

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MONITOR VLHKOSTI TKANINY

CLOTH MOISTURE MONITOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Prokop

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Jan Prokop

ID: 195422

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Monitor vlhkosti tkaniny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte experimentální měřicí systém pro měření vlhkosti látky na základě měření vodivosti.

1. Proveďte literární a internetovou rešerši.
2. Navrhněte koncept měření vlhkosti látky vodivostním principem.
3. Navrhněte a elektronické obvody měřicího systému, navrhněte schéma zapojení a DPS elektroniky.
4. Navrhněte sadu experimentů pro otestování funkčnosti elektronických obvodů a zhodnoťte využitelnost pro měření vlhkosti látky vodivostním principem.
5. Vyhodnoťte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Pavel Herout: Učebnice jazyka C, KOPP, 2004, IV. přepracované vydání, ISBN 80-7232-220-6

Dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací zařízení pro monitoring vlhkosti tkanin. Jedná se o experimentální zařízení, které by mohlo v budoucnu sloužit k včasné detekci úniku moči u pacientů a dětí. Zařízení pracuje na principu měření vodivosti tkaniny. V teoretickém úvodu jsou probrané významné způsoby měření vlhkosti a porovnány z hlediska detekce vlhkosti tkaniny. Zpracování signálu je zajištěno mikrokontrolérem, který vlhkost zobrazuje na displayi a zvukově upozorní. Zařízení je schopno přesně měřit vlhkost a umožňuje nastavit úroveň vlhkosti na zvukové upozornění.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vlhkost, Měření, Odporová metoda, Tkanina

ABSTRACT

The aim of this thesis is design and construction of cloth moisture monitor. This is the experimental device, which should be used to real time detection of urine leakage of patient and children. Principle of this device is measuring conductivity of moistured cloth. In the theoretical introduction, important methods of moisture measurement are discussed and compared in terms of cloth moisture detection. Signal processing is provided by a microcontroller, which displays humidity on the display and alerts audibly. The device is able to accurately measure humidity and allows you to set the humidity level on an audible alert.

KEYWORDS

Moisture, Measurement, Resistivity method, Cloth

PROKOP, Jan. *Monitor vlhkosti tkaniny*. Brno, 2020, 56 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Monitor vlhkosti tkaniny“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno 8.6.2020

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Zdeňku Bradáčovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a cenné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	9
1 Základní pojmy	10
1.1 Vlhkost	10
1.1.1 Jednotky a definice	10
1.1.2 Vlhkost pevných látek	11
1.2 Textilní materiály	12
1.2.1 Vlastnosti textilních materiálů	13
1.3 Konduktometrie	15
1.3.1 Konduktivita	15
1.3.2 Měření konduktivity	15
2 Způsoby měření vlhkosti	17
2.1 Přímé metody měření	17
2.1.1 Gravimetrická metoda	17
2.1.2 Extrakce vody	18
2.2 Nepřímé metody měření	18
2.2.1 Karbidová metoda	18
2.2.2 Mikrovlnná metoda	18
2.2.3 Odporová metoda	19
2.2.4 Kapacitní metoda	20
2.2.5 Metoda nukleární magnetické rezonance (NMR)	21
2.2.6 Porovnání metod z hlediska použití v měření vlhkosti tkaniny	22
3 Návrh řešení	23
4 Obvod pro měření vlhkosti odporovou metodou	24
4.1 Blokové schéma měřícího obvodu	24
4.2 Oscilátor	24
4.2.1 Oscilátor s Wienovým článkem	25
4.3 Wheatstoneův můstek	26
4.4 Rozdílový zesilovač	27
4.5 Přesný usměrňovač	28
4.6 Dolní propust	29
4.7 Zpracování analogového signálu	29
4.8 Výstup	31
5 Senzor	32

6	Digitální zpracování	35
6.1	Hardwarová část	35
6.2	Softwarová část	36
7	Napájení	38
7.1	Napájení měřicího obvodu	38
7.2	Napájení arduina	39
8	Konstrukce	40
8.1	Modelování	40
8.2	Výroba a kompletace	40
9	Měření	41
9.1	Nastavení zařízení	41
9.2	Měření vlhkosti - minimální detekovatelný objem	41
9.3	Odolnost senzoru	42
9.4	Vyhodnocení měření	42
9.4.1	Nastavení zařízení	42
9.4.2	Minimální detekovaný objem	42
9.4.3	Odolnost senzoru	43
	Závěr	44
	Literatura	45
	Seznam příloh	48
A	Obvod pro měření vlhkosti	49
A.1	Schéma zapojení měřiče vlhkosti včetně zdroje	49
A.2	Deska plošných spojů - bottom	50
A.3	Osazovací schéma	50
A.4	Seznam použitých součástek	51
B	Konstrukce krabice	52
C	Obsah přiloženého CD	56

Seznam obrázků

1.1	Adsorpce molekul dusíku na wolframu [4]	12
1.2	Vybrané vlastnosti běžných textilů [11]	13
1.3	Kapilární elevace a deprese [5]	14
1.4	Úhel smáčivosti [2]	15
1.5	Dvouelektrodový snímač [7]	16
1.6	Čtyřelektrodový snímač [7]	16
2.1	Závislost vodivosti na koncentraci různých solí [24]	20
2.2	NMR senzor [22]	21
4.1	Wienův článek	25
4.2	Oscilátor s wienovým článkem	26
4.3	Wheatstoneův můstek	26
4.4	Diferenční zesilovač	27
4.5	Dvoucestný usměrňovač	28
4.6	Dolní propust	29
4.7	Obvod pro zpracování signálu	30
4.8	Převodní charakteristika pro obvod na úpravu signálu	31
5.1	První návrh senzoru	32
5.2	Tkanina H94 [23]	33
5.3	Druhý návrh senzoru	34
6.1	Schéma zapojení arduina	35
7.1	Schéma symetrického zdroje +-15V	38
A.1	Schéma zapojení obvodu pro měření vlhkosti	49
A.2	DPS obvodu pro měření vlhkosti	50
A.3	Osazovací plán obvodu pro měření vlhkosti	50
B.1	Model zařízení v programu Fusion360	52
B.2	Samotné zařízení	53
B.3	Senzor	54
B.4	Senzor v obalu	54
B.5	Měření vlhkosti	55

Úvod

Cílem této práce je navrhnout zařízení pro monitoring vlhkosti tkaniny. Zařízení bude schopno nepřetržitě měřit úroveň vlhkosti a upozornit na překročení jeho kritické hodnoty. Tuto hodnotu bude možné nastavit v procentuální škále, dle požadavků obsluhy. Zařízení bude nacházet uplatnění především u pacientů trpících enurézou, tedy nočním pomočováním či inkontinencí. Včasná detekce úniku umožňuje zvýšit komfort pacienta a hlavně snížit riziko infekčních onemocnění. Automatická detekce úniku moči usnadňuje personálu detekci a šetří čas, kdy nemusí osobně pacienta kontrolovat. Dále bude možné zařízení použít u dětí, které se ve vyšším věku stále pomočují. Zařízení je schopno dítě probudit a vytvořit tak návyk k probuzení při potřebě si dojít na toaletu. Současné metody detekce využívají senzor, který se musí upínat do spodního prádla. Tato metoda je činí nepohodlnými a zdlouhavými pro instalaci.

Práce je rozdělena do tří částí. V první části popisují základní definice vlhkosti, vlastností tkanin a měření vodivosti roztoků. Dále popisují způsoby měření vlhkosti pevných látek. Na základě jejich parametrů je porovnávám pro použití k měření vlhkosti tkanin a ověřuji zda-li je nejlepší volba vodivostní metoda.

V druhé části práce popisují samotný koncept měření vlhkosti. Zařízení se bude skládat ze samotného měřícího obvodu, mikrokontroléru a displeje pro zobrazení vlhkosti. Měřící obvod bude vyroben na desce plošných spojů a jeho výstup připojen do mikrokontroléru. Ten bude zajišťovat kalibraci a zobrazení naměřených hodnot pomocí displeje a tlačítka. Dále bude popsán princip a konstrukce samotného senzoru.

Poslední část práce se zabývá měřením a testováním zařízení. Měření patří mezi nejdůležitější části, protože ověřuje zda-li lze tento způsob měření využít. Testována bude funkčnost, odolnost a přesnost zařízení.

1 Základní pojmy

1.1 Vlhkost

Vlhkost je objem vody v objemu dané látky. Je to významným parametrem v mnoha vědeckých odvětvích. Jeho přítomnost může ovlivňovat mnoho průmyslových procesů. Především v elektrotechnice hraje důležitou roli v bezpečnosti, vlhkost je úměrná s vodivostí látek. Může být dvojího typu:

Vzdušná vlhkost

Patří mezi základní meteorologické vlastnosti vzduchu. Je to objem vodní páry v daném objemu vzduchu. Vzdušná vlhkost se vytváří především odparem z hladin vod (oceány, rybníky, rostlinstvo), nebo v menší míře sublimací a to především z ledu v zimním období.

Vlhkost pevných látek

Zde se voda rozprostírá v pevném materiálu. Je důležitá vzhledem ke změně fyzikálních vlastností materiálu. Vlhkost je schopna měnit váhu, objem, tvar, pevnost a především elektrickou vodivost. Přílišná vlhkost je schopna nenávratně poškodit daný materiál. Jeho měření je složitější, vzhledem k různorodosti látek. Metody, které jsou vhodné pro sypké materiály nejsou vhodné například pro tkaniny. [10]

1.1.1 Jednotky a definice

Vlhkost se udává pomocí řady jednotek. Pro plynné skupenství se nejčastěji udává absolutní nebo relativní vlhkost.

Absolutní vlhkost ϕ je definována jako podíl hmotnosti vodní páry a objemu plynu, podle vzorce:

$$\phi = m/V \quad [g * m^{-3}] \quad (1.1)$$

Kde $m[g]$ je hmotnost páry a $V[m^3]$ objem plynu

Relativní vlhkost φ je poměr mezi absolutní vlhkostí plynu a nasycenými párami za stejného tlaku a teploty. Je dána vztahem:

$$\varphi = \phi / \phi_{nas} * 100 \quad [\%] \quad (1.2)$$

Kde φ je absolutní vlhkost a φ_{nas} je plyn nasycený parami.

Vlhkost u pevných látek je nejčastěji uváděna jako hmotnost vody na hmotnost materiálu. Zde se musí rozlišovat zda se jedná o obsah vody ve vlhkém materiálu, nebo v suchém. Pro vlhký materiál platí absolutní vlhkost ω a pro suchý materiál relativní vlhkost ω_r dle vztahů:

$$\omega = m_v / m_v + m_s \quad [-] \quad (1.3)$$

$$\omega_r = m_v / m_s \quad [-] \quad (1.4)$$

kde m_v [kg] je hmotnost vody a m_s [kg] je hmotnost suchého materiálu. [6]

1.1.2 Vlhkost pevných látek

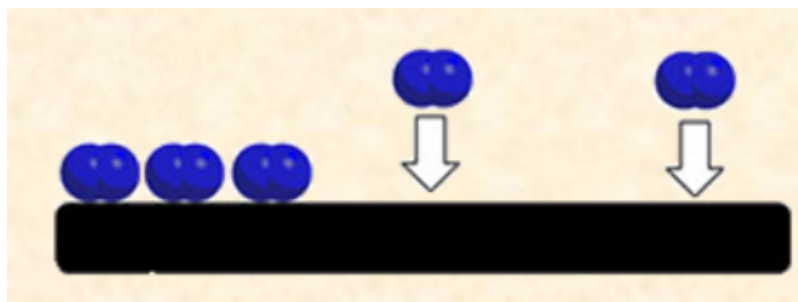
Vlhkost může být vázaná v materiálu adsorpcí, absorpcí a chemicky vázaná.

Adsorpce vlhkosti

Jedná se o jev, při kterém je kapalina na povrchu molekul materiálu a je vázaná buď jako fyzikální adsorpce, kde je držena slabými Van der Waalsovými silami, nebo chemisorpcí, viz dále. K adsorpci dochází i u plynných látek, čehož se s oblibou využívá například u aktivního uhlí k čištění vzduchu. [3]

Chemisorpce

Při chemisorpci dochází k reakci vody s materiálem a změnou jejich vlastností. Vytváří se chemické vazby a molekuly vody ztrácí identitu. Běžnými způsoby nelze z látek odstranit. Dochází k ní jen u specifických podmínek [9] [3]



Obr. 1.1: Adsorpce molekul dusíku na wolframu [4]

Absorpce vlhkosti

Dochází zde k pohlcení vlhkosti uvnitř materiálu. Na rozdíl od adsorpce zde nedochází k ulpnutí na molekulu, ale pouze molekuly vody se dostanou do struktury látky. Odstranění vlhkosti je tedy snadnější.

1.2 Textilní materiály

Textil jsou výrobky vyrobené z textilních vláken. Vlákna mohou být různého typu. Nejběžnější rozdělení je na textilní vlákna syntetické a přírodní. Pro přehlednost jsou uvedeny nejčastěji používané textilní materiály. Mezi ně řadíme:

Přírodní

Bavlna - Nejběžnější přírodní materiál na výrobu textilu. Donedávna patřila mezi nejvíce vyráběné textily s nástupem syntetických vláken její výroba ustává. Bavlna je sklízená z keře bavlníku a je složena především z celulózy.

