde k restartu, popřípadě přerušeni měření. Namísto toho dojde k výpadku dat během této doby, ale po obnovení napájení se měření obnoví v příslušném režimu a data jsou ukládána do stejného souboru, ve kterém dojde pouze k výpadkům údajů právě za dobu přerušeni napájení.

Dále bylo rozhodnuto, že pro realizaci měřicí soustavy bude využito jedné z největších výhod vývojové platformy arduino, a to velkého množství knihoven funkcí pro obsluhu jednotlivých modulů. Tedy knihoven, které jsou součástí programovacího prostředí Arduino IDE a dále knihoven pro obsluhu externích modulů dodaných nebo doporučených výrobcí těchto modulů.

Jednotlivým hardwarovým a softwarovým realizacím a případným dalším problémům spojených s realizací jsou věnovány následující kapitoly.

2.4 Režim spánku

Vzhledem k požadavku na nízkou energetickou náročnost měřicí soustavy byla zřejmá nutnost využití určité formy režimu spánku. U desek arduino založených na procesoru Atmega32u4 je k dispozici 6 režimů, které umožňují snížit spotřebu energie, a to vypnutím různých periférií, konkrétně se pak jedná o 6 různých režimů. Těmito módy jsou Idle mód, ADC noise reduction mód, Power-down mód, Power-save mód, Standby mód a Extended standby mód. Rozdíl mezi jednotlivými módy je ve deaktivovaných funkcích a perifériích, které je možné vidět v obrázku č. 15. Vzhledem ke snaze o co největší úsporu energie byl vybrán právě Power-down mód. Tento mód zastaví hlavní oscilátor desky. K probuzení procesoru může dojít pomocí externího restartu, restartu pomocí Watchdogu, restartu z důvodu nízkého napájecího napětí nebo pomocí externího interruptu, přivedeného na jeden z pinů desky [15].

Sleep Mode	Active Clock Domains				Oscillators	Wake-up Sources							
	clk _{CPU}	clk _{FLASH}	clk _{IO}	clk _{ADC}		Main Clock Source Enabled	INT6, INT3:0 and Pin Change	TWI Address Match	SPM/EEPROM Ready	ADC	WDT Interrupt	Other I/O	USB Synchronous Interrupts
Idle			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
ADCNRM				X	X	X ⁽²⁾	X	X	X	X		X	X
Power-down						X ⁽²⁾	X			X			X
Power-save						X ⁽²⁾	X			X			X
Standby ⁽¹⁾					X	X ⁽²⁾	X			X			X
Extended Standby					X	X ⁽²⁾	X			X			X

- Notes: 1. Only recommended with external crystal or resonator selected as clock source.
 2. For INT6, only level interrupt.
 3. Asynchronous USB interrupts are VBUSTI and WAKEUPI.

Obr. 15 Přehled režimů pro snížení spotřebu energie [41]

K samotné realizaci obsluhy režimu spánku byla využita jedna ze základních knihoven prostředí arduino IDE, a to knihovna sleep. Nejprve je nutné zvolit požadovaný mód spánku. Následně je nutné nastavit externí interrupt, který bude využit k probuzení arduina, tento proces bude popsán dále. Následně je povolen režim spánku, a nakonec dojde k usnutí procesoru. Ve skriptu k tomuto procesu slouží funkce BEE.


```

set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_DOWN); //nastavení režimu spánku
EIFR = bit (INTF3); //vyčištění interupt 3 flagu-RTC interrupt pin 1
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(RTC_interrupt_pin), RTC_WakeUp, FALLING); //připojení interrupt na RTC pin
EIFR = bit (INTF2); //vyčištění interupt 2 flagu-BTN interrupt pin 0
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(BTNPin), BTN_WakeUp, FALLING); //Připojení interruptu na BTN pin
sleep_enable(); //povolení režimu spánku

digitalWrite(ledPin, LOW);
sleep_cpu(); //aktivace spánku-následující kód se provede po probuzení arduino

```

Obr. 16 ukázka kódu aktivace režimu spánku

Probuzení měřicí soustavy z režimu spánku bude nutné ve dvou případech, a to pokud uplynul zvolený interval mezi měřeními a bude tedy potřeba provést měření a druhým případem je požadavek na změnu režimu měření, tedy právě změnu délky časového intervalu mezi měřeními.

2.4.1 Probuzení pomocí tlačítka

Vzhledem k požadavku na možnost měnit intervaly mezi měřeními bylo navrženo jednoduché rozhraní využívající tlačítka a indikační LED diodu. K přístupu to tohoto rozhraní je, ale nejprve nutné probudit arduino z režimu spánku. K tomu je využít právě externí interrupt pomocí tohoto tlačítka, dojde tedy k probuzení měřicí soustavy právě když došlo ke stisknutí tlačítka. Pro umožnění této funkce je nutné nastavit externí interrupt. Příklad toho je vidět na obrázku č. 17.

```

EIFR = bit (INTF2); //vyčištění interupt 2 flagu-BTN interrupt pin 0
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(BTNPin), BTN_WakeUp, FALLING); //Připojení interruptu na BTN pin

```

Obr. 17 příklad nastavení externího interruptu pomocí tlačítka

Funkcí pro připojení externího interruptu je právě `attachInterrupt`. Parametry této funkce jsou číslo interruptu asociovaného s příslušným I/O pinem, které je dohledatelné v datasheetu příslušné desky, název funkce, která bude vykonána po spuštění tohoto interruptu a úroveň signálu, která způsobí spuštění interruptu. Dále je také vyčištěn registr interrupt flagu, aby nedocházelo k nechtěnému spuštění před správným nastavením příslušného interruptu.

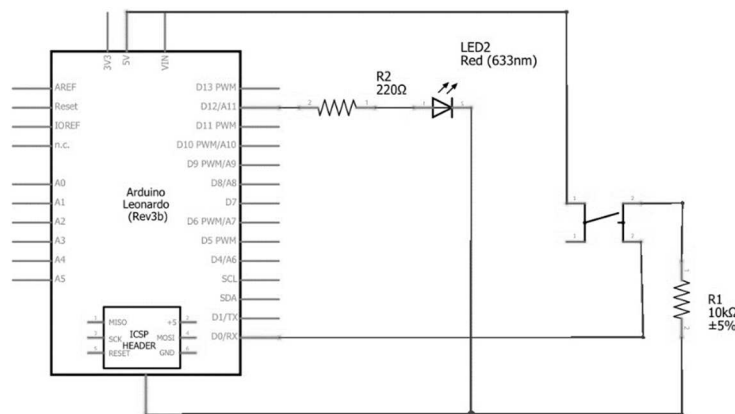
Dále je nutné vytvoření funkce, která bude volána příslušným interruptem. V tomto případě se jedná o funkci `BTN_WakeUp`. Vzhledem k tomu že je tato funkce součástí interruptu je požadováno, aby byla co nejkratší. Jediné, co tedy tato funkce dělá je, že deaktivuje režim spánku a nastaví hodnotu proměnné, která indikuje že došlo k probuzení právě zmáčknutím tlačítka. Toho je využito pro volání funkce pro volbu režimu měření, o které bude pojednááno dále v textu. A nakonec dojde k odpojení interruptu z pinu, na který byl dříve připojen aby nedocházelo k spuštění interruptu během vykonávání kódu mimo dobu režimu spánku.

```

void BTN_WakeUp() {
    sleep_disable(); //deaktivace spánku
    BTN_flag = 1; //BTN interrupt spuštěn
    detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(BTNPin)); //odstranění interruptu z BTN_pinu
}

```

Obr. 18 příklad funkce probuzení z režimu spánku pomocí tlačítka



Obr. 19 Schéma zapojení tlačítka a LED diody

2.4.2 Probuzení pomocí RTC

Druhým důvodem k probuzení měřicí soustavy z režimu spánku je uplynutí nastaveného časového intervalu, a tedy požadavek na provedení měření. Jak již bylo zmíněno hlavními dvěma uvažovanými možnostmi bylo využití Watchdogu procesoru nebo využití externího modulu reálného času. Vzhledem k tomu že maximální možná doba do přetečení časovače Watchdogu je 8 sekund [15], a tedy při požadavku na uvedení soustavy do režimu spánku by bylo nutné probouzet arduino maximálně po uplynutí právě 8 sekund, následně zavést nějakou formu počítadla, zaznamenávajícího kolikrát došlo k probuzení, a rozhodnutí, zda již došlo k uplynutí požadované doby. Tato skutečnost byla považována za neoptimální, a proto bylo rozhodnuto ve prospěch využití externího modulu reálného času. Toto rozhodnutí sebou kromě možnosti probouzet arduino po teoreticky jakkoliv dlouhém časovém intervalu, přineslo i další výhodu, a to schopnost jednoduše odečítat současný čas a datum. Další výhodou užití externích hodin reálného času je, že tyto moduly většinou obsahují záložní baterii, díky které i při výpadku hlavního zdroje napájení je v systému udržen reálný čas.

Pro výběr samotného modulu reálného času byla dána podmínka dostupnosti, ale tou důležitější nutnou vlastností byla schopnost přivést na vstupní pin desky arduino signál po uplynutí požadovaného časového intervalu, který bude sloužit podobně jako u dříve popsaného probouzení pomocí tlačítka jako externí interrupt. Tato schopnost totiž není zaručená u všech dostupných modulů reálného času. Tyto podmínky nejlépe splňuje modul DS3231, a proto byl pro realizaci právě tento modul zvolen.

2.4.3 Základní vlastnosti modulu DS3231

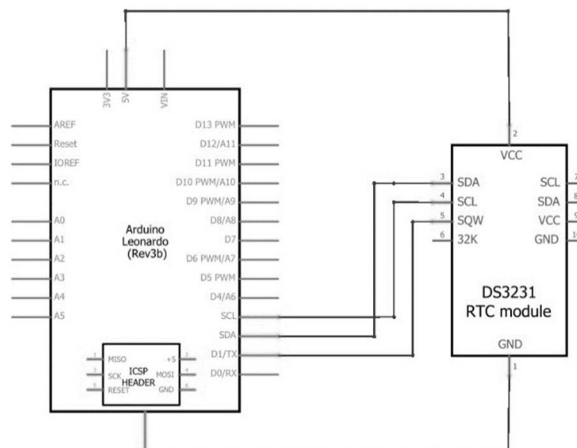
Modul DS3231 je modul hodin reálného času, který obsahuje záložní baterii, je schopný tzv. funkce alarmu, tedy dokáže v požadovaný čas přivést na pin desky signál. Zvolený modul také obsahuje integrovanou EEPROM paměť o kapacitě 32 kb, které ale pro naše účely nebude využito, dále je schopen generovat 32 kHz obdélníkový signál. Pro jeho připojení k desce arduino se využívá sběrnice I2C. Některé z důležitých parametrů jsou vypsány v Tabulce č. 1 [16].

Tabulka 1 Parametry DS3231 údaje převzaty z [16]

Hodiny reálného času DS3231	
Provozní napětí	3,3-5 V
Provozní proud při 5V napájení	300 μ A
Kapacita EEPROM úložiště	32 kb
Výstupní frekvence	32 kHz
Odchylka kmitů oscilátoru	\pm 2 ppm
I2C adresa	0x68

2.4.4 Zapojení Modulu DS3231

Pro zapojení modulu DS3231 využívaného jako zdroj externího interruptu je nutné použít 5 pinů. Dva z těchto pinů jsou napájení modulu. Modul je napájen napětím 5 V. Další 2 jsou užity pro komunikaci s deskou arduino. Ke komunikaci je využito sběrnice I2C, která se je na desce arduino Leonardo vyvedena na 2 oddělené piny, SDA a SCL. Tyto piny jsou však reálně spojeny s digitálními piny 2 a 3. Výhodou sběrnice I2C je možnost připojit teoreticky až 128 různých zařízení pomocí pouze 2 pinů. Poslední pin je využit právě jako zdroj externího interruptu, ten je na modulu připojen na pin SQW a na straně desky na digitální pin 1. Zapojení je možné vidět na obrázku č. 20.



Obr. 20 Schéma zapojení RTC modulu DS3231

2.4.5 Programová realizace obsluhy DS3231

K obsluze modulu DS3231 je využito knihovny funkcí DS3231RTC [17]. Tato knihovna zajišťuje připojení modulu pomocí I2C, kdy k tomu je dále využito knihovny Wire, jedné ze základních knihoven arduino IDE. Následně knihovna obsahuje funkce pro nastavení současného času, přečtení současného času, nastavení funkce alarmu, převod modulem užívaného formátu zápisu dat BDC¹, do desetinného formátu a obráceně, a další. Knihovna také využívá další základní knihovny arduino IDE, knihovny Time, která slouží k vytvoření časových objektů a formátů jednoduše využitelných při programování.

¹ binárně kódovaný desetinný formát

Prvním důležitým krokem pro užívání modulu DS3231 je nastavení skutečného současného času. Toto nastavení je nutné provést pouze při prvním zapnutí tohoto modulu. Příklad kódu pro toto nastavení je na obrázku č. 21. Nastavení probíhá pomocí funkce `RTC.write` s využitím časového objektu `tmElements_t` vytvořeného pomocí knihovny `Time`.

```
tmElements_t tm;
tm.Hour = 14;
tm.Minute = 56;
tm.Second = 05;
tm.Day = 20;
tm.Month = 4;
tm.Year = 2020 - 1970; // tmElements_t.Year je počítán od roku 1970
RTC.write(tm); // zapsání struktury tmElements_t do RTC modulu
```

Obr. 21 Příklad nastavení času RTC modulu

Pro užití `RTC2` modulu jako zdroje externího interruptu je nutné aktivovat funkci alarmu modulu. Předtím je však v setupu programu zajistit vyčištění případných nežádoucích předchozích nastavení. K tomu slouží funkce `clear_RTC_alarm`. Následně je povoleno spuštění interruptu pomocí alarmu RTC modulu.

Modul DS3231 umožňuje různá nastavení alarmu například každou sekundu, každou minutu. Pro naše účely je ale výhodná možnost nastavení spuštění alarmu, když se shodují minuty, popřípadě hodiny [16], a právě tohoto režimu je využito. Nastavení alarmu s požadovaným časovým intervalem zajišťuje funkce `RTC_alarm_set`. Tato funkce nejprve z EEPROM přečte současně nastavený mód měření. Dále pomocí modulu RTC zjistí současný čas, následně dojde pomocí `switch – case` struktury, podle zvoleného módu měření, k nastavení příštího časového údaje pro probuzení měřící soustavy. Toto nastavení probíhá formou přičtení požadovaného časového intervalu mezi měřeními k současnému časovému údaji. Dále je nutná kontrola, zda nedojde k porušení správnosti časového formátu, tedy zda nedojde k překročení 59 minut, při užití intervalu mezi měřeními v minutách, popřípadě 23 hodin při nastavení intervalu v hodinách, a pokud k tomu dojde následně to opravit. Nakonec tedy dojde k samotnému nastavení alarmu na požadovaný čas funkcí `RTC_set_Alarm`, a ještě dojde k vyčištění případného předchozího signálu alarmu.

Dalším krokem je nastavení externího interruptu od RCT modulu. Tato procedura je téměř totožná s dříve popsáním nastavením externího interruptu pomocí tlačítka. Dojde tedy k připojení interruptu na zvolený digitální pin, příklad je možný vidět na obrázku č. 16, a vytvoření funkce `RTC_WakeUp` zajišťující probuzení při požadovaném signálu na tomto pinu příklad je možný vidět na obrázku č. 22. Tato funkce také zajistí deaktivaci režimu spánku a nastaví hodnotu proměnné určující, že došlo k probuzení z pomocí RTC modulu.

```
void RTC_WakeUp() {
    sleep_disable();//deaktivace režimu spánku
    RTC_flag = 1;//RTC interrupt spuštěn
    detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(RTC_interrupt_pin)); //odstranění interruptu z RTC pinu;
}
```

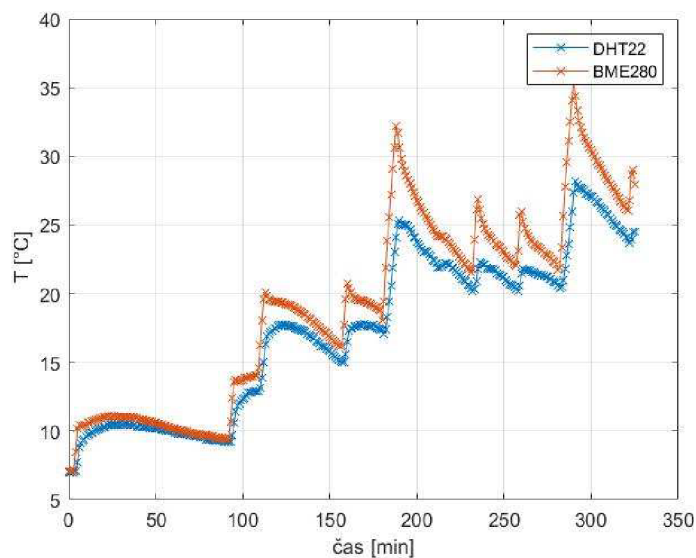
Obr. 22 příklad funkce probuzení z režimu spánku pomocí RTC

² Real Time Clock – Hodiny reálného času

2.5 Měření teploty, vlhkosti a tlaku

Pro realizaci měření teploty vlhkosti a atmosférického tlaku existuje nepřeborné množství dostupných senzorů použitelných s vývojovou platformou arduino. Požadavkem na aplikaci při tomto úkolu byla kromě dostupnosti senzoru i jednoduché nastavení a uvedení do provozu. Jako ideální se tedy jevil senzor od společnosti Bosch BME280. Tento senzor totiž dokáže s dostatečnou přesností realizovat měření těchto tří veličin, což usnadňuje jeho obsluhu.

Vzhledem k požadavku na schopnost měření teploty a relativní vlhkosti jak vně, tak uvnitř včelího díla, bylo v plánu jako druhého senzoru využít senzoru DHT22. Při testovacích měřeních však byla zjištěna poměrně pomalá odezva senzoru DHT22 na změnu teploty v porovnání se senzorem BME280. Jako další byl při finalizaci programu zjištěn nedostatek programové paměti, kvůli kterému bylo rozhodnuto namísto senzoru DHT22 využít druhého senzoru BME280, protože toto řešení je z hlediska náročnosti na paměť výhodnější. Problematice optimalizace programové paměti se bude dále věnováno v kapitole 2.9.



Obr. 23 Srovnání senzorů DHT22 a BME280

2.5.1 Senzor BME280

Senzor BME280 od společnosti Bosch je, jak již bylo zmíněno kombinovaný senzor teploty, relativní vlhkosti a atmosférického tlaku. Fyzikální principy fungování využitých senzorů nejsou společností Bosch oficiálně uvedeny. Senzor je možné k desce arduino připojit buď pomocí sběrnice SPI nebo sběrnice I2C. Základní specifikace senzoru jsou vypsány v tabulce 2 [18].

Tabulka 2 Parametry senzoru BME280 údaje převzaty z [18]

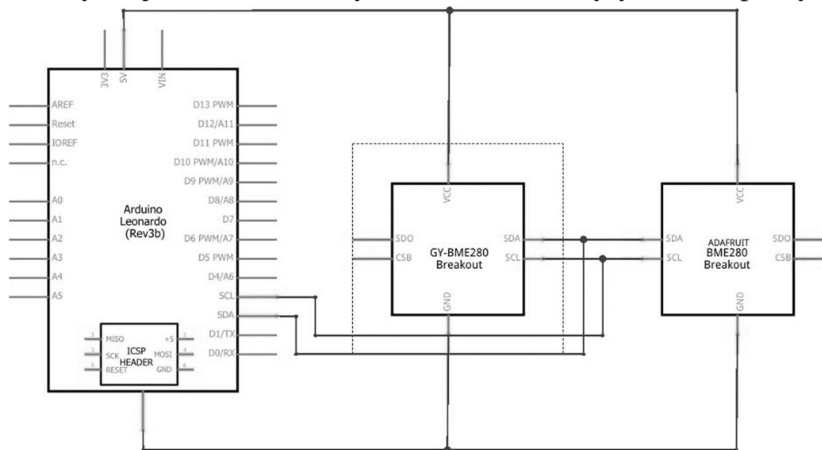
BME280	
Provozní napětí	1,2–3,6 V
Proud při měření vlhkosti	340 μ A
Proud při měření teploty	350 μ A
Proud při měření tlaku	714 μ A
Přesnost senzoru relativní vlhkosti	± 3 %
Přesnost senzoru teploty – rozsah 0–65 °C	± 1 °C
Přesnost senzoru teploty – rozsah -20–0 °C	$\pm 1,25$ °C
Přesnost senzoru atmosférického tlaku	± 1 hPa
I2C adresa	0x76 nebo 0x77

2.5.2 Zapojení BME280

Pro připojení modulů obsahující senzory BME280 je využito sběrnice I2C. SDA a SCL piny jsou připojeny na příslušné piny desky arduino Leonardo – digitální pin 2 a 3. Oba využitě moduly jsou připojeny na napájecí napětí 5 V. To je umožněno faktem že oba využitě moduly, jak modul od společnosti Adafruit, tak modul od společnosti Gybmeb obsahují regulátory napětí a měniče logických úrovní pro sběrnici I2C. V případě že by byl využit modul bez těchto opatření je nutné napájet senzor pomocí 3,3 V výstupu arduino a užít externí měnič logických úrovní pro připojení pomocí I2C.

Jak z předešlého textu vyplívá bylo využito dvou různých modulů se senzorem BME280. Důvod k využití dostupných senzorů je pouze že tyto senzory byly dostupné v době realizace měřicí soustavy, jinak by bylo možné využít modulů od stejného výrobce.

Pro realizaci připojení modulů pomocí I2C je nutné, aby měli rozdílné I2C adresy. Senzor BME280 podporuje 2 různé adresy, a to 0x76 a 0x77. Změna adresy je možná pomocí připojení SDO pinu senzoru na zem nebo na napájecí napětí. U modulu od společnosti Adafruit je tato změna velice jednoduchá z důvodu vyvedeního pinu, který je pro změnu ze základní adresy 0x77 na adresu 0x76 nutné pouze připojit na zem desky arduino. U modulu od společnosti Gybmeb je základní adresa nastavená na 0x76 a pro její změnu je nutné přerušit jeden z kontaktů modulu a přepájet ho. Z toho důvodu je změna obtížnější, a ne zcela vratná. Díky tomu že moduly mají základní adresy I2C rozdílné nebyly žádné úpravy třeba [19] [20].



Obr. 24 Schéma zapojení modulů se senzorem BME280

2.5.3 Programová realizace obsluhy BME280

K ovládání modulů pro měření meteorologických údajů je využito knihovny Adafruit_BME280 [21]. Jak název napovídá knihovna je dostupná k modulu od společnosti Adafruit, nicméně funguje i pro moduly od jiných společností. Tato knihovna dále využívá základních knihoven Arduino IDE, knihovny Wire a SPI. Kdy knihovna Wire je využívána pro připojení modulu pomocí sběrnice I2C a knihovna SPI je využívána pro připojení pomocí sběrnice SPI. Jak bylo výše zmíněno v našem případě je využito připojení pomocí I2C. Jako další obsahuje knihovna funkce pro nastavení režimů měření senzoru BME280. Mezi tato nastavení patří zvolení módu měření, a to mezi normal a forced módem. Normal mód spočívá v periodickém měření dat a je výhodný pro měření s požadavkem na velkou frekvenci získávání dat. Forced mód spočívá v provedení vynuceného měření a následného přechodu senzoru do režimu spánku. Dalšími možnými nastaveními senzoru je oversampling, a aktivace IIR filtru³. Oversampling je metoda pro zlepšení poměru signálu ku šumu, a je možný nastavit zvlášť pro senzory teploty, vlhkosti i tlaku. Pro naše účely bylo zvolené doporučené nastavení pro sledování meteorologických údajů, tedy užití forced módu, vypnutý oversampling na všech senzorech a vypnutý IIR filtr. Toto nastavení by mělo zajistit nejnižší možnou energetickou náročnost měření [18]. Dále bylo deaktivováno měření atmosférického tlaku na jednom z modulů, protože se nepředpokládá, že by se atmosférický tlak uvnitř a vně včelího díla lišil. Tímto krokem by mělo dojít k další úspoře energie. Nastavení obou modulů je vidět na obrázku č. 25. Dalšími funkcemi knihovny Adafruit_BME280 jsou funkce pro vyčtení hodnot jednotlivých měřených hodnot a následná aplikace kompenzačních vztahů s využitím kompenzačních parametrů dodaných společností Bosch. Tyto vztahy jsou dostupné v datasheetu senzoru. Knihovna dále obsahuje funkce pro vypočítání přibližné nadmořské výšky nebo určení indexu horka. Tyto funkce ale pro realizaci měřicí soustavy nejsou využity.

```

bme1.setSampling(Adafruit_BME280::MODE_FORCED,
  Adafruit_BME280::SAMPLING_X1, // teplota
  Adafruit_BME280::SAMPLING_X1, // tlak
  Adafruit_BME280::SAMPLING_X1, // vlhkost
  Adafruit_BME280::FILTER_OFF ); IIR filtr

bme2.setSampling(Adafruit_BME280::MODE_FORCED,
  Adafruit_BME280::SAMPLING_X1, // teplota
  Adafruit_BME280::SAMPLING_NONE, // tlak
  Adafruit_BME280::SAMPLING_X1, // vlhkost
  Adafruit_BME280::FILTER_OFF ); IIR filtr

```

Obr. 25 příklad nastavení senzorů BME280

Ve skriptu byly nejprve vytvořeny objekty pro oba moduly, bme1 a bme2. Následně byla v setupu skriptu provedena jejich inicializace a nastavení. Samotné vyčtení hodnot z obou senzorů je součástí funkce measure.

³ Infinite impulse response filtr – filtr s nekonečnou impulsní odezvou

2.6 Měření hmotnosti

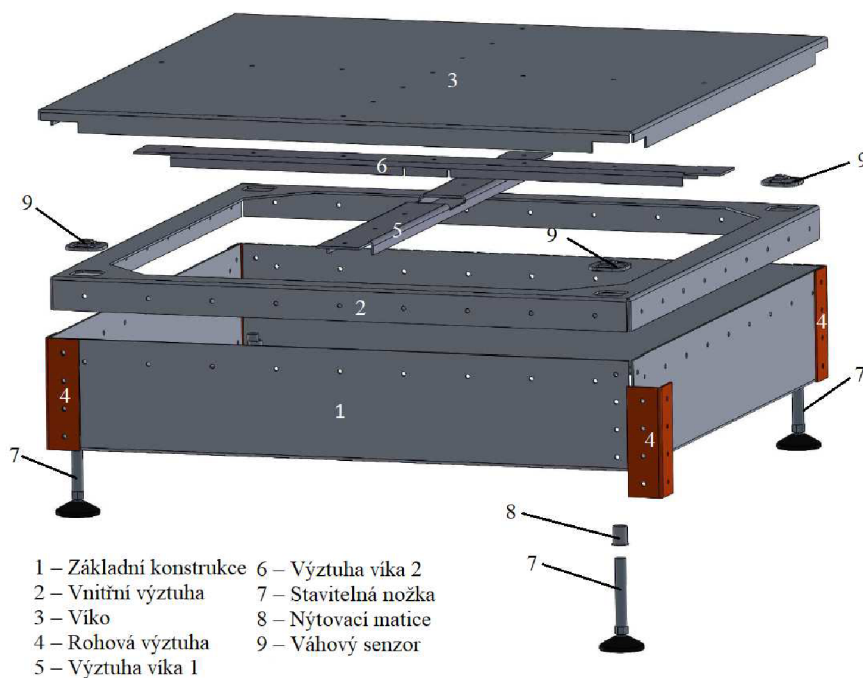
Měření hmotnosti je nejkomplikovanější částí realizace tohoto měřicího systému. A to z důvodu, že, k měření hmotnosti je potřeba kromě senzorů hmotnosti a AD převodníku také potřeba samotná konstrukce váhy. Dále je nutné provést kalibraci váhy, navíc při využití senzorů hmotnosti pro dlouhodobé statické zatížení je třeba zohlednit vliv studeného tečení a dále zohlednit teplotní závislosti senzorů a je tedy nutné zavést nějakou formu kompenzace.