Vlna - Jedná se o zvířecí srst. Nejčastěji se používá ovčí vlna či vlna z lamy. Je vyhledávaná pro její dobré izolační vlastnosti.

Hedvábí - Vyrábí se z kokonů larvy bource morušového. Patří mezi nejjemnější textilní materiály.

Syntetické

Polyester (PES) - Nejpoužívanější materiál pro výrobu textilu. Lépe odolává slunci a teplotě než polyamidové vlákna. Stejně jako u polyamidu má nízkou navlhavost.

Polyamid (PA) - Druhý nejčastější syntetický materiál. Má dobrou mechanickou odolnost a vysokou pružnost. Mezi nevýhody patří především nízká teplotní odolnost a nízká navlhavost.

Akryl - Třetí nejpoužívanější syntetický materiál. Oproti předešlým syntetickým materiálům je nejpříjemnější na omak. Mezi další výhody patří nízká cena. Stejně jako u polyamidu a polyesteru nevýhodou je nízká navlhavost.[11]

1.2.1 Vlastnosti textilních materiálů

Na textilní látky je kladeno spousta požadavků. Tyto požadavky by se daly rozdělit do několika základních typů. Mezi ně patří fyzikální vlastnosti, jako je například odolnost vůči oděru, teplotní stabilita, atd. Dále je to funkční komfort, který se dělí na fyziologický (pocit pohodlí), sensorický (příjemný na omak) a patofyzický (alergie) a v neposlední řadě bezpečnost, například odolnost vůči ohni.

Nás především zajímají fyzikální vlastnosti z hlediska styku s vodou. Různé materiály jsou schopny různě reagovat na přítomnost vody. Některé látky ochotně pohlcují vlhkost, jiné ji odpuzují, čehož se využívá u nepromokavých textilií.

Vlastnost	bavlna	vlna	př. hedvábí	viskóza	triacetát	PA 6	PA 6.6	PES	PP
pevnost suchá [cN/dtex]	3–4,9	1–2	3,3–4,5	1,6–2,5	1,2–1,5	4–5	4–5	3,7–4,5	2,5
pevnost mokrá [%] ²⁾	100–110	78–90	80	50–60	60–70	85–90	80–90	100	100
pevnost ve smyčce [%] ²⁾	70	80	85–90	30–65	38–46	75–85	75–85	80	53
pevnost v uzlu [%] ²⁾	91	85	88	45–60	95	80	80	80–85	–
tažnost suchá [%]	3–10	20–40	13–25	15–30	25–30	24–32	25–40	45–73	35
tažnost za mokra [%]	11	25–60	25–30	20–40	30–38	28–37	30–50	50–70	44
modul pružnosti [cN/dtex]	42–82	24–34	63	54	41	10–50	10–50	90–100	45
měrná hmotnost [kg/m ³]	1530	1320	1340	1520	1320	1140	1140	1380	980
koefficient tření	0,45	0,24	0,26	0,19	0,29	0,16	0,16	0,58	–
vlhkost při 65% RH [%]	8,5	14	10	13	6,5	4,5	4,1	0,5	0,5
smáčecí teplo [J/g]	11	114	70	05	8,2	30	31	5,6	–
tepelná vodivost ^{4,5)} [mWm ⁻¹ K ⁻¹]	71	54	50	60	230	240	250	140	120

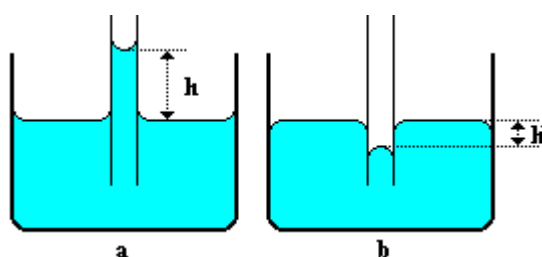
Obr. 1.2: Vybrané vlastnosti běžných textilií [11]

Hygroskopičnost

Taktéž navlhavost, je schopnost látky přijímat vlhkost a udržet ji. Je ovlivněna teplotou a tlakem okolního prostředí. Po čase dojde k vyrovnání vlhkosti prostředí a látky. Udává se v procentech, kde je dána jako poměr hmotnosti suchého materiálu ve vlhkém prostředí ku váze vlhkého materiálu. Dále je hygroskopičnost ovlivněna tloušťkou materiálu a složením vláken. Vláknina bavlny jsou například více hygroskopická než vlákna polyesteru.

Vzlínavost

Vzlínavost nebo také kapilarita je schopnost látky nasávat kapalinu pomocí kapilárních sil. Tuto schopnost využívají například rostliny pro transport vody po rostlině. Kapilární síla je schopna působit i proti směru gravitace. Vzlínavost je nežádoucí například u zdí budov, kde se vlhkost může dostat do celého prostoru. Kapilarita se dělí na elevační a depresivní. Elevační způsobuje, že hladina kapaliny uvnitř ponořené trubice je výš než hladina okolní kapaliny. Naproti tomu depresivní způsobuje, že hladina kapaliny uvnitř trubice je níž než okolní kapaliny. [5]



Obr. 1.3: Kapilární elevace a deprese [5]

Smáčivost

Smáčivost je schopnost kapaliny přilnout k povrchu pevného tělesa. Je dána adhezivními a kohezivními silami, neboli přitažlivými a odpuzivými silami. U smáčivosti se měří takzvaný kontaktní úhel, což je úhel mezi smáčenou látkou a kapalinou. Smáčivost je důležitá například u lepidel, které by měly vykazovat vysokou smáčivost. Pro zvýšení smáčivosti kapalných látek se přidávají smáčedla, například do hasících přístrojů využívajících jako hasivo vody se přidává smáčedlo, protože voda má velké povrchové napětí a vytváří velké kapky, které špatně hasí.[1]



Obr. 1.4: Úhel smáčivosti [2]

1.3 Konduktometrie

Konduktometrie je vědecká disciplína zabývající se měřením vodivosti roztoků. Vodivost je ovlivněna množstvím rozpuštěných látek v roztoku. V praxi se využívá například pro měření salinity vody nebo její čistoty. Dále lze využít pro detekci různých kapalin v potrubí (voda, kyselina, čisticí prostředek). [8]

1.3.1 Konduktivita

Konduktivita je měrná vodivost materiálu. Po vložení elektrod do roztoku a přivedení napětí se začnou ionty rozpuštěných látek pohybovat k elektrodám a vést proud. Velikost proudu je úměrná nasycením roztoku.

Konduktivita je dána vzorcem:

$$\kappa = \frac{I}{U} * \frac{l}{A} = G * k \quad [S/cm] \quad (1.5)$$

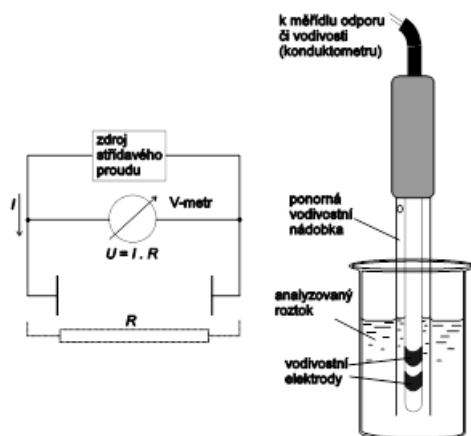
Značí se písmenem κ , kde je $I[A]$ proud procházející roztokem, $U[V]$ napětí na elektrodách, $l[cm]$ vzdálenost mezi elektrodami, $A[cm^2]$ plocha elektrod, $G[S]$ elektrická vodivost a $k[cm^{-1}]$ konstanta snímače. [7] [8]

1.3.2 Měření konduktivity

Při použití stejnosměrného napětí je vlivem polarizace, která vzniká vylučováním iontů z elektrod, skokově zvýšená impedance. Dále při polarizaci uvolněné ionty reagují s látkami v roztoku, vytvářejí sloučeniny a mění vodivost kapaliny. Proto je nutné polarizační jev potlačit. K potlačení se používá střídavé napětí, kde se zvyšujícím kmitočtem se zmenšuje počet vyloučených iontů. [7]

Dvouelektrokový snímač

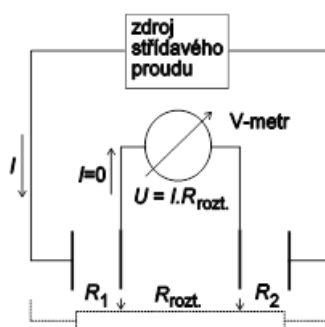
Jedná se o nejjednodušší princip. Pro potlačení rušivého vlivu se používá střídavé napětí. Zvyšování kmitočtu je omezeno dielektrickými vlastnostmi roztoku, zvyšováním frekvence se víc projevuje parazitní kapacita.



Obr. 1.5: Dvouelektrokový snímač [7]

Čtyřelektrokový snímač

Snímač je tvořen dvěma páry elektrod, kde dvě jsou proudové a dvě pro měření napětí. Proudovými elektrodami prochází proud a dvěma zbývajících se měří napětí. Tímto principem je výrazně snížen vliv polarizačního jevu.



Obr. 1.6: Čtyřelektrokový snímač [7]

R_1 a R_2 jsou parazitní odpory vzniklé například oxidací elektrod.

2 Způsoby měření vlhkosti

Pro měření vlhkosti je vypracována spousta metod, a to především z důvodu mnoha anomálních vlastností u vody. Její vlastnosti se značně mění v kapalně i plynné fázi. Dále se voda chová jinak rozpuštěná v pevných či kapalných látkách. Měřicí metody dělíme především na absolutní, kdy zjišťujeme obsah vody po odstranění z materiálu nebo relativní, kde zjišťujeme obsah vody měřením jiné závislé veličiny (permitivity, vodivosti, absorpce záření atd.). Nepřímé metody dále obsahují měření, kde se například z pevných či kapalných látek odpařuje voda, a ta se měří v plynném skupenství. V některých publikacích jsou uváděny jako nepřímé. Dále se budu zabývat pouze měřením vlhkosti v pevných látkách. [6]

2.1 Přímé metody měření

Přímé metody měření jsou založené na zjišťování skutečného obsahu vody v látce. Dochází zde k odstranění veškeré kapaliny z materiálu a její zvažení. Přímé metody jsou zpravidla destruktivní, protože zejména ve stavebnictví se musí odebrat vzorek. Měření je zdoluhavé, finančně náročné a jeho opakovatelnost je problematická. Tyto metody ovšem patří mezi nejpřesnější a jako jediné uvádějí skutečný obsah vody. [12]

2.1.1 Gravimetrická metoda

Gravimetrická metoda patří mezi základní metody přímého měření. Tato metoda je takzvaně normová, tedy je v souladu s normou (ČSN 74 4505 Podlahy). Tato norma se zabývá podlahovými konstrukcemi. Zde je patrné, že gravimetrická metoda hraje významnou roli především ve stavebnictví.

Metoda je založena na měření váhy vzorku materiálu. Nejprve se zváží hmotnost vlhkého vzorku, vysuší se a následně se zváží suchý vzorek. Rozdíl hmotností před a po sušení nám udává hmotnost odpařené vody. Rychlost sušení lze ovlivnit zvýšením teploty a snížením tlaku. Teplota sušení se pohybuje okolo 100 °C, pro citlivější materiály je nutné teplotu snížit. [12] [6]

Tato metoda má mnoho úskalí, především náročnost s manipulací vzorku, kde při vyjmutí vzorku ze sušárny dochází opět k absorbování vlhkosti z okolí. Existují automatické měřicí zařízení, které vzorek zváží, vysuší a opět zváží bez nutnosti operace. Jedná se o metodu, která se používá především v laboratorních zařízeních. [6]

2.1.2 Extrakce vody

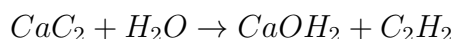
Extrakce vody využívá chemických reakcí vody. Existuje spousta metod, při kterých se voda váže na látky. Mohou to být metody využívající rozpustnost vody v rozpouštědlech, kde dochází k vytlačení vody z pórů materiálů. Měří se zde změna hustoty rozpouštědla. Jako rozpouštědlo se využívá například etanol, aceton či glycerol. [13]

2.2 Nepřímé metody měření

Nepřímé metody jsou založeny na sledování veličin, které se mění na základě obsahu vody v materiálech. Musí být jasně definované, protože měřicí přístroj nám dá výsledek v jiných jednotkách. Poté je nutné podle známých rovnic přepočítat na jednotky vlhkosti. Nepřímé metody mohou být destruktivní i nedestruktivní.

2.2.1 Karbidová metoda

Tato metoda je založena na chemické reakci vody s karbidem vápenatým (CaC_2). Při reakci dochází k uvolňování acetyleny.



Reakce probíhá ve vzduchotěsné nádobě, kde se měří tlak, který vzniká uvolňováním acetyleny. Tato metoda je velmi rychlá a má srovnatelnou přesnost s gravimetrickou metodou. Jedná se o destruktivní metodu, jelikož se musí odebrat vzorek. Tato metoda nachází své uplatnění především ve stavebnictví, kde není nutné nosit vzorky do laboratoře, ale výsledky lze vyhodnotit v terénu. [12]

2.2.2 Mikrovlnná metoda

Mikrovlnné zařízení pracuje na rezonanční frekvenci vody. Dochází zde k odražení mikrovlnného záření. Měření lze provádět dvěma způsoby. U prvního způsobu se měří záření procházející materiálem a vyhodnocuje se absorpce záření v materiálu. Druhá metoda pracuje s odraženým mikrovlnným zářením a detekuje ho. Výhoda druhé metody spočívá v širokém spektru použití, kde není nutné mít senzor na druhé straně materiálu. Hloubka měření dosahuje obvykle až 40 cm. Mikrovlnné záření je závislé pouze na obsahu vody, tudíž odpadá nutnost kalibrace na suchém materiálu. Metoda je velmi přesná, avšak do 3% vlhkosti dosahuje značné chyby. Je to způsobeno změnou absorpčního maxima k nižším frekvencím. Dalším problémem je měření vlhkosti u látek s vysokým obsahem vodivých materiálů. Je to způsobeno překrytím ztrát relaxační vody, ztrátami na vodivých částech. Zamezuje to použití u

železobetonových stěn či látek s vysokou vodivostí. Pořizovací cena zařízení přesahuje 100 000 Kč, lze je však zapůjčit ve specializovaných firmách zabývajících se měřením vlhkosti zdiva. [6] [14]

2.2.3 Odporová metoda

Jedná se o jednu z nejpoužívanějších metod, a to především pro svou jednoduchost. Využívá vodivých vlastností vody. Odpor materiálu se z vlhkostí mění o několik řádů. Měrný odpor suchého materiálu se běžně pohybuje v rozmezích od 10^8 až $10^{13} \Omega m$ při zvlhčení materiálu měrný odpor může klesnout k hodnotám okolo $10^{-4} \Omega m$. Zajímavostí je, že měrný odpor vody při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ je řádově $10^5 \Omega m$. Důvod proč je odpor materiálu o několik řádů nižší než čisté vody je dáno disociací látek iontového charakteru obsaženého v materiálu. Následně se rozpuštěné mohou podílet na přenosu elektrického proudu.

Závislost odporu materiálu a vlhkosti je dána vzorcem:

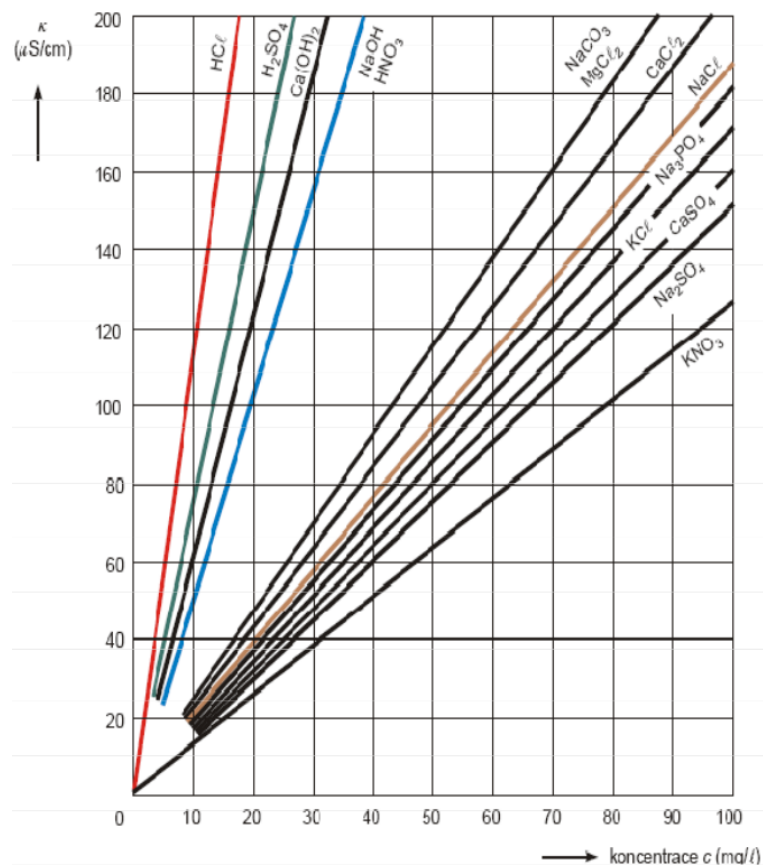
$$R = k * \omega^{-a} \quad [\Omega] \quad (2.1)$$

K a a jsou empirické konstanty materiálu a ω je vlhkost materiálu vyjádřena hmotnostním zlomkem.

Z rovnice vyplývá, že u měření odporovou metodou silně závisí na měřeném materiálu. V praxi se tudíž kalibrují měřící přístroje podle použití tj. zařízení určené pro měření vlhkostí zdi nelze použít k měření například tkanin. Univerzální vlhkoměry zpravidla mívají různé rozsahy či tabulky pro přepočty k různým materiálům.

Vodivost vlhkého materiálu je převážně iontového charakteru, je to vodič II. řádu. Na rozdíl od kovových vodičů I. řádu, kde s rostoucí teplotou roste i odpor vodiče, odpor s teplotou klesá. Zdánlivě tedy s rostoucí teplotou roste i vlhkost materiálu. Udává se, že pokud ohřejeme materiál o $1 \text{ }^\circ\text{C}$, zvýší se zdánlivá vlhkost o 0,05% až 0,15%.

Vodivost vlhké látky je silně ovlivněna obsahem solí v kapalině. Je to jedna z nevýhod této metody, kde vysoká koncentrace výrazně zkresluje měření.



Obr. 2.1: Závislost vodivosti na koncentraci různých solí [24]

Shodně jako u měření vodivosti kapalin, vzniká i zde polarizace elektrod. Je způsobena elektrolýzou na povrchu elektrod, kde se tvoří elektrochemický článek. Tento článek je polarizován proti přiloženému napětí. Tento jev se dá omezit použitím střídavého napětí. [6] [15] [24]

2.2.4 Kapacitní metoda

Kapacitní metoda využívá toho, že voda má vysokou relativní permitivitu $\epsilon = 80$. Permitivita měřeného materiálu je za sucha nižší. Měření se provádí přiložením elektrod kondenzátoru k měřenému materiálu. Permitivita se měří nepřímou jako admittance. Zde je důležitá stálá vzdálenost elektrod, protože s vzdáleností se kapacita snižuje.

$$C = \epsilon_0 * \epsilon_r * S/l \quad (2.2)$$

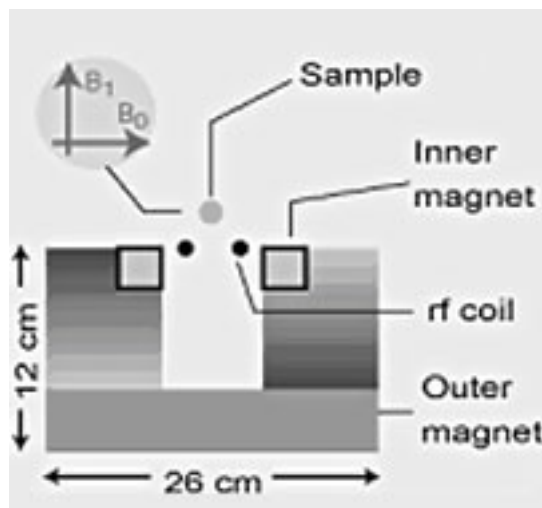
Kde ϵ_0 je permitivita vakua, ϵ_r relativní permitivita, S plocha elektrod a l vzdálenost elektrod.

Před měřením vlhkého materiálu je nutné kalibrovat na suchém materiálu a zjistit permitivitu bez vlhkosti. V praxi se používají tabulky s nejčastěji měřenými

materiály. V porovnání s odporovou metodou má kapacitní nižší přesnost. Stejně jako u odporové metody je důležitá teplotní kompenzace nebo dodržovat konstantní teplotu. Přesnost měření klesá při příliš vysoké vlhkosti, kde se již uplatňuje vliv elektrolytů. [16] [6]

2.2.5 Metoda nukleární magnetické rezonance (NMR)

NMR je založena na pohlcování vysokofrekvenční energie materiálem, který je vystaven silnému magnetickému poli. Detekuje se přímo chemický prvek, v případě vody je to vodík. Pro vodík platí rezonanční frekvence 2,7 MHz. Metoda není pouze kvantitativní, ale i kvalitativní. Je možné rozlišit vodík ve volné vodě a ve vázané, která je součástí materiálu. Problémy pouze činí oleje, kde vodík nelze odlišit od vodíku ve vodě. Jedná se o přesnou metodu. Mezi hlavní nevýhody patří vysoká cena. [17] [6]



Obr. 2.2: NMR senzor [22]

2.2.6 Porovnání metod z hlediska použití v měření vlhkosti tkaniny

Metoda pro měření vlhkosti tkaniny musí být nedestruktivní a musí být bezpečná pro pacienta, který bude při přístroji ležet. Jediné dvě metody, které tyto podmínky splňují jsou odporová a kapacitní. Tyto metody mohou vlhkost měřit dlouhodobě a kontinuálně, bez většího zásahu obsluhy. Konstrukce senzorů je obdobná, dvojice elektrod mezi nimiž bude tkanina pohlcující vlhkost. Odporová metoda má oproti kapacitní řadu výhod, jako například schopnost měřit vlhkost ve vysokých hodnotách a jednodušší zpracování signálu. Odporová metoda má také vyšší přesnost. Hlavní výhoda kapacitního snímače je ve stavebnictví, kde není nutné vyvrtávat díry do povrchu. Ovšem v měření vlhkosti látek se tato výhoda neuplatní. Z výše uvedených důvodů se jeví jako nejvhodnější odporová metoda.

3 Návrh řešení

Návrh řešení je založen na místě a požadavcích měření vlhkosti. Měření bude probíhat v nemocničních popřípadě hospicových zařízeních, kde je relativně stálá teplota a jedná se o prostory bezpečné z hlediska koroze či vlhkosti. Obsluha zařízení musí být jednoduchá a bezpečná, aby s ní byl schopen pracovat personál nemocničních zařízení.

Detekce vlhkosti bude zajištěna textilním materiálem protkaným vodivým vláknem, kde při změně vlhkosti textilu bude docházet ke změně odporu. Změna vlhkosti bude skoková, tudíž nároky na přesnost nebudou vysoké.

Výstup přístroje bude zajišťovat mikrokontrolér, který zpracovává a vyhodnocuje změnu odporu. Následně bude schopen oznámit změnu vlhkosti světelným či zvukovým upozorněním.

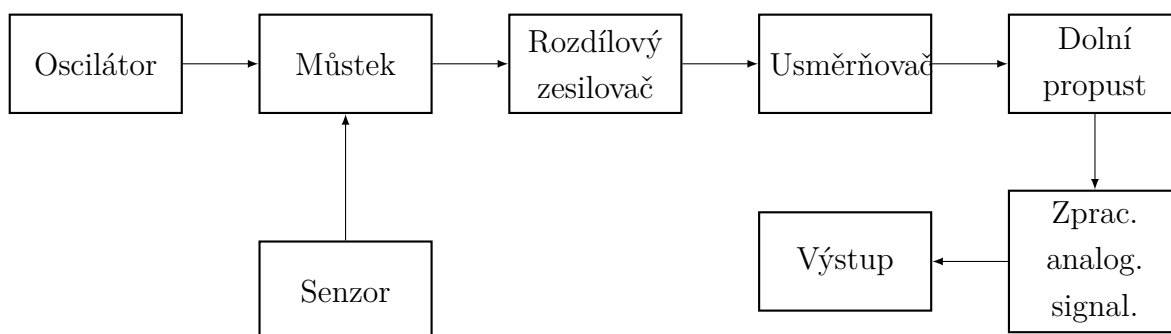
Zobrazení bude zajišťovat displej a pro upozornění bude použit piezoelektrický buzák. Napájení zařízení bude standardním síťovým napájením.

4 Obvod pro měření vlhkosti odporovou metodou

Obvod je založen na měření rezistivity senzoru. Jedná se o pasivní součástku, kterou lze měřit jen za pomoci aktivních elektrických veličin. Je proto nutné aby na senzoru bylo přítomno napětí a protékal nim proud. Pasivní součástky pak na základě svých vlastností aktivní elektrické veličiny ovlivňují. Na rozdíl od aktivních součástek je nutná přítomnost vhodného zdroje. Zde je jako zdroj použit oscilátor sinusového signálu. Dále je nutné vhodným způsobem měřit změnu aktivních veličin na senzoru a následně veličinu vhodně zpracovat pro další použití.

Obvod je společně se symetrickým zdrojem vyroben na desce plošných spojů (DPS). Deska byla vymodelována v programu EAGLE jako jednostranná a na DPS byly vyrobeny otvory pro montáž do krabice.