Pro realizaci byly zvoleny běžné tenzometrické senzory, schopné měřit hmotnost do 50 kg, využívané v osobních nebo balíkových váhách. Na váze byly tedy užity 4 tyto senzory a díky tomu je dosaženo teoretické zatížitelnosti váhy do 200 kg. Tyto senzory využívají deformačního prvku ve tvaru písmene E. Senzory jsou připojeny do AD převodníku HX711. Jedná se o AD převodník určený právě pro aplikacích pro měření hmotnosti.

2.6.1 Návrh konstrukce váhy

Bylo rozhodnuto, že bude vytvořena vlastní váha pro měření včelího díla. Jednou z možností bylo použít nějakou již existující osobní či balíkovou váhu a pouze vytvořit nějakou formu rozšíření její plochy, aby bylo možné na ni umístit včelí dílo. Zvolena byla ale možnost vytvoření celé konstrukce váhy pro měření.

Požadavkem na takovou konstrukci byla snaha o dosažení přiměřené hmotnosti konstrukce, dobrá odolnost vůči vlivům prostředí a dostatečná tuhost konstrukce. Byla tedy navržena konstrukce tvořená z ohýbaného hliníkového plechu. Jednotlivé díly této konstrukce jsou snýtovány. Váha se skládá ze dvou hlavních částí, a to spodního základny váhy a víka váhy. U obou částí bylo využito různých dílců sloužících jako výztuhy pro dosažení větší tuhosti konstrukce. Dále byly na spodní základně váhy vytvořeny otvory pro montáž senzorů hmotnosti. Tyto otvory zajišťují schopnost deformačních členů senzorů se bez ovlivnění deformovat. Součástí konstrukce jsou dále nastavitelné nožky pro možnost vyrovnání polohy váhy, kvůli zlepšení přesnosti měření. Výkresová dokumentace jednotlivých dílů a finálních sestav je součástí přílohy. Rozměry desky váhy jsou 560 x 560 mm. Celková výška bez stavitelných nožek je 107 mm. Hmotnost celé váhy je 4,8 kg. Senzory jsou na spodní základnu váhy připevněny pomocí kyanoakrylátového lepidla.



Obr. 26 Konstrukce váhy

2.6.2 Zapojení sestavy pro měření hmotnosti

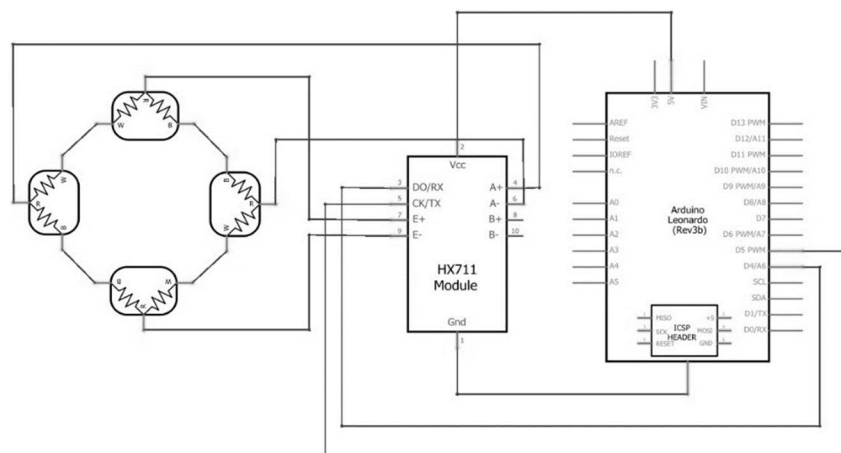
K sestrojení váhy byly využity 4 senzory hmotnosti. Tyto senzory jsou spojeny do tzv. Wheatstoneova můstku. Toto zapojení je jedním z velice často používaných zapojení pro měření malých změn odporu. Senzory jsou tedy vzájemně propojené a současně připojené do AD převodníku HX711. AD převodník je pak zapojen do desky arduino. K připojení jsou využity digitální piny 4 a 5. Převodník je napájen napětím 5 V. Parametry senzorů hmotnosti a AD převodníku HX711 jsou uvedeny v tabulce č. 3 a č. 4

Tabulka 3 Parametry váhového senzoru údaje převzaty z [22]

Váhový senzor 50 kg	
Měřicí rozsah	0–50 kg
Vstupní napětí	5–10 V
Vstupní odpor	$1000 \Omega \pm 50 \Omega$
Výstupní odpor	$1000 \Omega \pm 50 \Omega$
Chyba vlivem tečení (3 min)	0,1 % FS ⁴
Chyba vlivem teploty	<0,15 (FS/10 °C)
Hystereze	0,2 %(FS)

Tabulka 4 parametry AD převodníku HX711 údaje převzaty z [23]

HX711	
Počet bitů	24
Počet kanálů	2
Pracovní napětí	2,6–5.5 V
Pracovní proud	<1500 μ A
Zesílení kanál A	64 nebo 128
Zesílení kanál B	32



Obr. 27 Schéma zapojení AD převodníku HX711 a zapojení váhových senzorů do Wheatstoneova můstku

⁴ Full Scale – plný rozsah

2.6.3 Programová realizace měření hmotnosti

Pro realizaci programu pro měření hmotnosti bylo využito knihovny funkcí HX711 [24]. Tato knihovna obsahuje funkce pro připojení AD převodníku. Vyčtení hodnoty z AD převodníku a funkce pro přepočítání výstupu AD převodníku na použitelnou jednotku hmotnosti, vztah 7.

$$\text{požadovaná hodnota} = \frac{\text{Hodnota změřená ADC} - \text{Zero_factor}}{\text{Calibration_factor}} \quad (7)$$

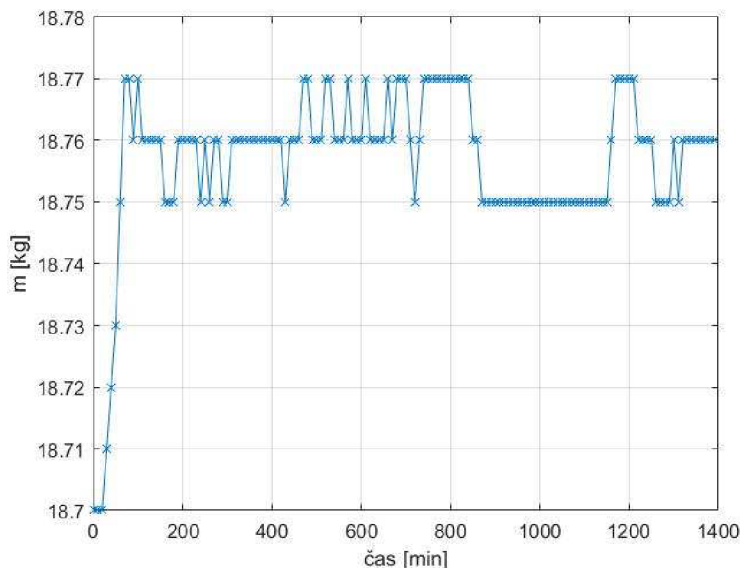
Je tedy vidět že pro získání požadované hodnoty hmotnosti je nutné, kromě samotného získání signálu z AD převodníku, také znát hodnotu Zero_factoru, tedy hodnoty představující signál odpovídající hmotnosti víka váhy, který slouží pro vynulování váhy a hodnotu Calibration_factoru, hodnoty pro získání požadované hodnoty měřené hmotnosti. Obě tyto hodnoty je nutné získat pomocí kalibrace váhy. Zero_factor získáme změřením hodnoty signálu AD převodníku při prázdné váze. Hodnotu Calibration_factoru získáme změřením hodnoty signálu AD převodníku při užití závaží o známé hmotnosti. Od této získané hodnoty odečteme dříve získaný Zero_factor a podělíme hodnotou známé hmotnosti a získáme hodnotu Calibration_factoru. Pro určení obou hodnot byl vytvořen skript, který je součástí přílohy.

V programu pro měřicí soustavu jsou pak z kalibrace získané hodnoty nastaveny pomocí funkce scale.set_offset pro nastavení Zero_factoru a funkce scale.set_scale pro nastavení Calibration_factoru. Samotné měření hmotnosti je provedeno funkcí scale.get_units, kterou zjistíme hmotnost měřeného objektu v kg. Následně je provedena tepelná kompenzace této změřené hodnoty podle vztahu 8. Tepelné kompenzaci je věnována kapitola 2.6.5

2.6.4 Kompenzace tečení za studena

Vzhledem k tomu že většina levných váhových senzorů není navržena na dlouhodobé zatížení, může se u nich projevit tečení za studena, tedy deformace působením statické síly menší, než je mez kluzu materiálu, z kterého je deformační člen senzoru hmotnosti vyroben.

Bylo tedy provedeno měření pro zjištění, zda se tečení za studena v našem případě projevuje. Při měření byly použity závaží o hmotnosti 18,7 kg.



Obr. 28 Vliv tečení za studena na měřenou hmotnost

Z výsledků měření, zobrazených v obrázku 28 je vidět, že se vliv tečení za studena projeví. Z výsledků měření je vidět že k ustálení tečení dojde přibližně po 100 minutách. Rozdíl mezi počáteční hodnotou hmotnosti a hmotnosti změřené po ustálení tečení za studena je 0,32 %.

Jak bylo předpokládáno dojde po určité době k ustálení měřené hmotnosti. Vzhledem k tomu že tečení za studena závisí na velkém množství proměnných parametrů jako je teplota okolí, samotná působící zátěž a další, bylo by nutné pro přesný popis a dobrou kompenzaci velkého počtu měření s různými parametry. Tak pro alespoň částečnou kompenzaci chyby vlivem tečení za studena, bylo rozhodnuto pro využití postupu doporučeného výrobcem senzorů hmotnosti.

Doporučený postup

- Vynulovat váhu
- Umístit na váhu všechnu předpokládanou zátěž. V našem případě by šlo o konstrukci úlu a předpokládanou průměrnou hmotnost včelích produktů.
- Nechat váhu zatíženou po dostatečně dlouhou dobu.
- Překalibrovat váhu [25].

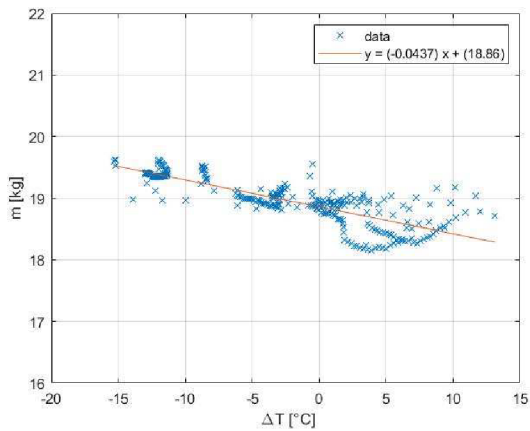


Obr. 29 Soustava pro měření teplotní závislosti měřené hmotnosti

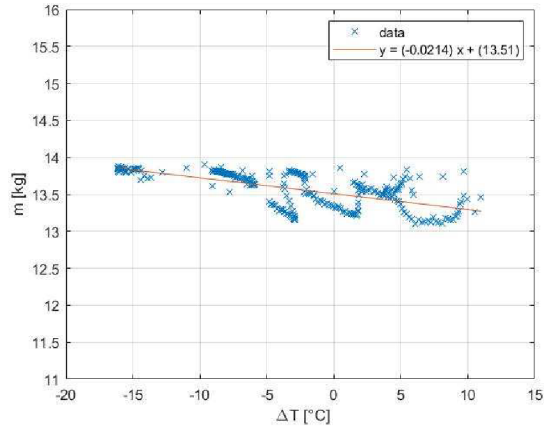
2.6.5 Kompensace vlivu teploty

Vzhledem teplotní závislosti elektrického odporu a teplotní roztažnosti materiálu deformačních členů senzorů a samotné konstrukce váhy, byla předpokládána nutnost teplotní kompenzace měření hmotnosti. Dále bylo předpokládáno že tato závislost bude přibližně lineární, protože jak teplotní roztažnost i závislost elektrického odporu jsou lineárně závislé na teplotě. K ověření těchto předpokladů byla provedena 2 měření, se závažími o hmotnosti 13,51 kg a 18,86 kg. Váha byla kalibrována při teplotě 22,4 °C.

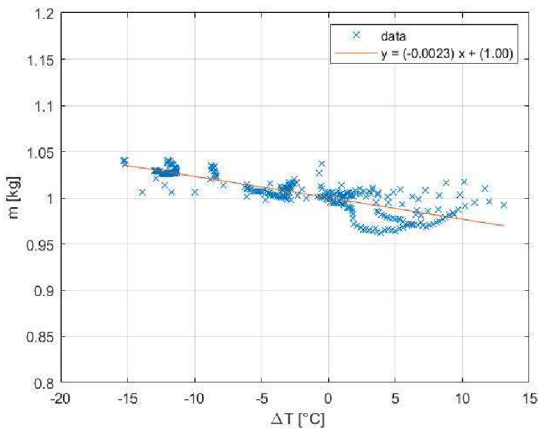
Pro měření byla sestavena jednoduchá tepelně izolovaná soustava skládající se ze zdroje tepla, termostatu a měřené váhy. Pro měření teploty bylo využito senzoru BME280.



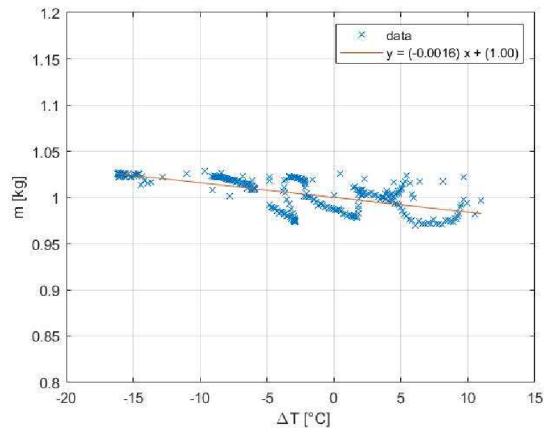
Obr. 30 Teplotní závislost měřené hmotnosti pro závaží o hmotnosti 13,51 kg



Obr. 31 Teplotní závislost měřené hmotnosti pro závaží o hmotnosti 18,86 kg



Obr. 32 Teplotní závislost měřené hmotnosti pro závaží o hmotnosti 13,51 kg přepočteno na 1 kg



Obr. 33 Teplotní závislost měřené hmotnosti pro závaží o hmotnosti 18,86 kg přepočteno na 1 kg

V grafech je vidět závislost změřené hmotnosti na rozdílu teploty při měření a kalibrační teploty. Je tedy vidět že předpoklad byl správný a měřená hmotnost doopravdy závisí na okolní teplotě. Dále jsou z měření vidět odchylky od linearity. Tento fakt je nejspíše způsoben nedokonalostmi vytvořené experimentální soustavy, obzvláště v oblasti tepelné izolace, i přes to ale bylo usouzeno že pro naše potřeby bude pro kompenzaci nejlepší předpokládat lineární závislost. Naměřená data tedy byla proložena lineárními závislostmi, z kterých je patrné že při rostoucím rozdílu teploty při měření a kalibrační teploty dochází k poklesu hodnoty měřené hmotnosti. Pro teplotní kompenzaci je pak důležitá směrnice této závislosti. Aby byla tato závislost použitelná pro měření různých hmotností byly směrnice závislostí získané z měření poděleny příslušnými známými hmotnostmi při kalibrační teplotě a tím byly získány směrnice závislostí pro 1 kg. Z těchto hodnot byl následně vypočítán aritmetický průměr a tato hodnota byla využita pro teplotní kompenzaci podle vztahu 8. Naměřené směrnice závislostí jsou uvedeny v tabulce č. 5.

$$m = m_{raw} \cdot [1 + t_{factor} \cdot (t_1 - t_{calib})] \quad (8)$$

Kde m je hmotnost v kilogramech po teplotní kompenzaci, m_{raw} je hmotnost v kilogramech získaná z AD převodníku, t_{factor} je vypočtená směrnice teplotní závislosti přepočtená na 1 kg, t_1 je teplota při měření ve °C, t_{calib} je teplota při kalibraci ve °C.

Tabulka 5 hodnoty směrnic teplotní závislosti

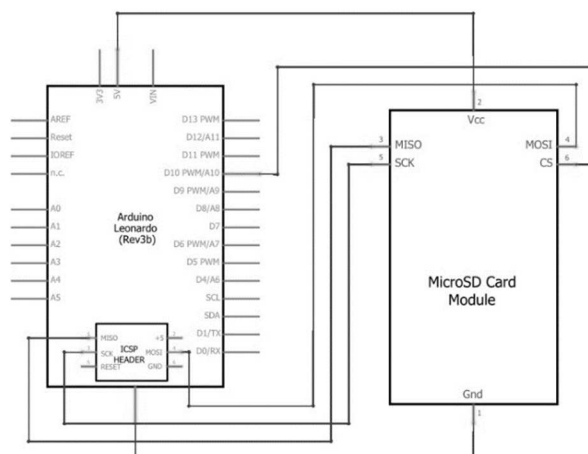
název	hodnota
Směrnice teplotní závislosti pro měření 13,51 kg	-0,0214
Směrnice teplotní závislosti pro měření 18,86 kg	-0,0437
Směrnice teplotní závislosti pro měření 13,51 kg, přepočtená na 1 kg	-0,0016
Směrnice teplotní závislosti pro měření 18,86 kg, přepočtená na 1 kg	-0,0023
Průměrná směrnice teplotní závislosti přepočtená na 1 kg	-0,002
Kalibrační teplota	22,4 °C

2.7 Ukládání dat

Pro ukládání naměřených dat bylo rozhodnuto pro využití modulu čtečky SD karty. Jedná se asi o jedno z nejjednodušších a poměrně spolehlivých řešení ukládání dat. Nevýhodou tohoto řešení je, že není možné k naměřeným datům přistoupit vzdáleně. Z toho důvodu byla zvažována, kromě užití SD karty, i možnost využití GPRS GSM modulu pro odesílání dat pomocí mobilní sítě a využití například služby ThingSpeak pro jejich ukládání. Tato varianta ale nakonec nebyla realizována z důvodu poměrně velké energetické náročnosti běžných GPRS GSM modulů, kdy tyto moduly vyžadují špičkový proud o velikosti až 2 A a běžném proudu až 453 mA při odesílání dat [26].

2.7.1 Zapojení čtečky SD karty

Pro realizaci bylo využito běžného modulu čtečky mikro SD karty, napájeného 5 V s připojením k arduinu pomocí sběrnice SPI. K připojení pomocí sběrnice SPI je využito 4 pinů. Piny pro MISO⁵, MOSI⁶ a SCK⁷ jsou na desce arduino Leonardo vyvedeny na samostatný ICSP konektor. Pin CS⁸ pro připojení sběrnice SPI je připojen na digitální pin 10. Zapojení je vidět na obrázku č. 34.



Obr. 34 Schéma zapojení čtečky mikro SD karet

⁵ Master In Slave Out

⁶ Master Out Slave In

⁷ Seriál Clock

⁸ Chip Select

2.7.2 Programová realizace ukládání dat

Pro ukládání obsluhu čtečky SD karet bylo původně využito knihovny SD, která je součástí rozhraní Arduino IDE, nakonec ale kvůli zjištění nespolehlivosti knihovny SD při ukládání dat bylo rozhodnuto pro využití knihovny SdFat [27], která je knihovnou, z které právě knihovna SD čerpá. Využitím Knihovny SdFat byl odstraněn problém se zápisem dat, a navíc došlo k mírné úspoře programové paměti.

SdFat je poměrně komplexní knihovnou obsahující funkce pro připojení čtečky SD karty pomocí sběrnice SPI, funkce pro inicializaci SD karty, čtení a zápis na SD kartu, funkce pro formátování karty a další. V našem případě je čtečky využito pouze pro zápis na SD kartu.

Nejprve je ve skriptu vytvořen objekt SD karty. Následně je nastaven CS pin a provedena inicializace karty funkcí SD.begin. Samotný zápis změřených dat je proveden ve funkci SD_WriteData. Tato funkce obsahuje vytvoření názvu souboru, do kterého budou naměřená data ukládána. Tento název musí být ve formátu 8.3 tedy název dlouhý maximálně 8 znaků a přípona souboru o délce 3 znaky. Pro pojmenování souborů byl zvolen formát sestávající se z času začátku měření, uloženého v paměti EEPROM, získaného pomocí RTC modulu, a zvoleného módu měření – hmmmss_číslo módu měření.txt např. 122454_1.txt. Ve skriptu následně dojde k otevření souboru, případně jeho vytvoření, pokud soubor neexistuje, na SD kartě a následnému zápisu dat na SD kartu. Na SD kartu je zapsáno datum a čas měření, změřené údaje o teplotě, relativní vlhkosti a atmosférickém tlaku od prvního senzoru, teplota a relativní vlhkost z druhého senzoru, změřená hmotnost bez provedené teplotní kompenzace a změřená hmotnost po teplotní kompenzaci. Jednotlivé údaje jsou od sebe odděleny středníkem. Pro správný zápis dat je nakonec nutné uzavřít soubor funkcí dataFile.close.

2.8 Realizace rozhraní pro volbu módu měření

Součástí realizace měla být možnost volby intervalu mezi měřeními. Tuto možnost zajišťuje funkce mode_select. Volba módu je prováděna zmáčknutím tlačítka a současně zvolený mód je indikován LED diodou. Výběr módu je zpřístupněn zmáčknutím tlačítka, které probudí arduino z režimu spánku. Následuje 10 sekund dlouhý interval během kterého pokud nedojde ke zmáčknutí tlačítka přejde soustava do režimu spánku bez provedení měření či změny módu. Pokud během tohoto intervalu dojde k jednomu zmáčknutí tlačítka dojde k vynucenému měření do stejného souboru jako předchozí měření. Nedojde ke změně módu a příští měření se provede po uplynutí doby, nastavené příslušným módem, od posledního měření před zmáčknutím tlačítka. Dojde-li k více než jednomu zmáčknutí tlačítka začne se měnit mód měření. Každé stisknutí tlačítka obnoví dobu 10sekundového intervalu. Po uplynutí intervalu dojde k provedení měření podle příslušného módu a uložení dat do nového souboru, do kterého se dále budou ukládat změřená data. Součástí této funkce je aplikace softwarového debouncingu tlačítka, tedy odstranění vlivu nechtěných signálů vzniklých spojováním a rozpojováním kontaktu při stisknutí tlačítka, kvůli mechanickým vlastnostem tohoto kontaktu. Pro debouncing se dá s u platformy arduino s výhodou využít funkce millis, která vypíše čas v milisekundách od startu programu. Je tedy jednoduché zjistit, jak dlouho je příslušný signál na tlačítku a zda se nezměnil delší dobu, než je námi požadováno. Díky tomu je jednoduché vytvořit debouncing bez nutnosti tzv. busy – waitingu nebo interruptu. Funkce millis je také využito pro kontrolu, zda uplynul 10sekundový interval při volbě módu měření, nebo pro blikání diody požadovanou frekvencí. Jednotlivé módy měření jsou uvedeny v tabulce č. 6. Zapojení tlačítka a LED diody je na obrázku č. 19 v kapitole 8.4.1.

Tabulka 6 Módy měření

mód	Interval mezi měřeními	Indikace LED
0	Trvalý režim spánku	Dioda svítí
1	15 minut	Dioda bliká s frekvencí 5 Hz
2	1 hodina	Dioda bliká s frekvencí 2,5 Hz
3	4 hodiny	Dioda bliká s frekvencí 1,25 Hz
4	8 hodin	Dioda bliká s frekvencí 0,625 Hz

2.9 Optimalizace využití programové paměti

Jak bylo zmíněno v některých předcházející kapitolách, byl v průběhu finalizace programu zjištěn problém s nedostatkem programové paměti desky arduino Leonardo. Deska 32 KB programové paměti, z kterých 4 KB zabírá Bootloader pro programování desky pomocí USB, zbývá tedy 28KB využitelné programové paměti [14]. U první verze programu s využitím senzoru DHT22 zabíral program 29880 bytů tedy 104% programové paměti. Došlo tedy k nahrazení senzoru DHT22 druhým senzorem BME280, a změně datových typů některých proměnných. Tato změna snížila využití programové paměti na 28648 bytů, tedy 99% programové paměti. Další změnou provedenou pro snížení využití programové paměti byl způsob ukládání dat na kartu SD. Původně byl ze všech dat, které měly být uloženy na SD kartu, vytvořen řetězec, který byl následně na kartu zapsán pomocí funkce dataFile.print. Tento způsob zapsání byl nahrazen zapisováním jednotlivých měřených veličin po částech, což vedlo k úspoře programové paměti. Využití paměti po této úpravě bylo 27698 bytů, 96 %. Poslední úspora paměti je spojena s využitím knihovny SdFat namísto knihovny SD, k této změně ale došlo kvůli neuspokojivé funkci knihovny SD. Využití programové paměti po této změně je 27198 bytů, 94% programové paměti. Přehled změn a využití programové paměti je v tabulce č. 7.

Tabulka 7 Přehled úprav programu pro úsporu programové paměti

Úprava programu	Využití programové paměti [B]	Využití programové paměti v %
Původní využití paměti	29880	104
Náhrada DHT22 za BME280	28648	99
Změna způsobu ukládání dat	27698	96
Změna knihovny pro obsluhu SD karty	27208	94

Pro další úsporu programové paměti by bylo například možné odstranit nevyužívané funkce z jednotlivých využitých knihoven. Například funkce pro výpočet nadmořské výšky, výpočet indexu horka, funkce pro připojení pomocí SPI v knihovně pro obsluhu BME280 a jiné. Bylo rozhodnuto že tyto úpravy není nutné provádět, protože došlo k implementaci všech požadovaných funkcí programu a již provedenými úpravami bylo docíleno dostatečné úspory paměti, aby program mohl být nahrán na desku arduino.

3 KONTROLNÍ MĚŘENÍ

3.1 Kontrolní měření teploty, relativní vlhkosti a atmosférického tlaku

Pro ověření správnost údajů získaných pomocí měřicí soustavy bylo provedeno kontrolní měření a porovnání těchto údajů s referenčními hodnotami změřenými pomocí zvolených měřících přístrojů. Vzhledem k zamýšlenému užití měřicí soustavy pro diagnostiku vcelého díla, tedy požadavku běžné přesnosti měření meteorologický údajů, byl jako vhodný referenční přístroj pro měření teploty a relativní vlhkosti byl zvolen digitální multimetr RC DT-61 a jako reference atmosférického tlaku byl zvolen mobilní telefon, využívající senzor LPS25H od společnosti STMicroelectronics. Pro měření důležité parametry obou přístrojů jsou uvedeny v tabulce č. 8.

Tabulka 8 Parametry referenčních přístrojů údaje převzaty z [28] a [29]

Senzor tlaku LPS25H	
Přesnost měření tlaku – T=25°C	±0,1 hPa
Digitální multimetr RC DT-61	
Přesnost měření teploty	±3% rdg ±5 dgts
Přesnost měření relativní vlhkosti	±3% rdg ±5 dgts

Byla provedena 4 různá měření každé se 3 opakováními. Výsledky těchto měření jsou uvedeny v tabulce 9. Pomocí změřených hodnot byl pro jednotlivá měření stanoveny průměrné absolutní odchylky proti referenčním veličinám a vzájemná odchylka obou užitých senzorů měřícího systému. Tyto údaje jsou uvedeny v tabulce 10, kdy hodnoty s indexem 1 představují rozdíl referenční hodnoty a údaje získaného BME1, hodnoty s indexem 2 představují rozdíl referenční hodnoty a údaje získaného BME1 a hodnoty s indexem 3 rozdíl mezi naměřenými hodnotami BME1 a BME2.