4.1 Blokové schéma měřícího obvodu

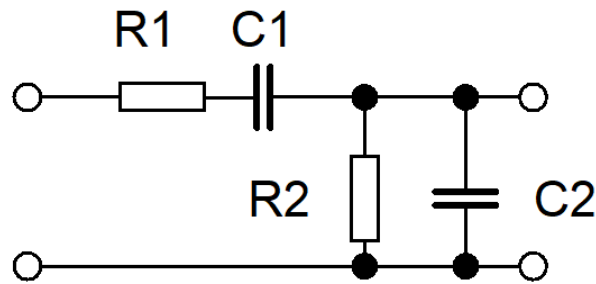


Zařízení se skládá z několika funkčních bloků. První blok je oscilátor, který vytváří střídavé napětí o frekvenci 5 KHz s napětím 9V. Jedná se o oscilátor s Wienovým článkem. Druhý blok je můstek, který zajišťuje samotné měření odporu senzoru a jeho převod na napětí. Následuje rozdílový zesilovač, který zesiluje pouze užitečný signál. Další bloky signál usměrní a zpracují na velikost požadovanou A/D převodníkem.

4.2 Oscilátor

Měření vlhkosti odporovou metodou vyžaduje střídavé napětí, a proto je nutné vytvoření oscilátoru. Typů oscilátorů je celá řada podle způsobu použití a kladených požadavků. Na oscilátor použitý v tomto zařízení nejsou kladeny vysoké požadavky, střídavý signál zde slouží pouze k potlačení polarizačního jevu. Pro toto použití plně dostačuje oscilátor s wienovým článkem. Jedná se o jednoduché a levné řešení s dobrou frekvenční a amplitudovou stabilitou.

Wienův článek



Obr. 4.1: Wienův článek

Jedná se o dvojbran, který slouží jako pásmová propust, tedy propouští jen určitou frekvenci. Skládá se z kombinace horní a dolní propusti RC. Pokud velikost kondenzátoru a odporu je stejná pro obě propusti platí rovnice:

$$f_M = \frac{1}{2\pi RC} \quad [Hz] \quad (4.1)$$

Kde f_M je propouštěná frekvence. Na rozdíl od jednoduchých RC obvodů je zde pokles zisku

$$F(j\omega) = \frac{1}{3} \quad [-] \quad (4.2)$$

a fázový posun 0°

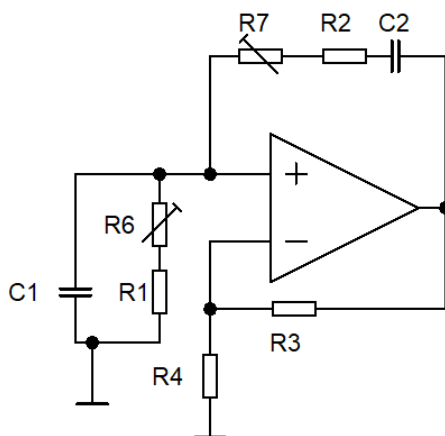
4.2.1 Oscilátor s Wienovým článkem

Vlastnosti wienova článku se využívají u oscilátorů, kde je zapojen ve zpětné vazbě operačního zesilovače. Pro vznik kmitů musí být splněny tyto podmínky:

Amplitudová podmínka Tato podmínka říká, že je nutné pro zajištění kmitů zesílení otevřené smyčky rovné nebo větší než 1. Jelikož zesílení wienova článku je $A = \frac{1}{3}$ musí být zesílení operačního zesilovače minimálně 3. Při vyšších hodnotách zesílení překračujících 1, dochází k ořezu výstupního signálu.

Fázová podmínka Tato podmínka říká, že je nutné, aby fáze otevřené smyčky byla v násobcích $2\pi(360^\circ)$, jelikož wienův článek má fázový posun 0° , je nutné jej zapojit do neinvertujícího vstupu operačního zesilovače.

Z výše uvedených podmínek vyplývá následující schéma.

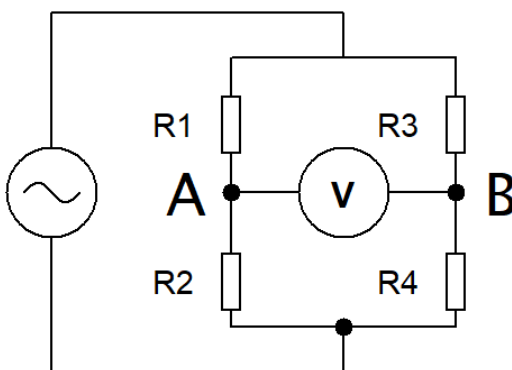


Obr. 4.2: Oscilátor s wienovým článkem

Odpory R3 a R4 slouží jako napěťový dělič, který zajišťuje zesílení 3. Wienův článek je kombinací odporů R1 a R2 a kondenzátorů C1 a C2. Zde jsou ještě doplněny o trimry R6 a R7, které slouží k přesnému doladění požadované frekvence. Operační zesilovač je napájen symetrickým napájením. [18]

4.3 Wheatstoneův můstek

První blok obvodu slouží k samotnému měření rezistivity senzoru. Wheatstoneův můstek patří mezi základní metody měření odporů.



Obr. 4.3: Wheatstoneův můstek

Jedná se o dvě paralelní větve složené ze dvou rezistorů. Platí pro ně rovnost dle vzorce:

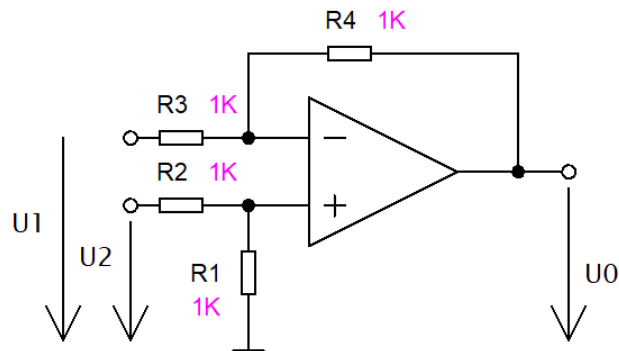
$$\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{R4} \quad (4.3)$$

Za předpokladu, že odpory mají stejnou hodnotu, mezi body A a B neprochází žádný proud a potenciál mezi nimi je nulový, můstek je vyvážený. Pokud nahradím jeden z odporů měřeným odporem, tak při znalostech hodnoty zbývajících odporů v můstku, jsem schopen jeho hodnotu spočítat. Vyjádřením neznámého odporu z předešlého vzorce dostávám vzorec pro výpočet neznámého odporu.

$$R4 = \frac{R2 * R3}{R1} \quad [\Omega] \quad (4.4)$$

[21]

4.4 Rozdílový zesilovač



Obr. 4.4: Diferenční zesilovač

Tento blok obvodu slouží k zesílení rozdílového signálu a potlačení souhlasného. Rozdílový zesilovač využívá oba vstupy operačního zesilovače. Na invertující a neinvertující vstup jsou připojeny výstupy z můstku. Pro správnou činnost rozdílového zesilovače je nutné dodržet podmínku

$$\frac{R4}{R3} = \frac{R2}{R1} \quad (4.5)$$

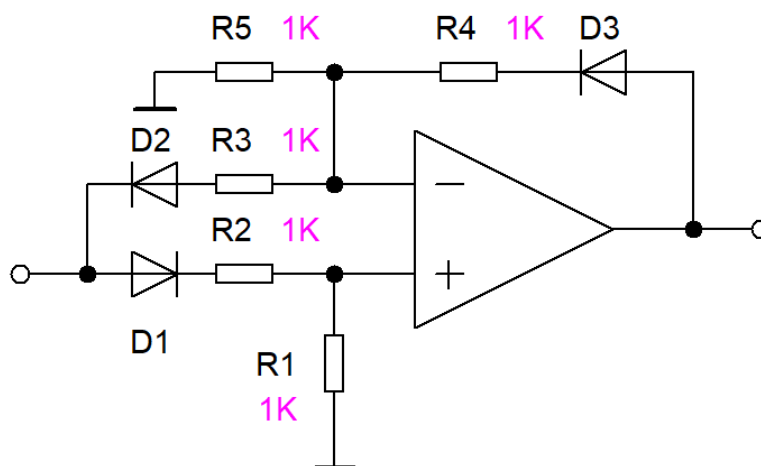
Pokud by podmínka nebyla dodržena, operační zesilovač by zesiloval souhlasné napětí mezi vstupy. V tomto obvodu jsou použity odpory stejné hodnoty, zesílení zesilovače je tedy 1. Pro výstupní amplitudu napětí platí:

$$u_0 = u_2 - u_1 \quad (4.6)$$

[20, 19]

4.5 Přesný usměrňovač

Jelikož odpor měřím střídavým signálem, je výstup z předešlého bloku taktéž střídavý. Na základě změny velikosti odporu se mění amplituda signálu. Pro další zpracování je však mnohem jednodušší stejnosměrné napětí. Z tohoto důvodu je nutný usměrňovač. Můstkový usměrňovač má nevýhodu ve zkreslení signálu vlivem prahového napětí diod, je proto nutný přesný usměrňovač s operačním zesilovačem. Zde je použit dvoucestný usměrňovač s jedním operačním zesilovačem.

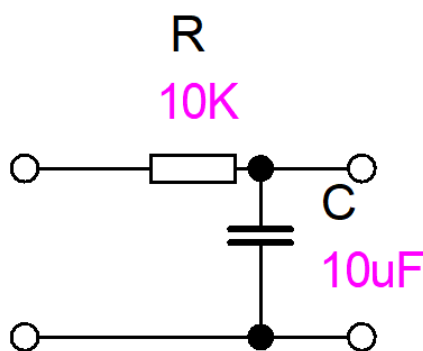


Obr. 4.5: Dvoucestný usměrňovač

Na vstupu jsou zapojeny antiparalelně dvě diody. Dioda zapojená v propustném směru, je přivedena přes odpor na neinvertující vstup a dioda v závěrném období do invertujícího vstupu. Zesilovač tedy při kladné půl vlně pracuje jako neinvertující zesilovač se zesílením 2, a je proto nutný na vstupu napěťový dělič. Při záporné půl vlně pracuje jako invertující. Ve zpětné vazbě je zapojena dioda, která slouží jako kompenzace diod na vstupech.[20, 19]

4.6 Dolní propust

Výstup usměrňovače je stejnosměrné tepavé napětí, které je ještě nutné vyhladit. K tomuto účelu slouží dolní propust. Dolní propust může být dvojího typu RC anebo LC. Pro nízké proudy a vyšší frekvence je vhodný RC článek a pro vysoké proudy a nižší kmitočty, zejména síťové, LC článek. Jelikož proudy jsou řádově mA a frekvence je $5Khz$, použil jsem RC článek.



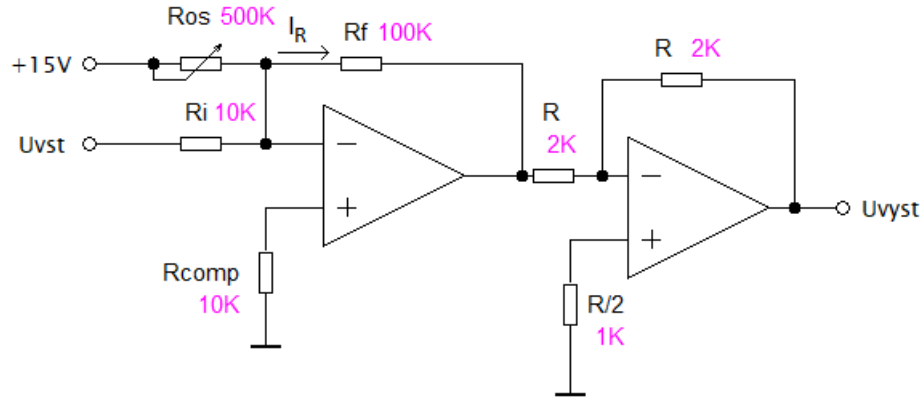
Obr. 4.6: Dolní propust

Kondenzátor o velikosti $10\mu F$ v kombinaci s odporem $10k\Omega$ zajistí dokonalé vyhlazení napětí.

4.7 Zpracování analogového signálu

Signál, který vychází z usměrňovače, je nyní lineárně závislý na odporu, ale pohybuje se pouze v rozmezí $1 - 2V$. Standardní analogový vstup mikrokontroléru je ovšem $0-5V$. Pro zvýšení citlivosti, je tedy nutné změnit strmost signálu a nastavit průchod nulou. Tímto zajistím pracovní oblast senzoru na rozmezí $0 - 5V$.

Úprava pracovní oblasti vychází ze znalosti obecné rovnice přímky $y = ax + b$, kde volbou vhodných konstant jsem schopen transformovat vstupní signál na požadovaný rozsah. Invertující součtový zesilovač má téměř tuto převodní charakteristiku, jen je ji nutné poté znovu invertovat.



Obr. 4.7: Obvod pro zpracování signálu

První invertující zesilovač funguje tedy jako součtový, kde se sčítá signál s referenčním napětím, které je pomocí trimru možné nastavit na požadovanou hodnotu. Pro inverzní sumátor platí:

$$U_O = -I_R * R_f = -\left(\frac{R_f}{R_i} * U_{vst} + \frac{R_f}{R_{os}} * U_{ref}\right) \quad [V] \quad (4.7)$$

Jelikož se jedná o inverzní zapojení, je nutné následně znovu signál invertovat. K tomuto účelu je zde inverzní zesilovač.

Odpory R_{comp} a $R/2$ slouží ke kompenzaci napěťové nesymetrie na vstupech OZ. Jejich velikost je dána paralelní kombinací odporů R_{os} , R_i a R_f pro první zesilovač a odporů R pro druhý zesilovač.

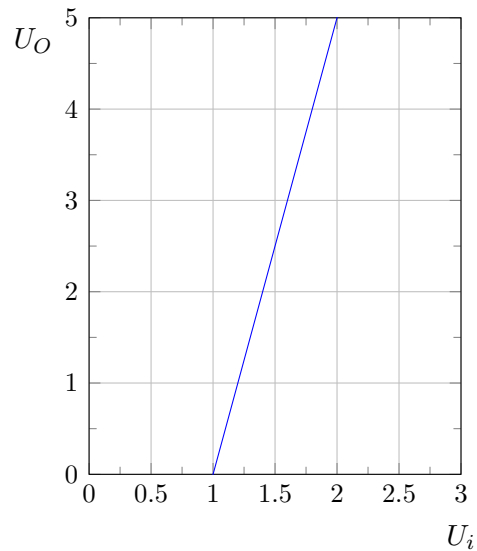
[20, 19]

Z rovnice je patrné, že správnou kombinací odporů jsem schopen nastavit libovolné parametry přímky. Vhodnou volbou odporů dostávám rovnici ve tvaru:

$$U_{vyst} = \frac{100k}{20k} * U_{vst} + \frac{100}{300} * -15 \quad (4.8)$$

Rovnice přímky je poté ve tvaru:

$$V_0 = 5 * V_i - 5 \quad (4.9)$$



Obr. 4.8: Převodní charakteristika pro obvod na úpravu signálu

Osa x reprezentuje vstup do obvodu ($1 - 2V$). Osa y výstup z obvodu ($0 - 5V$). Tento obvod zvýší citlivost A/D převodníku, jelikož dokáží využít celý jeho rozsah.

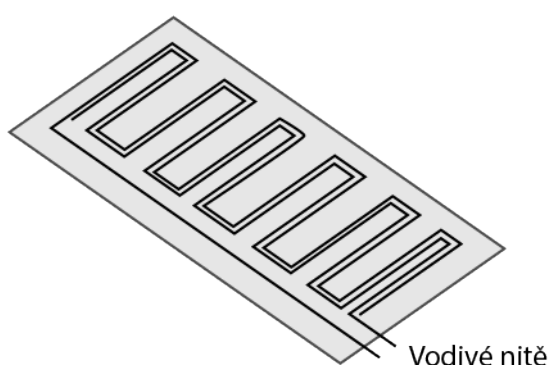
4.8 Výstup

Jelikož bude obvod snímán pomocí mikrokontroléru, který má analogový vstup do $5V$, je nutné zajistit, aby zde nebylo větší napětí. Ošetření této podmínky zajišťuje paralelně zapojená zenerova dioda, která slouží ke stabilizaci napětí.

5 Senzor

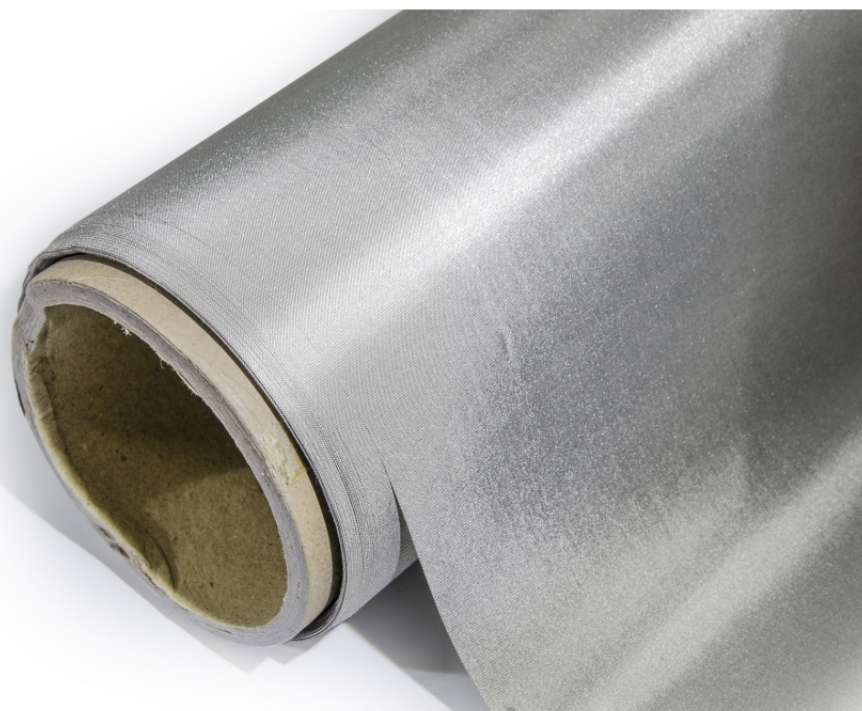
Senzor je založen na odporové metodě měření vlhkosti. Tato metoda klade na senzor určité konstrukční požadavky. Mezi ně patří dobrá savost, vodivost elektrod a elektrody musí umožňovat prostupnost vlhkosti k savému materiálu. Senzor bude vložen pod pacienta, je tedy nutná jeho odolnost vůči oděrům.

První konstrukční řešení vycházelo z požadavku na dokonalou savost tkaniny. Jednalo se o bavlněnou látku protkanou dvojicí vodivých nití, jak je zobrazeno na náčrtu. Bohužel plocha elektrod byla příliš malá a vodivost senzoru byla neměřitelná. Bylo tedy nutné najít vhodnější materiál na konstrukci elektrod.



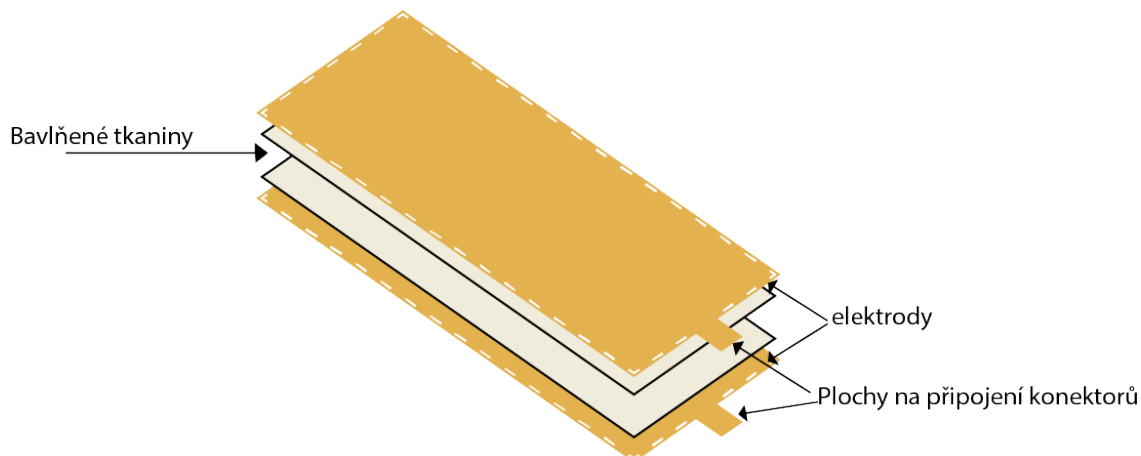
Obr. 5.1: První návrh senzoru

Druhá verze senzoru využívá jako elektrody tkaninu H94 určenou pro stínění zařízení před elektromagnetickým zářením, takzvaná Faradayova klec. Látka je vyrobena z 24% mědi, 21% niklu a 55% polyesteru. [23]



Obr. 5.2: Tkanina H94 [23]

Složení tkaniny zajišťuje skvělé vodivé vlastnosti a dobrou odolnost vůči korozi. Jelikož je látka složena z polyesteru, nemá dobré absorpční a především smáčivé vlastnosti. Slabá absorpce není tak problematická, jelikož pod látkou je bavlna, která většinu vlhkosti dokáže pojmout, ovšem nedostatečná smáčivost brání v dostatečném pohlcení tekutiny. Tomuto problému lze částečně zabránit použitím další vrstvy dobře savé látky.



Obr. 5.3: Druhý návrh senzoru

Senzor se skládá ze dvou vrstev elektrod z materiálu H94, mezi které je vložena dvojice bavlněných tkanin. Elektrody jsou přišité ke každé tkanině zvlášť a následně je dvojice bavlněných vrstev přišita tak, aby nebyly zároveň prošity elektrody. Tento postup šití je nutný, neboť by docházelo k vytrhávání vláken elektrod jehlou a zkratování senzoru. Dále je nutné zajistit, aby se látky sloužící jako elektrody nedotýkaly. Toho lze dosáhnout zvětšením ploch bavlněných tkanin, aby dostatečně překrývaly elektrody. B.3

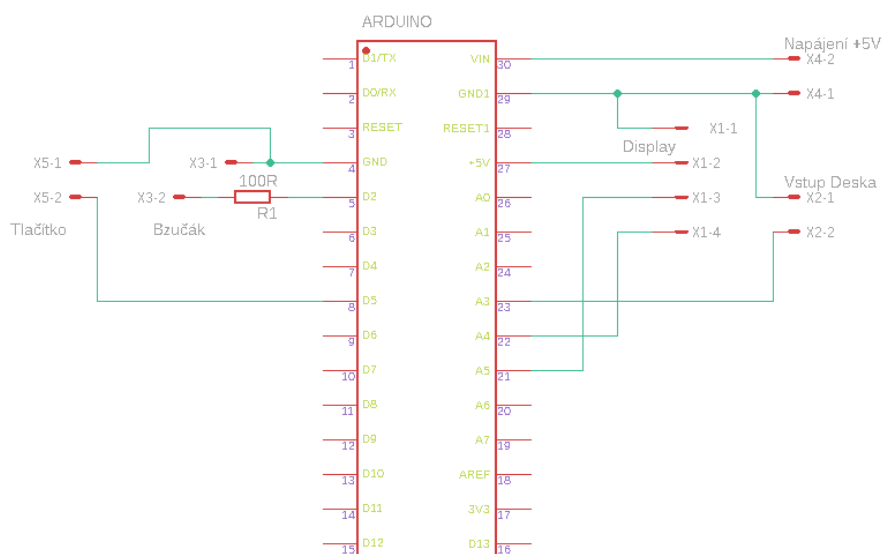
Celý senzor je následně vložen do bavlněné "kapsy", která zajišťuje dostatečnou smáčivost a především ochranu proti oděru. Kapsu lze bez problémů prát v pračce, ovšem samotný senzor doporučuji prát pouze v rukách nebo alespoň bez ždímání, protože materiál elektrod je velmi jemný a mohlo by dojít k jejímu poškození. Míru odolnosti senzoru je však nutné testovat delší dobu, aby se plně projevil konstrukční vady. B.4

6 Digitální zpracování

Výstup měřicího obvodu je nutné vhodným způsobem zobrazovat a vhodně upozornit obsluhu na kritickou vlhkost čidla. Dále je vhodné zajistit kalibraci senzoru a nastavit limity vlhkosti pro různé typy čidel. Předpokládá se totiž použití vícero čidel, kde každé má jiné vodivostní vlastnosti. Vlhkost senzoru je taktéž ovlivněno vzdušnou vlhkostí, která je různá pro různé prostory a podnebí. Kalibrace dále umožňuje nastavit práh spouštění upozornění na vlhkost, jelikož čidlo bude stále v mírně vlhkém prostředí způsobené pocením pacienta.

6.1 Hardwarová část

Systém je založen na Arduinu nano, které zobrazuje na displeji informace o stavu zařízení. Ovládání je zajištěno tlačítkem vedle displeje. Pro zvukové upozornění je dále připojen k Arduinu piezoelektrický bzučák.