Tabulka 9 Změřené hodnoty

Referenční měření			Měření BME1			Měření BME2		
T_r [°C]	RH_r [%]	p_r [Pa]	T_1 [°C]	RH_1 [%]	p_1 [Pa]	T_2 [°C]	RH_2 [%]	p_2 [Pa]
Měření 1								
23,5	51	96985	22,85	45,32	97318	23,52	52,89	97412
23,6	51	96988	22,91	44,71	97308	23,58	52,22	97415
23,6	52	96983	23,00	44,83	97318	23,67	52,05	97410
Měření 2								
24,3	51	96977	24,28	43,83	97311	25,27	50,77	97396
24,4	51	96982	24,29	44,00	97308	25,27	50,44	97394
24,3	51	96976	24,32	43,81	97312	25,27	50,08	97399
Měření 3								
24,5	51	96972	24,36	44,79	97310	24,42	52,15	97401
24,5	51	96967	23,84	45,84	97313	24,25	52,03	97401
24,5	51	96963	23,76	45,64	97312	24,32	52,11	97403

Měření 4								
25,5	80	96960	23,73	76,62	97304	24,80	79,19	97396
25,0	78	96959	23,90	75,75	97312	24,97	80,04	97394
24,5	77	96962	23,97	72,83	97304	24,97	75,38	97394

Tabulka 10 Průměrné odchylky

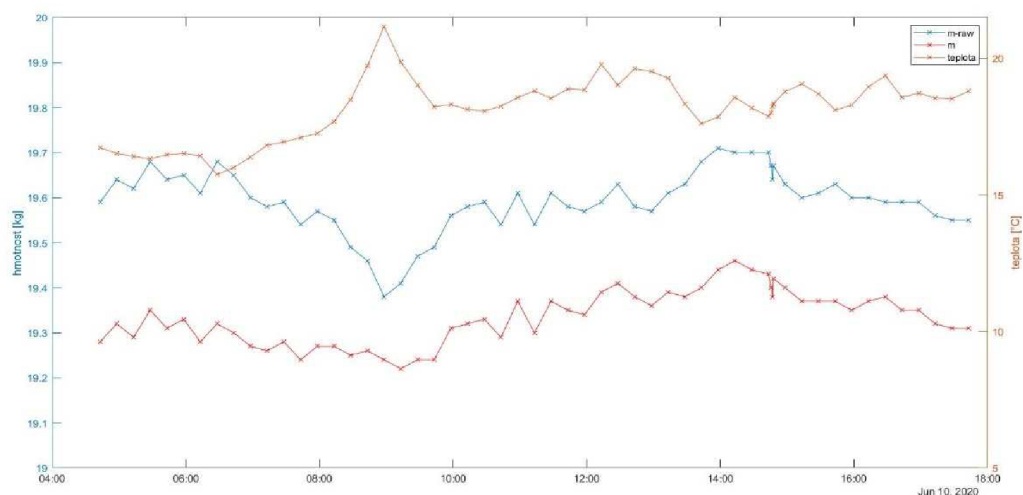
	ΔT_1 [°C]	ΔRH_1 [%]	Δp_1 [Pa]	ΔT_2 [°C]	ΔRH_2 [%]	Δp_2 [Pa]	ΔT_3 [°C]	ΔRH_3 [%]	Δp_3 [Pa]
Měření 1	0,65	2,05	329,33	0,04	1,05	427,00	0,67	7,43	97,67
Měření 2	0,27	2,79	332,00	0,05	0,57	418,00	0,97	6,55	86,00
Měření 3	0,51	2,58	345,00	0,17	1,10	435,00	0,34	6,67	90,00
Měření 4	1,13	3,27	364,33	0,40	1,49	434,33	1,05	3,14	88,00
průměr	0,64	2,76	338,17	0,16	2,05	428,58	0,57	5,95	90,42

Z výsledků měření je vidět že, údaje o teplotě a relativní vlhkosti získané měřicí soustavou můžeme s uvážením chyby měření udávanou výrobcem senzorů BME280 a chybou měření referenčních přístrojů považovat za správnou. V případě atmosférického tlaku vykazuje měřicí soustava větší odchylku od referenčních hodnot. Z výsledků měření je vidět že, odchylky tlaků jednotlivých měření od referenční hodnoty představují téměř konstantní hodnoty, a proto je tuto chybu možné odstranit softwarovou korekcí.

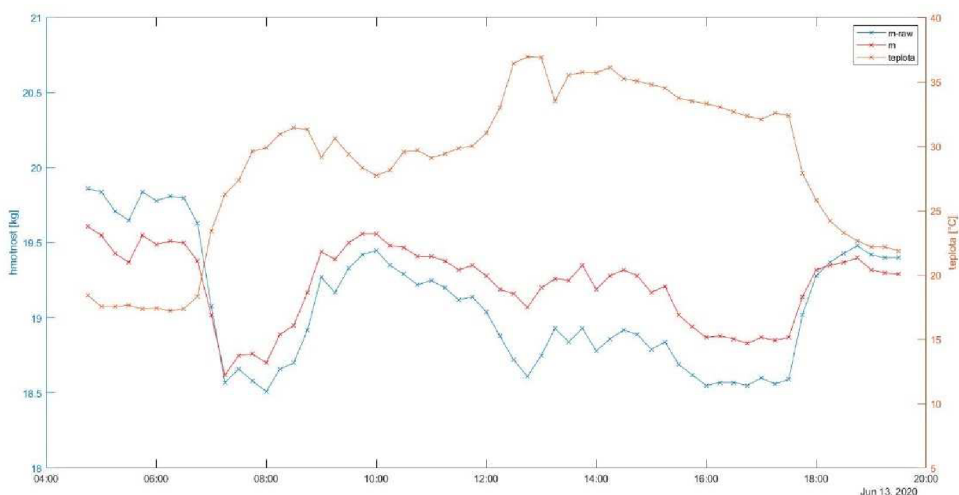
3.2 Kontrolní měření hmotnosti

Pro ověření správnosti měření hmotnosti bylo provedeno kontrolní měření, při proměnné teplotě vlivem počasí, se závažím o známé hmotnosti 19,285 kg určené s přesností na 10 g pomocí kalibrované skladové váhy LESAK 1T4530LN.

Ze získaných dat z prvního měření zobrazených v obrázku č. 35 je vidět závislost teplotně nekompensované hmotnosti *m-raw* na teplotě, dále je vidět tepelně kompenzovaná hmotnost *m*, u které je vidět alespoň částečné odstranění výkyvů měřené hmotnosti při výkyvech teploty a posunutí hodnoty naměřené hmotnosti. Z důvodu malých teplotních rozdílů v průběhu dne při měření bylo provedeno další měření v jiný den. Výsledky tohoto měření jsou zobrazeny v obrázku č. 36.



Obr. 35 Kontrolní měření hmotnosti 1



Obr. 36 Kontrolní měření hmotnosti 2

Na základě naměřených dat z byly pro obě měření stanoveny průměrné hodnoty tepelně nekompensované hmotnosti a tepelně kompenzované hmotnosti a jejich směrodatné odchylky, uvedené v tabulce č. 11.

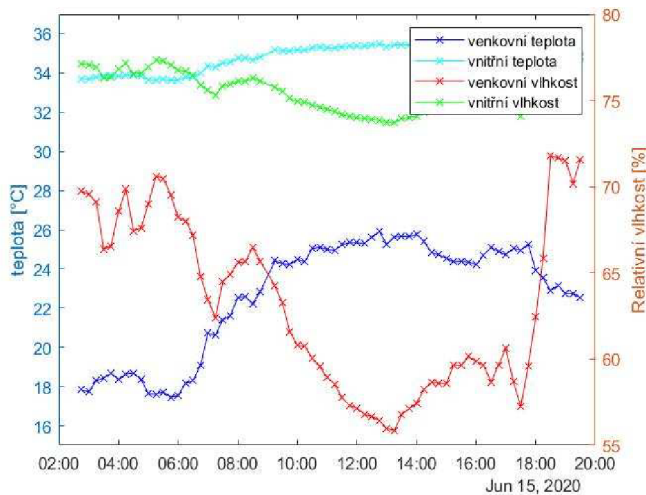
Tabulka 11 Výsledky měření hmotnosti

Měření 1	
Tepelně nekompensovaná hmotnost	(19,60 ± 0,07) kg
Tepelně kompenzovaná hmotnost	(19,34 ± 0,06) kg
Měření 2	
Tepelně nekompensovaná hmotnost	(19,1 ± 0,4) kg
Tepelně kompenzovaná hmotnost	(19,22 ± 0,25) kg

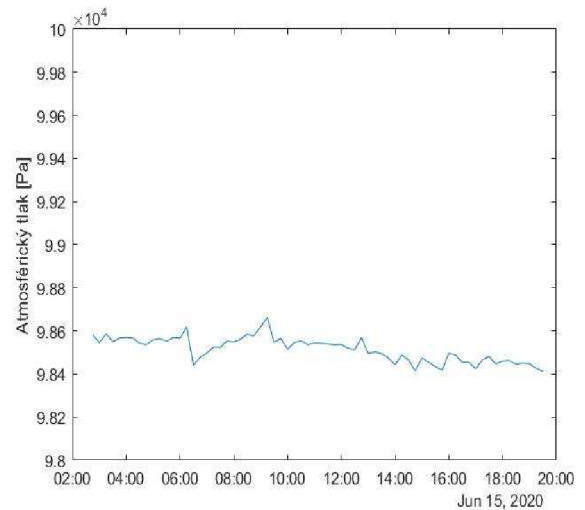
Z výsledků měření vyplývá, že provedená teplotní kompenzace dokáže zvýšit přesnost měření, zvláště v případě že během měření dochází k větším teplotním změnám. Z výsledků prvního měření je vidět poměrně malá odchylka měření kompenzované hmotnosti, ta je způsobena malými teplotními změnami v průběhu měření. Druhé měření proběhlo v den s většími rozdíly teplot a získaná odchylka měření tedy spíše odpovídá realitě. Dále je vidět že díky teplotní kompenzaci dochází k posunu hodnoty naměřené hmotnosti směrem k reálné hmotnosti závaží. Pro obě měření leží skutečná hodnota hmotnosti závaží v intervalech změřené hmotnosti získaných měřicí soustavou. Hmotnost získanou pomocí měřicí soustavy můžeme tedy považovat za správnou. Vzhledem k zamýšlenému užití měřicí soustavy pro diagnostiku včelího díla považujeme přesnost měřicí soustavy za dostatečnou.

3.3 Měření na včelím úlu

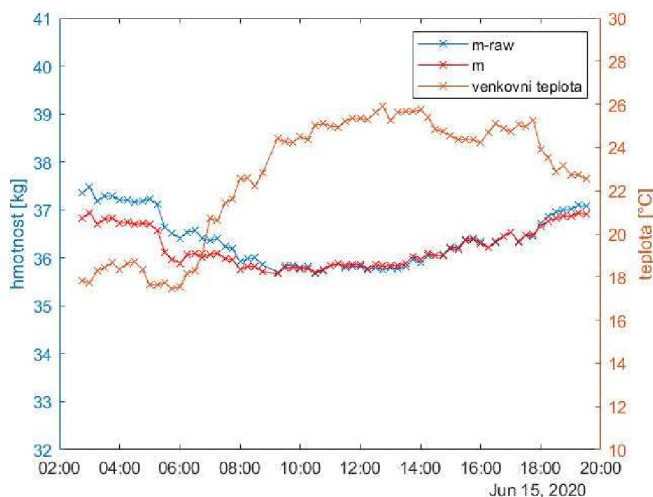
Kompletní měřicí systém byl instalován na včelí úl a bylo provedeno testovací měření pro ověření funkce systému při využití ve skutečné situaci. Jeden ze senzorů BME280 byl umístěn mezi plástve blízko středu úlu. Výsledky měření jsou znázorněny na obrázcích 37–39



Obr. 37 Teploty a vlhkosti při měření na včelím úle



Obr. 38 Atmosférický tlak při měření na včelím úle



Obr. 39 Průběh hmotnosti při měření na včelím úle



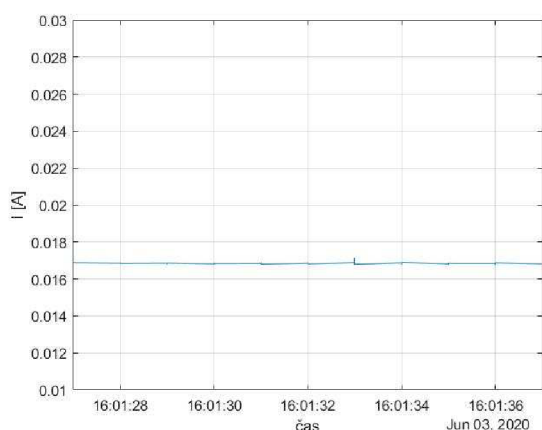
Obr. 40 Měřicí soustava instalovaná na úle

Na obrázku 37 můžeme poměrně dobře vidět schopnost včelstva udržovat velice stabilní klimatické podmínky uvnitř včelího úlu, dále na obrázku 39 můžeme vidět průběhy nekompensované naměřené hmotnosti m-raw a teplotně kompenzované hmotnosti m. Z výsledků měření je zajímavý zejména pokles hmotnosti úlu v ranních hodinách a následný nárůst hmotnosti úlu v průběhu dne na hmotnost blízkou hodnotě před tímto poklesem. Tento pokles je totiž pravděpodobně způsoben vyletěním včelstva ven z úlu za účelem získání potravy.