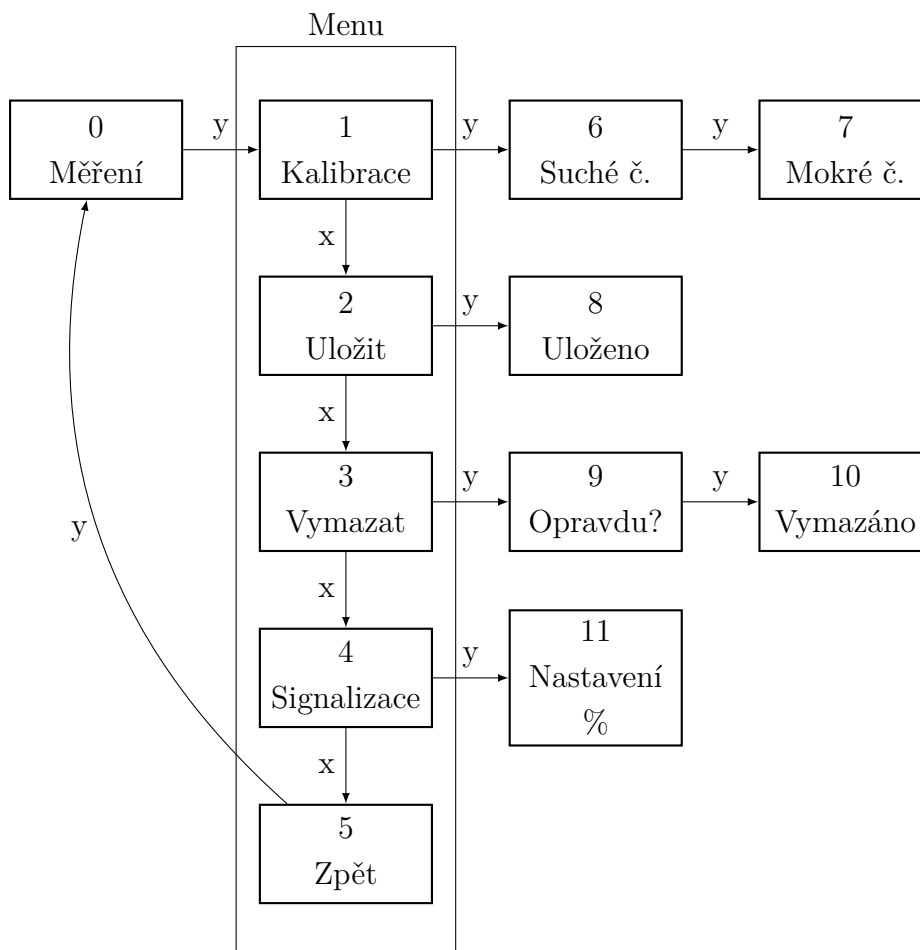
Obr. 6.1: Schéma zapojení arduina

Samotné arduino je připájené na pájivém poli, kde je provedeno veškeré propojení součástek. K němu jsou následně připájeny propojovací kabely pro připojené zařízení.

Displej je dvouřádkový 16 znakový s nastavitelným kontrastem a splňuje průmyslový standard HD44780. K displeji je připájen 8 bitový převodník PCF8574 na I2C sběrnici. Převodník je zde použit především z důvodu úspory vodičů. Displej je čtyřmi šroubky přišroubován k víku krabičky.

6.2 Softwarová část

Program je koncipován jako konečný stavový automat. Tento způsob programování mi umožňuje pohyb v jednotlivých blocích programu, kde se následně vykonávají určité operace.



Výchozí blok po zapnutí zařízení je blok Měření, kde probíhá samotné měření vlhkosti. Zde se zobrazí vlhkost senzoru v procentech. Pohyb mezi jednotlivými bloky je zrealizován pomocí tlačítka. Tlačítko má dva módy, krátké a dlouhé stisknutí. Na schématu je krátké stisknutí znázorněno jako x a dlouhé jako y . Dlouhým stiskem jsem schopen se dostat do menu, ve kterém se pohybuje krátkým stiskem. Do jednotlivých položek menu se opět dostanu pomocí dlouhého stisku.

Položky menu

Kalibrace Vzhledem k možnosti použití vícero senzorů je nutná kalibrace přístroje. Pro kalibraci je nutné znát odpor suchého a mokrého senzoru. V prvním

kroku se připojí suchý senzor a po podržení tlačítka se zapíše spodní hranice. Následně se senzor navlhčí na co nejvyšší vlhkost a znovu se podrží tlačítko pro zapsání horní hranice vlhkosti.

Uložit Tato položka slouží k uložení hodnot do paměti EEPROM. Zde jsou zapsány parametry senzoru a práh signalizace.

Vymazat Po stisknutí a následném potvrzení dlouhým stiskem dojde k vymazání paměti EEPROM.

Signalizace Obvod je vybaven piezoelektrickým bzučákem, který po dosažení požadované vlhkosti začne signalizovat kritickou vlhkost. Zde je možné nastavit práh sepnutí bzučáku v procentech. Nastavovat lze od 0% do 100% po 5%.

Zpět Po provedení veškeré kalibrace a uložení nastavení jsem schopen pomocí dlouhého podržení tlačítka na položce se dostat zpět na režim čtení.

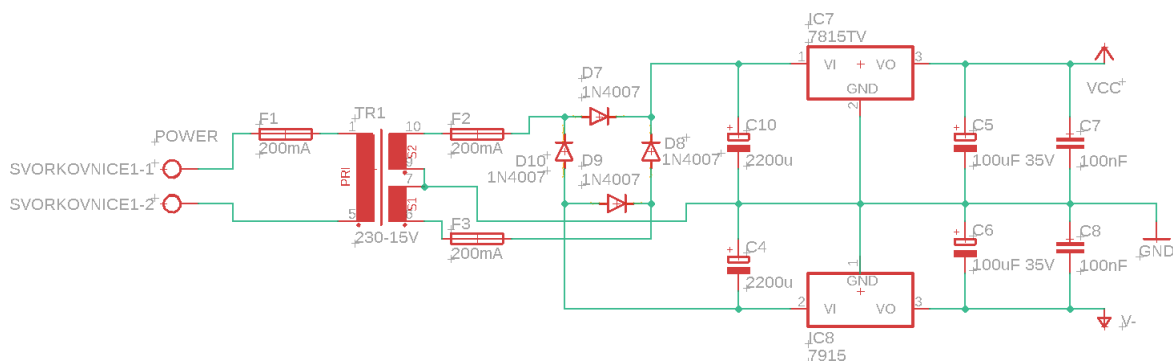
Zápis do EEPROM Paměť je koncipována pro zápis malých čísel do 8 bitů (1 Byte), ale A/D převodník je 10 bitový. Je proto nutné rozdělit zápis dat na dva byte. Zapíše se prvních 8 bitů, poté se provede bitový posun a zapíše se zbývajících 8 bitů.

7 Napájení

Pro činnost zařízení jsou nutné dva napájecí zdroje. Pro obvod na měření vlhkosti je nutné 15V stejnosměrné napájení operačních zesilovačů a pro arduino, a jeho periferie, 5V stejnosměrné napětí. Z toho důvodu jsou použity dva zdroje s vlastním síťovým transformátorem.

7.1 Napájení měřícího obvodu

Napájení operačních zesilovačů může být dvojího typu. Nesymetrické (pouze jedna kladná větev vůči zemi) a symetrické napájení (kladná a záporná větev vůči zemi). Nesymetrické napájení lze použít pouze v aplikacích, kde je zpracováváno pouze kladné napětí. Jelikož měřím střídavé napětí, je nutné použít symetrický zdroj. Na trhu ovšem malé a levné symetrické zdroje chybí. Symetrický zdroj lze vyrobit z nesymetrického napětiovým děličem, nebo použít vhodný transformátor s dvěma sekundárními vinutími. Vhodnější je použití transformátoru, jelikož rozdělení nesymetrického zdroje a vytvoření virtuální země je použitelné jen pro velmi malé výkony. Při vyšších výkonech dochází k nadměrnému zahřívání výkonových tranzistorů a snižování životnosti součástek.



Obr. 7.1: Schéma symetrického zdroje +15V

Popis zapojení:

Síťové napětí je přivedeno přes pojistku do transformátoru, který transformuje napětí na 2x15V. Transformátor je malého výkonu 3VA, ten byl použit především z důvodu úspory místa a ceny celého zařízení. Obě větve jsou přes pojistky přivedeny na Graetzův můstek. Následuje pár kondenzátorů, který slouží k vyhlazení zvlněného napětí. Tyto kondenzátory mají povolené napětí až 35V, což překračuje více jak dvakrát provozní napětí. Tím je zajištěna jejich dlouhá životnost a bezporuchovost. Dále následují stabilizátory na 15V. Stabilizátor 7815 je na kladné napětí a

stabilizátor 7915 na záporné. Následují dva páry blokovacích kondenzátorů, které slouží k eliminaci vlivu indukčnosti přívodů. Jedná se o dva elektrolytické $100\mu F$ a dvojice keramických o hodnotě $100nF$.

7.2 Napájení arduina

Pro napájení arduina a jeho periférií je použit spínaný síťový adaptér na 5V. Tento zdroj se běžně používá pro nabíjení mobilních telefonů a dle výrobce je zdroj schopen obstarat až 1A. Zdroj byl zbaven plastového krytu a jeho vstupy a výstupy byly upraveny pro montáž kabeláže.

8 Konstrukce

Vzhledem k použití síťového napájení jsou kladeny vyšší nároky na bezpečnost obsluhy. Uživatel přístroje by během manipulace a používání zařízení neměl přijít do kontaktu s živými částmi přístroje. Proto je důležitá konstrukce krytu přístroje, který bude zajišťovat aktivní bezpečnost uživatele. Na kryt jsou kladeny nejrůznější požadavky jako tuhost konstrukce či stupeň krytí. Materiál krytu musí být nejlépe nevodivý či řádně uzemněný.

Jelikož univerzální kryty, jež jsou na trhu, nesplňují mé požadavky na prostor a tvar, rozhodl jsem se jej sám namodelovat a vytisknout na 3D tiskárně, kterou vlastním. Zde jsem schopen vymodelovat kryt přesně na míru a dle mých požadavků.

8.1 Modelování

Model byl vymodelován v programu Fusion360, kde se využila možnost importu desky plošných spojů z programu Eagle. Další potřebné díly byly ke stažení z databázi Autodesk, či popřípadě jsem je domodeloval. Tento postup mi umožnil vizuální kontrolu zda je prostor dostatečně velký pro všechny součástky. Krabíčka se skládá ze dvou dílů, samotného těla a odjímatelného víka, který přesně pasuje do krabíčky. Tímto způsobem, jsem byl schopen přesně navrhnout rozměry modelu a uchycení součástek. Pro měřicí obvod, arduino a piezoelektrický bzučák byly vymodelovány distanční sloupky ve tvaru kuželu pro větší tuhost konstrukce. Krabíčka je opatřena otvory pro konektory napájení a senzoru, dále otvor pro displej, vypínač a ovládací tlačítko.

8.2 Výroba a kompletace

Model byl vyexportován ve formátu STL do aplikace pro přípravu tisku. Zde byly nastaveny parametry tisku, jako například teplota, rychlost tisku a hustota výplně modelu. Pro samotný tisk byla použita tiskárna značky Anycubic i3 Mega. Materiál tištěného modelu je plast PLA, jehož vlastnosti plně dostačují místu použití.

Do vytisknutého modelu, byly následně přišroubovány veškeré komponenty. Součástky na distančních sloupcích byly přišroubovány samořeznými šrouby velikosti M3. Zbývající součástky byly buďto přilepeny či přimontovány svým montážním způsobem.

Kabely pro síťové napětí byly nacvaknuty pomocí lisovaných konektorů a zaizolovány smršťovací bužírkou. Signálové vodiče, jsou standardní kabely s přípojovacími hroty.

9 Měření

Poslední kapitola bakalářské práce se zabývá otestováním funkčnosti celého obvodu a všech jeho součástí. Pro ověření funkčnosti všech částí zařízení jsem vypracoval tyto tři pokusy.

- funkčnost zařízení a kalibrace
- minimální objem detekovaného vzorku
- test odolnosti senzoru

9.1 Nastavení zařízení

Nejprve je nutné zařízení uvést do provozu, k tomu slouží síťový vypínač. Po stisknutí tlačítka se celé zařízení zapne a je připraveno k měření. Pro kalibraci je nutné se dostat do menu pomocí dlouhého podržení tlačítka. V položce kalibrace je nutné změřit suchý a mokrý senzor.

Odpor mokrého senzoru je nutné experimentálně zjistit. Pro pokus je moč z hygienických důvodů nahrazena roztokem vody a soli, která značně ovlivňuje vodivost. Obsah soli se liší v závislosti na zdravotním stavu pacienta a jeho hydrataci. Zdravý člověk má v litru moči zhruba 10g $NaCl$. Dále obsahuje chlorid draselný a síran sodný, které taktéž zvyšují vodivost moči, v rámci experimentu jsou však zanedbány. [25]

Maximální vodivost vzorku lze jednoduše zjistit z položky kalibrace. Zde číselná hodnota určuje rozlišení A/D převodníku. Pro arduino nano to je 10 bitů což je 1024 kvantizačních úrovní. Maximální číslo je nulová vlhkost neboli maximální odpor. Pokud je číslo 0 znamená to, že je senzor zkratovaný a odpor je nulový. Pro kalibraci je nutné maximální vlhkost určit experimentálně přidáváním tekutiny, dokud se číslo zmenšuje.

Po skončení kalibrace je nutné zapsat parametry do paměti, aby po vypnutí zařízení nebyly vymazány.

9.2 Měření vlhkosti - minimální detekovatelný objem

Jeden z nejdůležitějších parametrů měřícího zařízení je jeho citlivost. Je proto nutné zjistit práh měřitelnosti vlhkosti vzorku.

Pro test nastavím kalibraci nulové vlhkosti suchý senzor a pro maximální vlhkost kompletně mokrý.

Následně jsem si umíchal slaný roztok, který bude simulovat moč. Poté naliji tekutinu na senzor po 5ml a následně zatížím závažím pro simulování váhy pacienta. Zatížení je nutné, protože vrstvy senzoru nejsou prošité a zátěž zajistí dokonalý

kontakt elektrod k tkanině.

Změna vodivosti lze sledovat v procentech, nebo v režimu kalibrace číst změnu hodnoty A/D převodníku.

9.3 Odolnost senzoru

Senzor bude vystavován každodennímu používání a čištění. Je proto nutné zjistit zda-li je senzor vhodný k praní a na základě výsledku testu navrhnout případné zvýšení odolnosti senzoru.

Test provedu s malým senzorem, který vložím do pračky s pracím práškem a zvolím běžné praní na teplotu 40°C a zapnu ždímání.

9.4 Vyhodnocení měření

9.4.1 Nastavení zařízení

Zařízení bylo připojeno do sítě a uvedeno do provozu. Následně byl připojen senzor a zahájena kalibrace. Suchý senzor měl podle očekávání hodnotu 1023. Následně jsem nalil 50 ml roztoku vody a soli s 1% koncentrací a zatížil. Jako závaží jsem použil plastové prkno a 5kg činkový kotouč. Senzor ukazoval hodnotu 238 a po dalším přidávání roztoku se číslo nezmenšovalo. Dále jsem nastavil zvukové upozornění při 80%. Po veškerém nastavení jsem provedl uložení a zařízení bylo připraveno k provozu. Pro další měření bylo nutné počkat až senzor dokonale vyschne. B.5

9.4.2 Minimální detekovaný objem

Po dokonalém vyschnutí bylo zařízení opět uvedeno do provozu. Následně jsem si znovu namíchal 1% roztok soli a rozdělil po 5ml. Po nalití odměřeného objemu jsem senzor zatížil a zaznamenal hodnotu na displeji. Měření jsem opakoval dokud se hodnota vlhkosti zvyšovala. Ihned po nalití prvních 5ml zaznamenával senzor 86% vlhkost.

Vlhkost [%]	Objem vody [ml]
86	5
90	10
97	15
100	20

Dalším zvyšováním objemu nalité vody se vodivost zvyšovala a při pouhých 20ml dosahovala 100%. Příklad je tedy velmi citlivý a při sebemenším úniku moči je schopen reagovat.

9.4.3 Odolnost senzoru

Elektrody jsou vyrobeny z jemného materiálu a po vyprání došlo k jejich poškození, jelikož vodivá vlákna se vypraly z nosného materiálu. Poškození elektrod není rozsáhlé a senzor dál spolehlivě měří, ovšem časté praní by senzor zničilo. Je proto nutné prát zařízení pouze v rukách, nebo postupovat podle zásad pro praní velmi jemného prádla. Dále by se dala mechanická odolnost zvýšit zašitím elektrod mezi dvě vrstvy bavlněného materiálu. Dle mého názoru praní v pračce bude pro všechny druhy senzorů využívajících vodivých vláken velmi problematické, protože prací prášky ve spojení s vysokými otáčkami vystavují materiál velkým nárokům na pevnost a odolnost.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a zkonstruovat zařízení pro měření vlhkosti tkanin. Vypracoval jsem návrh měřicího obvodu pracujícího na vodivostním principu a zkonstruoval jsem ho na desce plošných spojů. Následně jsem naprogramoval mikrokontrolér Arduino nano pro měření a zobrazování naměřených hodnot. Arduino jsem zvolil především pro svoji jednoduchost, nízkou cenu a malou velikost. Program jsem napsal v programovacím jazyce wiring, protože se zde již nachází knihovny pro komunikaci s displejem a zápisem na paměť EEPROM. Celé měřicí zařízení je umístěno do krabičky vyrobené na 3D tiskárně. Samotný senzor vlhkosti je možné vložit na lůžko pod povlečení a senzor připojit pomocí svorek k měřicímu zařízení. Po použití jej lze odpojit a vyčistit před dalším použitím.

Nejsložitější částí práce bylo navrhnout senzor tak, aby měl dobrou smáčivost a zároveň dostatečnou vodivost. Elektrody senzoru jsem navrhoval vyrobít z vodivé nitě, ale senzor měl příliš velký odpor i při maximální vlhkosti. Usoudil jsem, že je to způsobené malou plochou elektrod. Nahradil jsem nit vodivou tkaninou určenou pro blokování elektromagnetických signálů. Tato tkanina se běžně používá k ochraně platebních karet nebo mobilních telefonů. Na základě použití tkaniny lze usoudit, že vodivá vlákna jsou v ní velmi hustě vpletena.

V kapitole měření jsem otestoval funkčnost celého zařízení. Provedl jsem kalibraci a nastavení upozornění na překročení vlhkosti. Přístroj funguje bez problémů a lze jej rychle a bezproblémově nastavit. Problém je pouze v tom, že k nastavení horního limitu vlhkosti, je třeba senzor navlhčit. Následně se musí nechat vysušit což znemožňuje okamžité použití senzoru. Jelikož jsem využil EEPROM paměť arduina, stačí provést kalibraci pouze jednou a i po vypnutí zůstanou hodnoty uložené. Dále byla otestována citlivost přístroje na objem vylité vody na senzor. Již po 5ml slané roztoku dosahovala vlhkost 86%. Vysoká citlivost přístroje může způsobovat falešný alarm při zpocení pacienta, ovšem tento problém lze eliminovat tlustší vrstvou tkaniny mezi elektrodami, nebo nad samotným senzorem. Jelikož bude senzor po použití nutné vyprat, otestoval jsem jeho odolnost vůči praní. Bohužel, elektrody jsou vyrobeny z velmi jemné tkaniny a po vyprání byly poškozeny. Je proto nutné prát senzor pouze v rukách.

Literatura

- [1] *Jak fungují smáčedla. Hasební technika [online]. Vrané nad Vltavou, 2010 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <http://www.hasebnitechnika.cz/jak-funguji-smacedla>*
- [2] *BÁRTKOVÁ, H a P KLUSOŇ. Stanovení povrchové smáčivosti tenkých vrstev a odbourávání povrchověvázaných nečistot [online]. , 3 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/kot/resources/studijni-materialy/labchcht-001/n150013-b6.pdf>*
- [3] *KUBÁČEK, Pavel. Adsorpce. Základy fyzikální chemie [online]. Brno: MUNI, 2011 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/prif/js11/fyz_chem/web/povrchy/adsorpce.htm*
- [4] *Adsoption. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/66/Wiki_kisliuk_n2-tungsten.JPG?1578066717105*
- [5] *REICHL, Jaroslav. Kapilarita. Encyklopedie fyziky [online]. 2006 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/643-kapilarita>*
- [6] *Fexa Josef a Karel ŠIROKÝ. Měření vlhkosti. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce, sv. 60.*
- [7] *BENEŠ, Petr. Měření fyzikálních veličin: návody do laboratorních cvičení. VUT Brno, 2018.*
- [8] *Konduktometrie. Analýza léčiv [online]. Hradec Králové: Vyšší odborná škola zdravotnická a Střední zdravotnická škola, neuveden [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://anl.zshk.cz/vyuka/konduktometrie.aspx>*
- [9] *Sušení [online]. Hradec Králové: Vyšší odborná škola zdravotnická a Střední zdravotnická škola, 2018 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://lat.zshk.cz/vyuka/suseni.aspx>*
- [10] *Vlhkost vzduchu. Ostravská univerzita: Katedra fyziky [online]. Ostrava: Ostravská univerzita, 2005 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <http://artemis.osu.cz/Gemet/meteo2/vlhkost.htm>*
- [11] *MILITKÝ, Jiří. Textilní vlákna: klasická a speciální. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002. ISBN 80-708-3644-X.*

- [12] Ing. Petra Pochmanová, Ing. Ivan Misar, Ph.D. *Kontrolní metody pro stanovení vlhkosti podkladních vrstev podlah.* tzbinfo. [Online] 21. listopad 2011. <https://stavba.tzb-info.cz/podlahy/8050-kontrolni-metody-pro-stanoveni-vlhkosti-podkladnich-vrstev-podlah>.
- [13] *SANACE VLHKÝCH STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ.* České vysoké učení technické v Praze: Katedra materiálového inženýrství a chemie [online]. Praha: ČVUT, 2008 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: https://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/materialy_izolace/prednaskaVIII_IZMA.pdf
- [14] TESTO s.r.o. *Mikrovlonné vlhkoměry MOIST – nedestruktivní a spolehlivé měření vlhkosti stavebních materiálů.* TZB-info. [Online] Topinfo s.r.o., 2. únor 2015. [Citace: 12. duben 2018.] <https://stavba.tzb-info.cz/vlhkost-a-kondenzace-v-konstrukcich/12289-mikrovlonne-vlhkomery-moist-nedestruktivni-a-spolehlive-mereni-vlhkosti-stavebnich-materialu>.
- [15] I & CS spol. sr.o., *Měřicí přístroje: Vlhkoměry*[online]. Markvartice 55, okres Třebíč, 2010 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.e-pristroje.cz/vlhkomery-drevo.html>
- [16] GANN Mess- und Regeltechnik GmbH. *Zjišťování vlhkosti v potěrech a jiných stavebních hmotách - metody měření a měřicí přístroje.* [Online] http://www.videopodlahy.cz/userfiles/files/meranie%20vlhkosti%20gann_cz.pdf
- [17] KOPLÍK, Richard. *Nukleární magnetická rezonanční spektrometrie. Ústav analýzy potravin a výživy* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: https://web.vscht.cz/kopli-kr/NMR_%C4%8D%C3%A1st_1.pdf
- [18] CARTER, Bruce. *OP amps for everyone.* 4. Waltham, USA: Newnes, 2013. ISBN 978-0-12-391495-8.
- [19] BELZA, Jaroslav. *Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky.* Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-060-1.
- [20] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice.* 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1996. ISBN 80-901984-3-0.
- [21] GESCHEIDTOVÁ, Eva, Miloslav STEINBAUER a Jiří REZ. *Měření v elektrotechnice.* Brno: Vysoké učení technické, 2002. ISBN 80-214-1990-3.
- [22] BERKELEY LAB. *Phys* [online]. [cit. 4.1.2020]. Dostupný na WWW: <https://phys.org/news/2005-04-portable-high-resolution-nmr-sensor-unveiled.html>

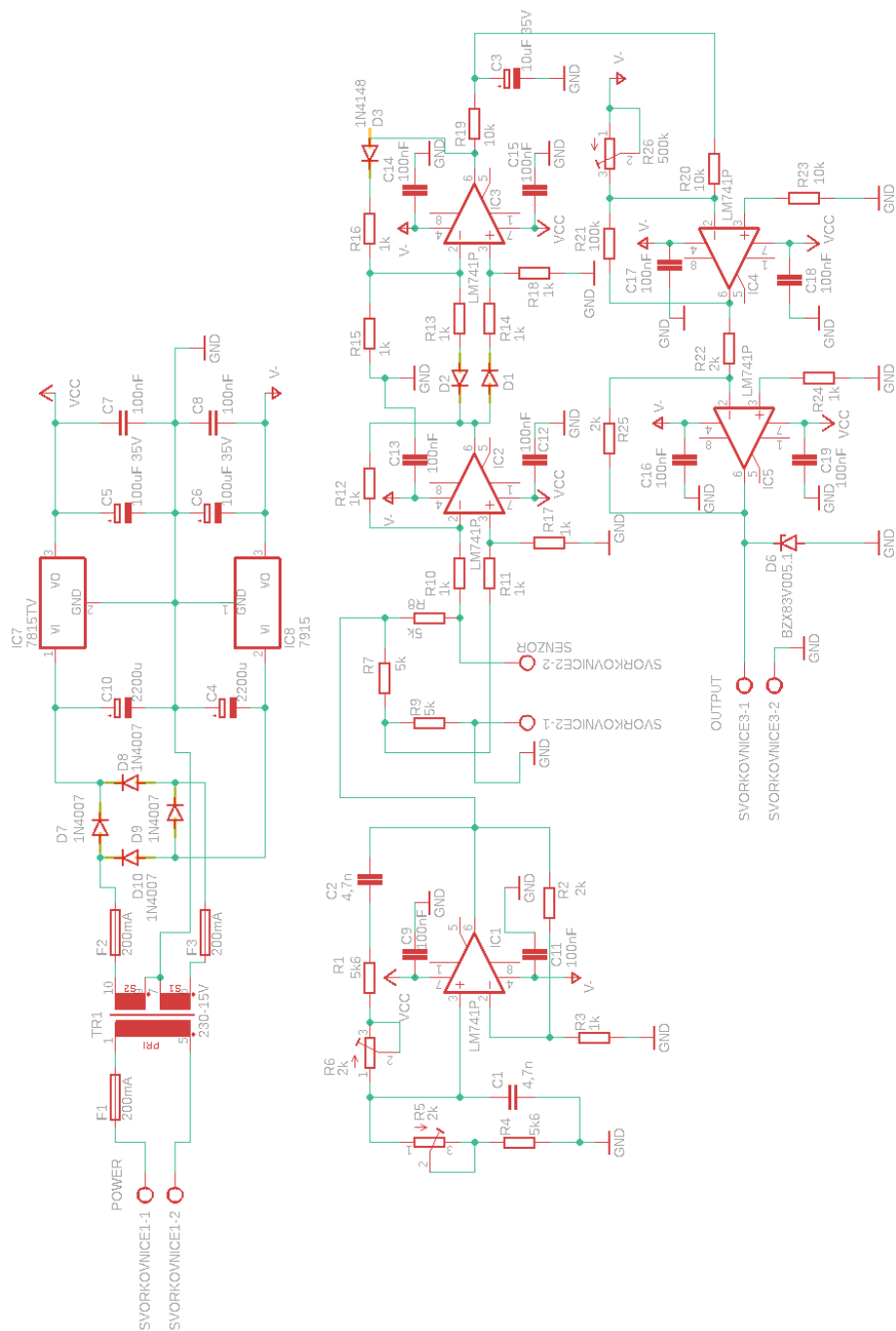
- [23] *Stínící tkanina. Hologram-vyroba [online]. Ostrava: graphicsite.cz, 2011 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://hologram-vyroba.cz/stinici-tkanina-blokujici-em-signal-faradayova-klec>*
- [24] *Měření vlhkosti porézních stavebních materiálů. Tepelné a vlhkostní vlastnosti stavebních materiálů [online]. Praha: ČVUT, 2019 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/TVVM/TVVM4.pdf>*
- [25] *Raut, Akshay & Parker, Charles & Klem, Ethan & Stoner, Brian & Deshusses, Marc & Glass, Jeffrey. (2019). Reduction in energy for electrochemical disinfection of E. coli in urine simulant. Journal of Applied Electrochemistry. 49. 1-11. 10.1007/s10800-019-01292-4.*