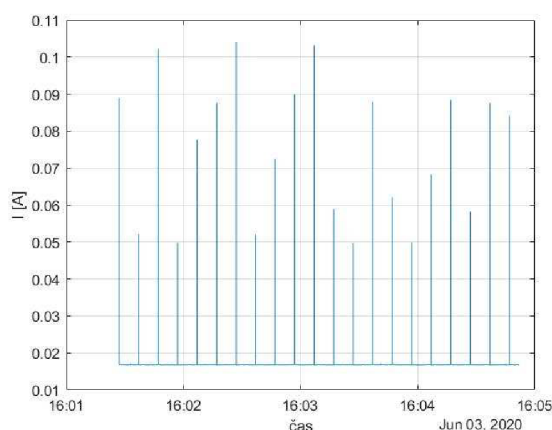
4 MĚŘENÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI A NÁVRH NAPÁJENÍ SYSTÉMU

4.1 Měření energetické náročnosti

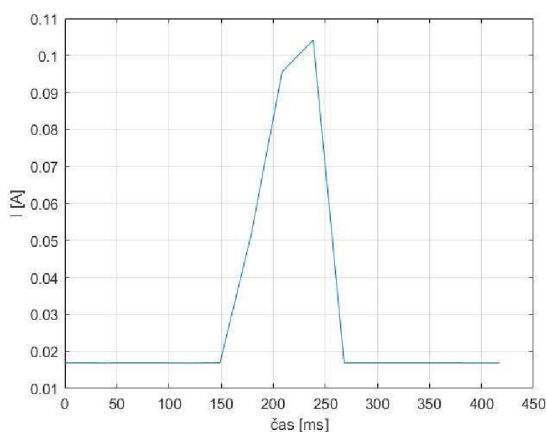
Vzhledem k faktu, že vytvořená měřicí systém je napájen konstantním napětím je možné určit energetickou náročnost systému měřením odebíraného proudu. Byla sestavena měřicí soustava sestávající ze zdroje konstantního napětí, voltmetru a stolního digitálního multimetru Keysight 34461A. Pomocí měřicí soustavy byly naměřeny hodnoty odebíraného proudu při režimu spánku, hodnoty odebíraného proudu při měření dat a jejich uložení na SD kartu a hodnoty odebíraného proudu při režimu výběru měřicího módu. Měření probíhalo při napájení měřené soustavy konstantním napětím 5,07 V.



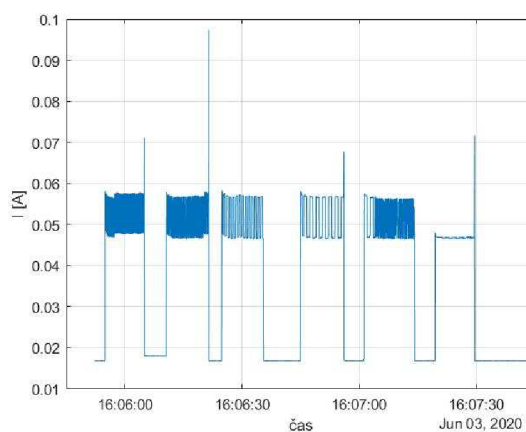
Obr. 41 Průběh odebíraného proudu během režim spánku



Obr. 42 Průběh odebíraného proudu během měření



Obr. 43 Detail průběhu odebíraného proudu během měření a ukládání dat



Obr. 44 Průběh odebíraného proudu při volbě režimu měření

Na obrázku 42. můžeme vidět různé hodnoty odebíraného proudu při měření a ukládání dat. Tento výsledek měření je pravděpodobně způsoben nedostatečnou vzorkovací frekvencí při měření odebíraného proudu. Ze stejného důvodu je detail odebíraného proudu při měření a ukládání zobrazený na obrázku 43 spíše orientační. Pro výpočet energetické náročnosti systému bude proto uvažována nejhorší možná varianta, budeme tedy předpokládat, že

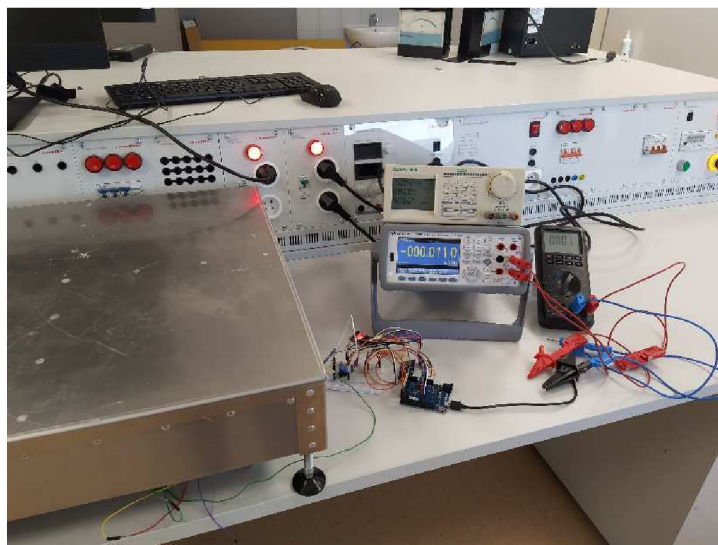
odebíraný proud při měření a ukládání dat má obdélníkový průběh, o velikosti maximální hodnoty proudu naměřeného pulsu a délku trvání tohoto pulsu. Naměřená délka trvání pulsu je 119,2 ms.

Na obrázku 44 vidíme průběhy proudu při volbě režimu měření. Je vidět vliv frekvence blikání indikační LED diody. Zvolené módu jsou řazeny zleva mód 0–5, poslední průběh je při odpojené indikační diodě.

Hodnoty získané z měření jsou uvedeny v tabulce č. 12.

Tabulka 12 Hodnoty odebíraného proudu

Průměrný odebíraný proud při režimu spánku	16,89 mA
Maximální hodnota proudu při měření a ukládání dat	104,16 mA
Délka trvání pulsu při měření	119,2 ms
Průměrný odebíraný proud při volbě režimu měření – mód 0	51,82 mA
Průměrný odebíraný proud při volbě režimu měření – mód 1	52,13 mA
Průměrný odebíraný proud při volbě režimu měření – mód 2	52,14 mA
Průměrný odebíraný proud při volbě režimu měření – mód 3	52,30 mA
Průměrný odebíraný proud při volbě režimu měření – mód 4	51,91 mA
Průměrný odebíraný proud při volbě režimu měření – odpojená LED dioda	46,89 mA



Obr. 45 Soustava pro měření odebíraného proudu

Dále bylo provedeno měření průměrného odebíraného proudu jednotlivých součástí měřicího systému. Tyto hodnoty byly získány odečtením průměrné hodnoty odebíraného proudu s odpojenou zvolenou součástí při režimu spánku od průměrného odebíraného proudu při režimu spánku se zapojenými všemi součástmi, jsou uvedeny v tabulce č. 13. Proud odebíraný modulem RTC nebyl změřen z důvodu principu funkce systému – došlo k přerušení režimu spánku.

Tabulka 13 Proud odebíraný jednotlivými moduly při režimu spánku

Průměrný odebíraný proud soustavou váhy při režimu spánku	2,76 mA
Průměrný odebíraný proud oběma moduly BME280 při režimu spánku	0,42 mA
Průměrný odebíraný proud modulem čtečky SD karty při režimu spánku	1,73 mA

4.2 Výpočet energetické náročnosti systému

Jak bylo zmíněno dříve, díky napájení konstantním napětím dokážeme výkon $P(t)$ určit pomocí vztahu 9, kdy U je konstantní napájecí napětí ve V, $i(t)$ je proud v A. Spotřebovanou energii E potom vypočteme pomocí vztahu 11, kdy $P_{stř}$ je střední hodnoty výkonu a t_c je celková doba odběru energie a j je počet provedených intervalů měření.

$$P(t) = U \cdot i(t) \quad (9)$$

$$P_{stř} = \frac{\sum_{i=0}^j P(t)_i}{j} \quad (10)$$

$$E = P_{stř} \cdot t_c \quad (11)$$

Pomocí naměřených veličin byla podle uvedených vztahů vypočítána spotřebovaná elektrická energie měřicím systémem za 24 hodin při režimu spánku a energie spotřebovaná měřeními podle jednotlivých režimů měření. Energie spotřebovaná během režimu vypočítána a dále uvažována ve výpočtech, protože je předpokládáno užití měřicího systému k dlouhodobým měřením bez změn měřicího módu, a proto se nijak výrazně neprojeví na celkové spotřebě systému. Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 14.

Tabulka 14 Spotřeba energie systému během různých režimů

Spotřeba energie během režimu spánku za 24 h	2,0553 Wh
Spotřebovaná energie měřeními za 24 h – mód 1	1,69 mWh
Spotřebovaná energie měřeními za 24 h – mód 2	0,42 mWh
Spotřebovaná energie měřeními za 24 h – mód 3	0,10 mWh
Spotřebovaná energie měřeními za 24 h – mód 4	0,05 mWh

Celková energie spotřebovaná měřicím systémem za 24 hodin je potom součtem spotřebované energie během režimu spánku a spotřebované energie během měření.

$$E_{celk} = E_{sleep} + E_{mer} \quad (12)$$

Tabulka 15 Celková spotřeba energie systému

Celková spotřeba energie za 24 h – mód 0 ⁹	2,0553 Wh
Celková spotřeba energie za 24 h – mód 1 ¹⁰	2,0570 Wh
Celková spotřeba energie za 24 h – mód 2 ¹¹	2,0557 Wh
Celková spotřeba energie za 24 h – mód 3 ¹²	2,0554 Wh
Celková spotřeba energie za 24 h – mód 4 ¹³	2,0553 Wh

⁹ Trvalý režim spánku

¹⁰ Měření každých 15 minut

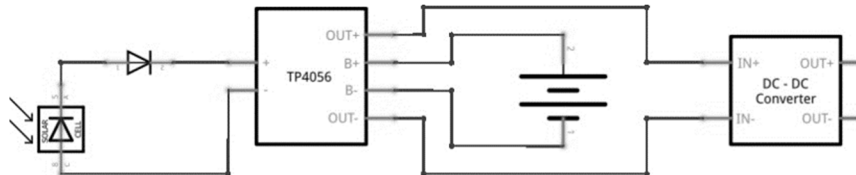
¹¹ Měření každou hodinu

¹² Měření každé 4 hodiny

¹³ Měření každých 8 hodin

4.3 Návrh napájení měřícího systému

Vzhledem k tomu, že měřící systém je určen k dlouhodobému měření na včelím díle je nutné vytvořit napájecí systém schopný dodávat dostatek elektrické energie. Pro napájení měřícího systému byl rozhodnuto pro využití solárního panelu a akumulátoru. Bylo rozhodnuto ve prospěch využití lithium iontového akumulátoru typu 18605, jeho výhodou je poměrně vysoká kapacita jediného článku. Vzhledem k faktu že obvyklé nominální napětí lithium iontové baterie je 3,7 V je do napájecího systému nutné zařadit Step Up měnič, aby bylo možné napájet arduino vyžadující napětí 5 V. Dále pro bezpečné, nabíjení ze solárního panelu, do obvodu nutné zařadit nabíjecí modul jako například modul založený na čipu TP0456



Obr. 46 Schéma napájení systému

4.3.1 Návrh kapacity akumulátoru

Byl stanoven požadavek, aby měřící soustava byla schopná pracovat alespoň 1 týden napájená pouze z akumulátorů. Při návrhu kapacity baterie je vhodné kromě spotřeby napájeného systému zohlednit i samovybíjení baterií. Typicky lithium iontové baterie ztrácí mezi 5–10 % své kapacity za měsíc [30]. Dalším faktorem, který je možné zohlednit je účinnost použitého měniče, tento faktor byl ale pro naše účely zanedbán.

Kapacita baterie bez vlivu samovybíjení je vypočítána pomocí vztahu 13, kdy pro spotřebu systému je uvažován mód měření 1.

$$Kapacita_{7d [Wh]} = 7 \cdot Spotřeba_{mod1,24h} = 7 \cdot 2,057 \doteq 14,4 \text{ Wh} \quad (13)$$

Kapacita akumulátorů se běžně udává v jednotce mAh, proto byl proveden přepočítání dle vztahu 14.

$$Kapacita_{7d [mAh]} = \frac{Kapacita_{7d [Wh]} \cdot 10^3}{U_{bat}} = \frac{14,4}{3,7} \cdot 10^3 \doteq 3891,9 \text{ mAh} \quad (14)$$

Pokud budeme uvažovat, že akumulátor ztratí 10 % své kapacity za měsíc, tedy přibližně 2,5% kapacity za týden, vypočítáme Kapacitu akumulátoru podle vztahu 15.

$$Kapacita_{7d,s [mAh]} = 1,025 \cdot Kapacita_{7d [mAh]} = 1,025 \cdot 3891,9 \doteq 3899,2 \text{ mAh} \quad (15)$$

Pro dosažení požadavku na dobu fungování měřícího systému napájeného pouze pomocí akumulátoru je tedy vhodné využít akumulátor o kapacitě alespoň 4000 mAh. Této kapacity může být jednoduše dosaženo paralelním zapojením 2 článků typu 18605.