Seznam příloh

A	Obvod pro měření vlhkosti	49
A.1	Schéma zapojení měřiče vlhkosti včetně zdroje	49
A.2	Deska plošných spojů - bottom	50
A.3	Osazovací schéma	50
A.4	Seznam použitých součástek	51
B	Konstrukce krabice	52
C	Obsah přiloženého CD	56

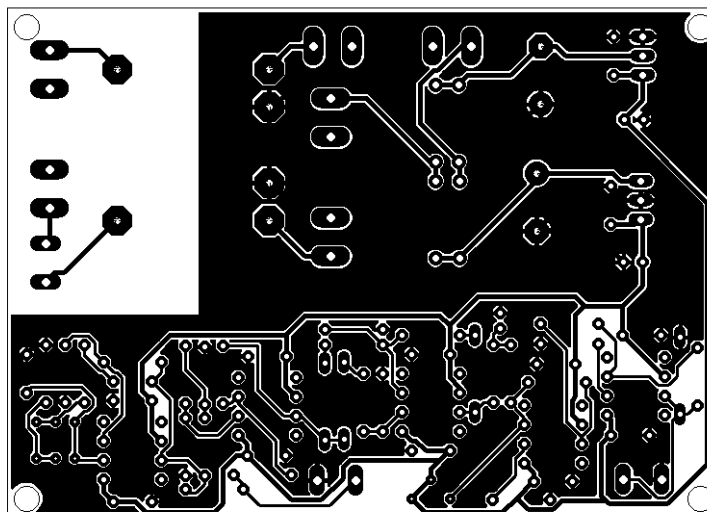
A Obvod pro měření vlhkosti

A.1 Schéma zapojení měřiče vlhkosti včetně zdroje



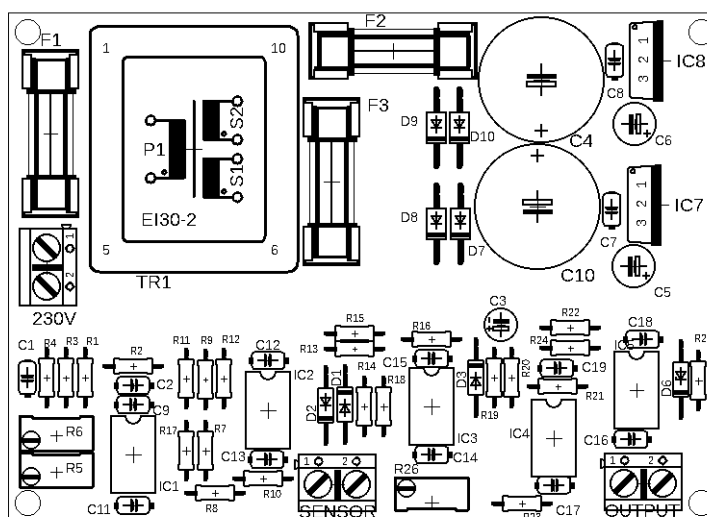
Obr. A.1: Schéma zapojení obvodu pro měření vlhkosti

A.2 Deska plošných spojů - bottom



Obr. A.2: DPS obvodu pro měření vlhkosti

A.3 Osazovací schéma

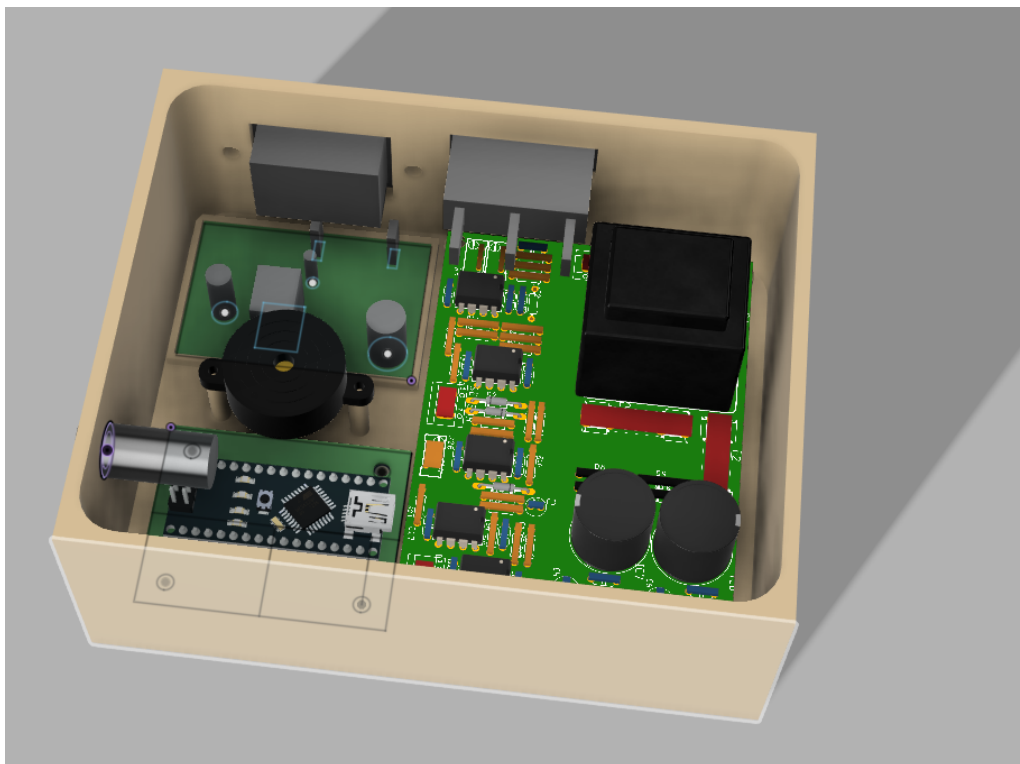


Obr. A.3: Osazovací plán obvodu pro měření vlhkosti

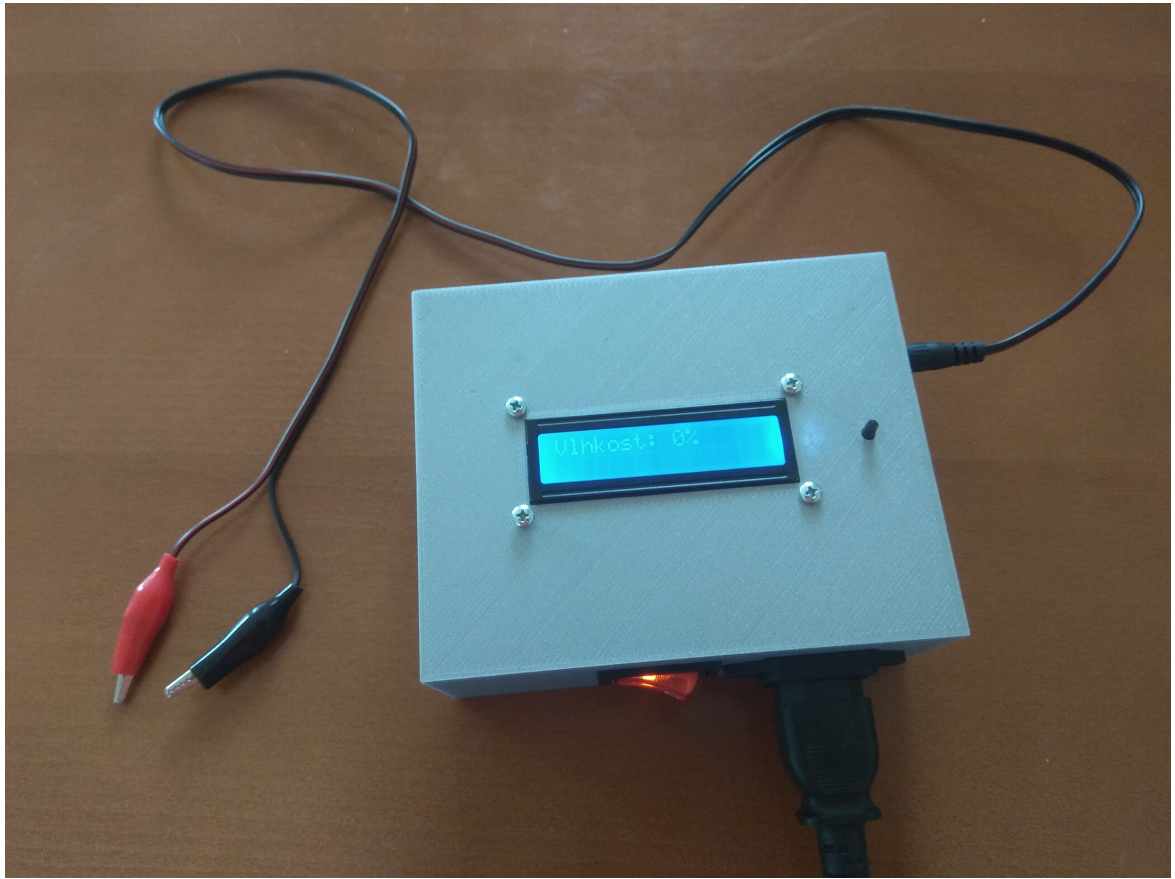
A.4 Seznam použitých součástek

Č.	Počet	Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
1.	11	R3,R10-R18,R24	1k	0204/7	Odpor
2.	3	R2,R22,R25	2k	0204/7	Odpor
3.	3	R7,R8,R9	5k	0204/7	Odpor
4.	2	R1,R4	5k6	0204/7	Odpor
5.	3	R19,R20,R23	10k	0204/7	Odpor
6.	1	R21	100k	0204/7	Odpor
7.	2	R5,R6	2k	RTRIM64W	Trimr
8.	1	R26	500k	RTRIM64Y	Trimr
9.	2	C4,C10	2200uF	E7.5-16	Elektrolytický kondenzátor
10.	1	C3	10uF	E2-4	Elektrolytický kondenzátor
11.	2	C5,C6	100uF	E2,5-6	Elektrolytický kondenzátor
12.	12	C7,C8,C9.C11-C19	100nF	C050-024X044	Keramický kondenzátor
13.	2	C1,C2	4,7nF	C050-024X044	Keramický kondenzátor
14.	3	D1,D2,D3	1N4148	DO35	Dioda
15.	4	D7,D8,D9,D10	1N4007	DO41	Usměrňovací dioda
16.	1	D6	BZX83V005.1	DO35	Zenerova dioda
17.	3	F1,F2,F3	1A	SHK20L	Patice na pojistku
18.	5	IC1,IC2,IC3,IC4,IC5	LM7415	DIL08	Operační zesilovač
19.	1	IC7	7815TV	TO220V	Stabilizátor kladného napětí
20.	1	IC8	7915TV	TO220V	Stabilizátor záporného napětí
21.	3.	Svorkovnice 1-3	-	AK500/2	Svorkovnice
22.	1	TR1	230-15V	EI30-2	Síťový transformátor

B Konstrukce krabice



Obr. B.1: Model zařízení v programu Fusion360



Obr. B.2: Samotné zařízení



Obr. B.3: Senzor



Obr. B.4: Senzor v obalu



Obr. B.5: Měření vlhkosti

C Obsah přiloženého CD

```
/ ..... kořenový adresář přiloženého CD
├── Monitor_vlhkosti_tkaniny.pdf
├── DPS ..... deska plošných spojů
│   ├── humidity.sch
│   ├── humidity.brd
│   ├── DPS_bottom.png
│   ├── DPS_osazeni.png
│   └── seznam_soucastek.txt
├── Konstrukce ..... obrázky konstrukce a návrh
│   ├── navrh.png
│   ├── venek.jpg
│   ├── vnitrek.jpg
│   ├── telo.stl ..... model krabíčky pro tisk
│   └── vrch.stl ..... model víka pro tisk
├── senzor ..... konstrukce senzoru
│   ├── pokus.jpg
│   ├── senzor1.jpg
│   └── senzor2.jpg
├── program ..... Program pro měření vlhkosti
│   └── program.ino
```