4.3.2 Návrh výkonu solárního panelu

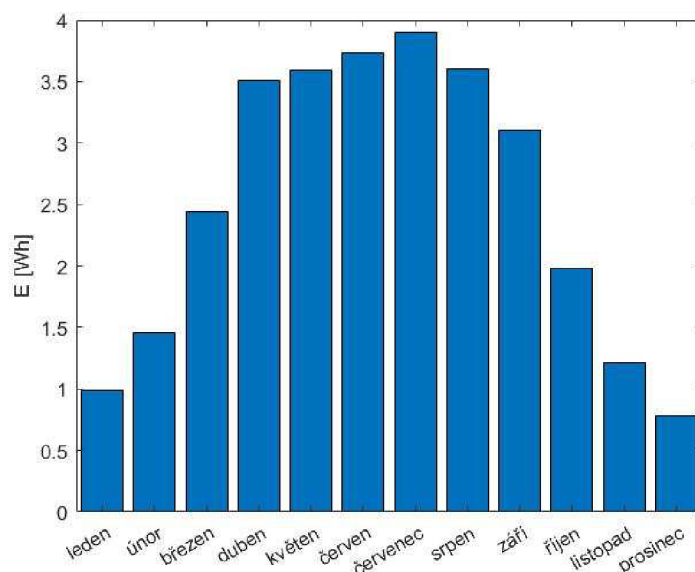
Výrobci solárních panelů obvykle udávají výkon panelu pomocí tzv. Watt Peaku, tedy hodnoty výkonu panelu při osvětlení panelu ideální intenzitou slunečního světla. Tento údaj však není reprezentativní o skutečné dodané elektrické energii dodané panelem. Výkon panelu totiž silně závisí na intenzitě slunečního svitu dopadajícího na panel. Ta je zejména závislá na počasí, geografické poloze, orientaci panelu a sklonu panelu. Proto bylo pro účely návrhu výkonu solárního panelu využito Fotovoltaického geografického informačního systému [31], který nabízí rozhraní pro výpočet množství elektrické energie dodané solárním panelem o

požadovaném výkonu, v závislosti na geografické poloze, kterou je možno zvolit na mapě, orientaci panelu i sklonu panelu.

Pomocí této služby tedy bylo určeno průměrné množství elektrické energie dodané za 1 den panelem o výkonu 1 Wp¹⁴ pro jednotlivé měsíce v roce., při panelu orientovaném na jih se sklonem 35°. Jako geografické umístění byl zvolen areál VUT FSI. Byla využita databáze slunečního záření PVGIS – SARAH. Tyto údaje jsou uvedeny v tabulce č. 16.

Tabulka 16 Množství elektrické energie dodané panelem o výkonu 1 Wp údaje převzaty z [31]

měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>E</i> [Wh]	0,99	1,46	2,44	3,51	3,59	3,73	3,90	3,60	3,11	1,98	1,21	0,78



Obr. 47 Množství dodané elektrické energie panelem o výkonu 1 Wp

Pokud je předpokládáno celoroční využití měřícího systému je nutné dimenzovat výkon solárního panelu podle měsíce s nejnižší průměrnou denní hodnotou dodané energie, tedy měsíc prosinec. Výpočet požadovaného výkonu *P* panelu vyjadřuje vztah 16.

$$P = \frac{Spotřeba_{mód1,24h}}{Dodaná\ energie_{1\ Wp,24h,prosinec}} = \frac{2,057}{0,78} \doteq 2,6\ Wp \quad (16)$$

Pro včelařské účely ale není celoroční využití měřícího systému zcela pravděpodobné. Měřící systéme bude využíván spíše v jarním a letním období, zejména období březen–září. Stejně jako při dimenzování výkonu při celoročním využití je nutné dimenzovat panel podle měsíce s nejnižší průměrnou denní hodnotou dodané energie z tohoto období, tedy měsíc březen. Výpočet požadovaného výkonu *P* panelu vyjadřuje vztah 17.

$$P = \frac{Spotřeba_{mód1,24h}}{Dodaná\ energie_{1\ Wp,24h,březen}} = \frac{2,057}{2,44} \doteq 0,84\ Wp \quad (17)$$

Do obou vypočítaných hodnot není započítán vliv samovybíjení baterie. Vzhledem k tomu že se běžně dostupné panely prodávají po jednotkách Wattů bylo by vhodné pro celoroční aplikaci užít panel o výkonu alespoň 3 Wp a pro aplikaci měřícího systému v období březen–září využít panelu o výkonu alespoň 1 Wp.

¹⁴ Watt Peak

5 ZÁVĚR

V prvních kapitolách této práce byla provedena stručná literární rešerše, popisující vybrané typy senzorů teploty, relativní vlhkosti, atmosférického tlaku a hmotnosti, a jejich základní fyzikální principy funkce spolu se stručným vysvětlením pojmu ostrovní zdroj energie, zejména pak popsání základních typů akumulátorů energie a funkce solárního panelu.

Hlavní část této práce tvoří návrh měřicího systému určeného pro diagnostiku včelího díla. Pomocí vývojové platformy Arduino byl vytvořen systém schopný měřit teplotu, relativní vlhkost a atmosférický tlak vně včelího díla, stejně jako teplotu a relativní vlhkost uvnitř úlu, spolu s měřením hmotnosti včelího díla. Návrh systému obsahuje vytvoření programu, realizaci zapojení jednotlivých komponent měřicího systému a návrh konstrukce váhy.

Následně bylo provedeno kontrolní měření porovnávající hodnoty získané pomocí měřicího systému s vhodnými etalony. Z výsledků měření vyplývá, že údaje o teplotě, relativní vlhkosti a atmosférickém tlaku můžeme s uvážením přesností uvedených výrobcem považovat za správné. Z kontrolního měření hmotnosti dále vyplývá správnost měření hmotnosti a pozitivní efekt teplotní kompenzace pro zvýšení přesnosti měření. Potom bylo realizováno měření na včelím úle, kdy byla ověřena funkčnost systému při měření všech požadovaných veličin při reálném využití systému.

Poslední část práce se zabývá zhodnocením energetické náročnosti měřicího systému. Na základě provedených měření byla vyhodnocena spotřeba energie systému a byl proveden návrh vhodného napájení systému, včetně návrhu kapacity akumulátoru a výkonu solárního panelu pro zabezpečení možnosti provozu zařízení i na odlehlých lokalitách.

Mezi možné zdokonalení měřicího systému patří zejména úpravy konstrukce váhy, například změna upevnění senzorů hmotnosti ke konstrukci nebo optimalizace rozměrů a hmotnosti konstrukce. Dále zdokonalení teplotní kompenzace váhy na základě provedení většího počtu experimentálních měření za účelem efektivnějšího popsání teplotní závislosti měřené hmotnosti a implementace systému pro dálkový přístup k naměřeným údajům.

BIBLIOGRAFIE

- [1] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN, 2005, 239 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] FRADEN, Jacobs. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. 3rd ed. New York: Springer-Verlag, 2004, xvii, 589 s. ISBN 0-387-00750-4.
- [3] VOJÁČEK, Antonín. Přehled principů el. měření teploty. In: *Automatizace.hw* [online]. 2014 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/prehled-principu-el-mereni-teploty-1-dil>
- [4] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, 315 s. ISBN 80-01-02057-6.
- [5] VOJÁČEK, Antonín. Odporové tenzometry: princip, provedení, použití, historie. In: *Automatizace.hw* [online]. 2014 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>
- [6] BEJČEK, Ludvík a Jan VACULÍK. Snímače Tlaku. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2011, **2011**(1), 20-23 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/42719.pdf
- [7] MAREŠ, Luděk. Vlhkost vzduchu a její měření. In: *Tzbinfo* [online]. ©2001-2020 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/3137-vlhkost-vzduchu-a-jeji-mereni>
- [8] BARTOŠ, Libor. SCHRACK: Ostrovní systém jako nezávislý zdroj elektrické energie. In: *Elektrika* [online]. [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/schrack-ostrovní-system-jako-nezavisly-zdroj-elektrické-energie>
- [9] KUSALA, Jaroslav. Solární energie. In: *Skupina Čez* [online]. [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/solar.htm>
- [10] Víte, co to je a jak funguje ostrovní systém?. In: *Proelektrotechniky* [online]. 2020 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/20.php>
- [11] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. : il. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [12] What is Arduino?. *Arduino.cc* [online]. 2020 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: arduino.cc/en/guide/introduction
- [13] VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina* [online]. Vydání druhé. Bučovice: Martin Stříž, 2017 [cit. 2020-06-08]. ISBN ISBN978-80-87106-93-8.
- [14] ArduinoBoardLeonardo. *Arduino.cc* [online]. 2020 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://www.arduino.cc/en/Main/Arduino_BoardLeonardo#:~:text=The%20Arduino%20Leonardo%20is%20a,header%2C%20and%20a%20reset%20button.

- [15] ATMEL CORPORATION. *ATmega16U4/32U4 - Complete Datasheet* [online]. 2015 [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7766-8-bit-AVR-ATmega16U4-32U4_Datasheet.pdf
- [16] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. *DS3231*. 2015 [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf>
- [17] CHRISTENSEN, Jack. *Arduino Library for Maxim Integrated DS3232 and DS3231 Real-Time Clocks* [online]. [cit. 14.6.2020]. Dostupné z: <https://github.com/JChristensen/DS3232RTC>
- [18] BOSCH SENSORTEC GMBH. *BME280 - Data sheet* [online]. Revision 1.6. 2018 [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BME280-DS002.pdf
- [19] Interface BME280 Temperature, Humidity & Pressure Sensor with Arduino. In: *Last Minute Engineers* [online]. 2020 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://lastminuteengineers.com/bme280-arduino-tutorial/>
- [20] Adafruit BME280. *Adafruit.com* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/adafruit-bme280-humidity-barometric-pressure-temperature-sensor-breakout/overview>
- [21] ADAFRUIT. *Arduino Library for BME280 sensors* [online]. [cit. 14.6.2020]. Dostupné z: https://github.com/adafruit/Adafruit_BME280_Library
- [22] ECLIPSE. *Váhový senzor 50 Kg* [online]. Verze 1.0. 2018 [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/docs/produkty/0/559/1516084661.pdf>
- [23] AVIA SEMICONDUCTOR. *HX711: 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf
- [24] *An Arduino library to interface the Avia Semiconductor HX711 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weight Scales*. [online]. [cit. 14.6.2020]. Dostupné z: <https://github.com/bogde/HX711>
- [25] OpenScale Applications and Hookup Guide. In: *SparkFun* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/openscale-applications-and-hookup-guide/all>
- [26] Send Receive SMS & Call with SIM800L GSM Module & Arduino. In: *Last Minute Engineers* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://lastminuteengineers.com/sim800l-gsm-module-arduino-tutorial/>
- [27] GREIMAN, Bill. *Arduino FAT16/FAT32 Library* [online]. [cit. 14.6.2020]. Dostupné z: <https://github.com/greiman/SdFat>
- [28] STMICROELECTRONICS. *MEMS pressure sensor* [online]. 2014 [cit. 14. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/file/0J761/LPS25H.pdf>
- [29] CEM. *INSTRUCTION MANUAL MULTI-TESTER* [online]. [cit. 14. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/orn.722-354.1.pdf>
- [30] KHAN, Kamrul, HOSSAIN, OBAYDULLAH a WADUD. PKL Electrochemical Cell and the Peukert's Law. *International Journal Of Advance Research And Innovative Ideas In Education* [online]. **2018**(4), 4219-4227 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/324792341_PKL_Electrochemical_Cell_and_the_Peukert's_Law

- [31] *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM* [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#TMY
- [32] [tenzometrický snímač s nosníkovým deformačním prvkem]. In: *Sparkfun.com* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://cdn.sparkfun.com//assets/parts/1/0/6/2/9/13329-01.jpg>
- [33] [tenzometrický snímač s deformačním prvkem ve tvaru E]. In: *Sparkfun.com* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://cdn.sparkfun.com//assets/parts/4/5/9/5/10245-01a.jpg>
- [34] [tenzometrický snímač s diskovým deformačním prvkem]. In: *Sparkfun.com* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://cdn.sparkfun.com//assets/parts/1/0/6/3/2/13332-01.jpg>
- [35] Řez snímačem tlaku s piezorezistivním čidlem a oddělovací membránou. In: *Automata: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2016 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://automa.cz/imagesold/a0305554.gif>
- [36] [Struktura odporového senzoru vlhkosti]. In: ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, s. 300. ISBN 80-01-02057-6.
- [37] [Struktura kapacitního senzoru vlhkosti]. In: ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, s. 301. ISBN 80-01-02057-6.
- [38] Uspořádání LiCl vlhkoměru. In: ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, s. 302. ISBN 80-01-02057-6.
- [39] Schéma struktury fotovoltaického článku z krystalického křemíku. In: *Tzbinfo* [online]. ©2001-2020 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://oze.tzbinfo.cz/docu/clanky/0117/011772o1.png>
- [40] [Rozložení pinů na desce arduino Leonardo]. In: *TheEngineeringProjects.com* [online]. 2020 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.theengineeringprojects.com/wp-content/uploads/2018/10/introduction-to-arduino-leonardo-2-2.png>
- [41] [Přehled režimů pro snížení spotřebu energie]. *ATmega16U4/32U4 - Complete Datasheet* [online]. 2015, s. 44 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-7766-8-bit-avr-atmega16u4-32u4_datasheet.pdf
- [42] Příklad zapouzdření platinového čidla Pt100. In: *Automatizace.hw* [online]. 2014 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://automatizace.hw.cz//files/styles/clanek-300/public/story_automat/10541/pt100_1.jpg
- [43] [Závislost napětí mezi bází a emitorem pro monokrystalické PN senzory]. In: *Automatizace.hw* [online]. 2014 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://automatizace.hw.cz//files/styles/full/public/story_automat/10541/be.jpg
- [44] Charakteristika různých typů dotykových odporových senzorů teploty. In: *Automatizace.hw* [online]. 2014 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://automatizace.hw.cz//files/styles/full/public/story_automat/10541/porov_dotyk.jpg

- [45] Základní provedení jednoho fóliového tenzometru. In: *Automatizace.hw* [online]. 2014 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://automatizace.hw.cz/files/styles/full/public/story_automat/11944/struktura.gif?itok=3KHH_JLi

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 příklad zapouzdření platinového čidla Pt100 [42]	12
Obr. 2 Závislost napětí mezi bází a emitorem pro monokrystalické PN senzory [43]	13
Obr. 3 charakteristika různých typů dotykových odporových senzorů teploty [44]	13
Obr. 4 Základní provedení jednoho fóliového tenzometru [45]	14
Obr. 5 tenzometrický snímač s nosníkovým deformačním prvkem [32]	15
Obr. 6 tenzometrický snímač s deformačním prvkem ve tvaru E [33]	15
Obr. 7 tenzometrický snímač s diskovým deformačním prvkem [34]	15
Obr. 8 Řez snímačem tlaku s Piezorezistivní čidlem a oddělovací membránou [35]	16
Obr. 9 Struktura odporového senzoru vlhkosti [36]	17
Obr. 10 Struktura kapacitního senzoru vlhkosti [37]	18
Obr. 11 Uspořádání LiCl vlhkoměru (upraveno) [38]	19
Obr. 12 Schéma struktury fotovoltaického článku z krystalického křemíku [39]	19
Obr. 13 Rozložení pinů na desce arduino Leonardo (upraveno) [40]	22
Obr. 14 Blokové schéma návrhu programu	23
Obr. 15 Přehled režimů pro snížení spotřebu energie [41]	24
Obr. 16 ukázka kódu aktivace režimu spánku	25
Obr. 17 příklad nastavení externího interruptu pomocí tlačítka	25
Obr. 18 příklad funkce probuzení z režimu spánku pomocí tlačítka	25
Obr. 19 Schéma zapojení tlačítka a LED diody	26
Obr. 20 Schéma zapojení RTC modulu DS3231	27
Obr. 21 Příklad nastavení času RTC modulu	28
Obr. 22 příklad funkce probuzení z režimu spánku pomocí RTC	28
Obr. 23 Srovnání senzorů DHT22 a BME280	29
Obr. 24 Schéma zapojení modulů se senzorem BME280	30
Obr. 25 příklad nastavení senzorů BME280	31
Obr. 26 Konstrukce váhy	32
Obr. 27 Schéma zapojení AD převodníku HX711 a zapojení váhových senzorů do Wheatstoneova můstku	33
Obr. 28 Vliv tečení za studena na měřenou hmotnost	34
Obr. 29 Soustava pro měření teplotní závislosti měřené hmotnosti	35
Obr. 30 Teplotní závislost měřené hmotnosti pro závaží o hmotnosti 13,51 kg	36
Obr. 31 Teplotní závislost měřené hmotnosti pro závaží o hmotnosti 18,86 kg	36
Obr. 32 Teplotní závislost měřené hmotnosti pro závaží o hmotnosti 13,51 kg přepočteno na 1 kg	36
Obr. 33 Teplotní závislost měřené hmotnosti pro závaží o hmotnosti 18,86 kg přepočteno na 1 kg	36
Obr. 34 Schéma zapojení čtečky mikro SD karet	37
Obr. 35 Kontrolní měření hmotnosti 1	41
Obr. 36 Kontrolní měření hmotnosti 2	42
Obr. 37 Teploty a vlhkosti při měření na včelím úle	43
Obr. 38 Atmosférický tlak při měření na včelím úle	43
Obr. 39 Průběh hmotnosti při měření na včelím úle	43
Obr. 40 Měřicí soustava instalovaná na úle	43
Obr. 41 Průběh odebíraného proudu během režimu spánku	44
Obr. 42 Průběh odebíraného proudu během měření	44
Obr. 43 Detail průběhu odebíraného proudu během měření a ukládání dat	44
Obr. 44 Průběh odebíraného proudu při volbě režimu měření	44
Obr. 45 Soustava pro měření odebíraného proudu	45

Obr. 46 Schéma napájení systému 47
Obr. 47 Množství dodané elektrické energie panelem o výkonu 1 Wp..... 48

SEZNAM TABULEK

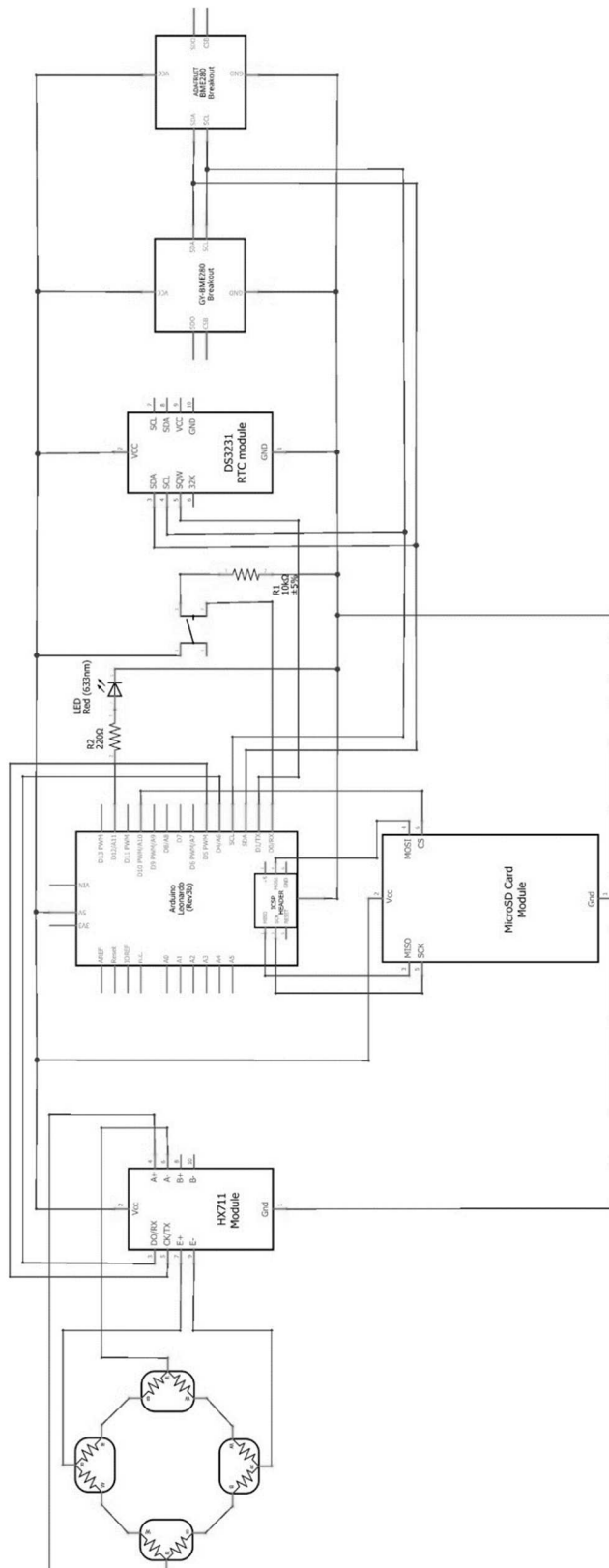
Tabulka 1 Parametry DS3231 údaje převzaty z [16].....	27
Tabulka 2 Parametry senzoru BME280 údaje převzaty z [17].....	30
Tabulka 3 Parametry váhového senzoru údaje převzaty z [20].....	33
Tabulka 4 parametry AD převodníku HX711 údaje převzaty z [21]	33
Tabulka 5 hodnoty směrníc teplotní závislosti	37
Tabulka 6 Módy měření	39
Tabulka 7 Přehled úprav programu pro úsporu programové paměti.....	39
Tabulka 8 Parametry referenčních přístrojů údaje převzaty z [24] a [25].....	40
Tabulka 9 Změřené hodnoty	40
Tabulka 10 Průměrné odchylky	41
Tabulka 11 Výsledky měření hmotnosti.....	42
Tabulka 12 Hodnoty odebíraného proudu	45
Tabulka 13 Proud odebíraný jednotlivými moduly při režimu spánku	46
Tabulka 14 Spotřeba energie systému během různých režimů	46
Tabulka 15 Celková spotřeba energie systému	46
Tabulka 16 Množství elektrické energie dodané panelem o výkonu 1 Wp údaje převzaty z [27]	48

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Kompletní schéma zapojení
Příloha 2 Fotografie konstrukce váhy 1
Příloha 3 Fotografie konstrukce váhy 2
Příloha 4 Fotografie zapojení měřicího systému
Příloha 5 Fotografie měření na včelím úlu
Program měřicího systému
Program pro kalibraci váhy
Výkresová dokumentace konstrukce váhy
Data z kontrolních měření

PŘÍLOHY

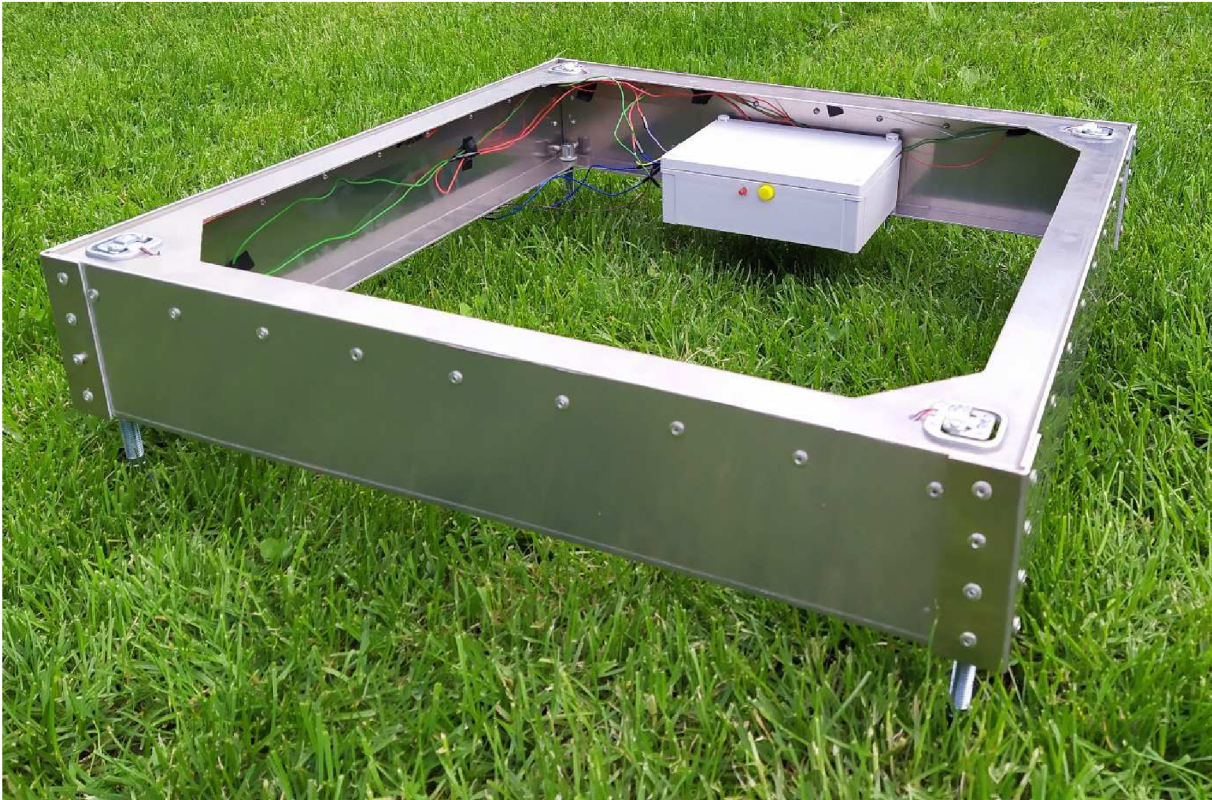
Příloha 1 Kompletní schéma zapojení



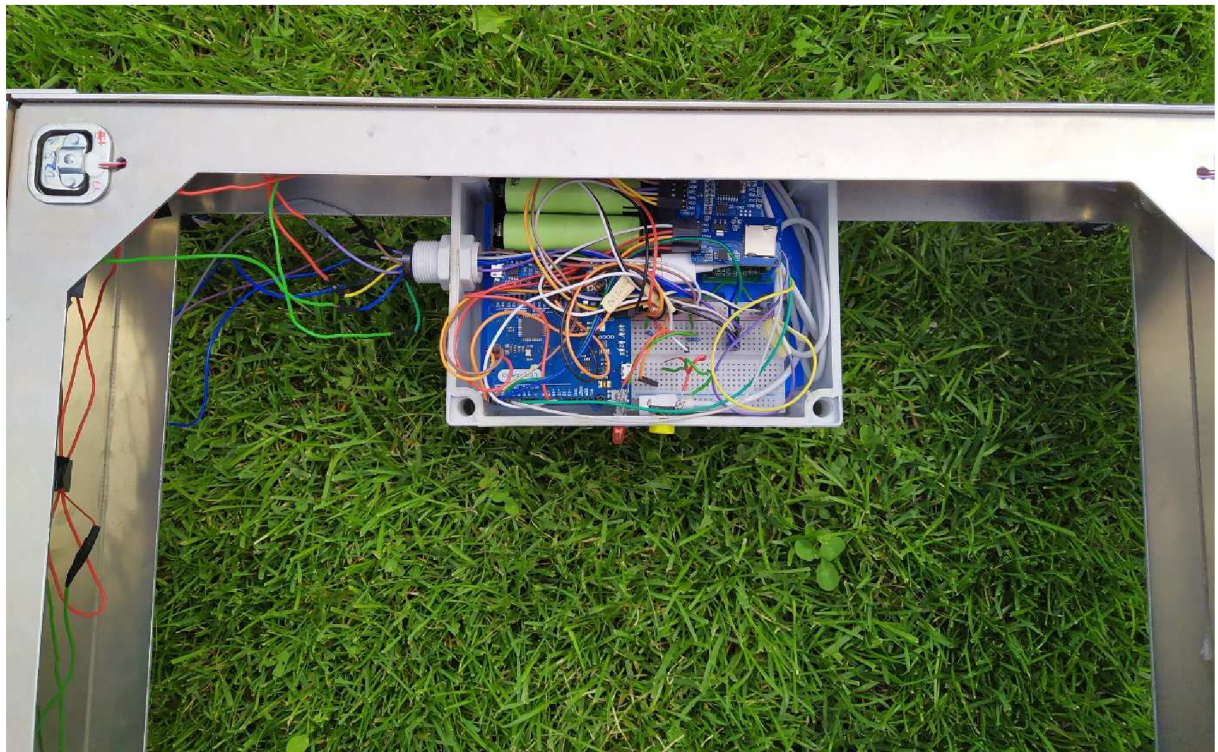
Příloha 2 Fotografie konstrukce váhy 1



Příloha 3 Fotografie konstrukce váhy 2



Příloha 4 Fotografie zapojení měřicího systému



Příloha 5 Fotografie měření na včelím úlu

