

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická

Katedra měření



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Senzor vlhkosti a teploty stavebních
prvků**

Vypracoval: Václav Jánský
Vedoucí práce: Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D.
Datum: Červen 2014



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Václav Jánský**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Senzor vlhkosti a teploty stavebních prvků**

Název tématu anglicky: **Temperature and Moisture Sensor for Building Constructions**

Pokyny pro vypracování:

Nastudujte možnosti měření vlhkosti savých materiálů, zaměřte se na princip měření vodivosti a velkých odporů. Navrhněte a realizujte levný senzor pro měření vlhkosti ve stavebních konstrukcích (primárně dřevo, beton, příp. izolační materiál). Podstatná má být jednoduchost, spolehlivost, dlouhodobá stabilita a cena celého senzoru. Pro měření a zpracování signálů využijte USB DAQ modul. Naprogramujte v LabVIEW aplikaci, která umožní dlouhodobé testování tohoto senzoru včetně ukládání výsledků do souboru a prezentaci dat uživateli. Realizovaný senzor otestujte.

Seznam odborné literatury:

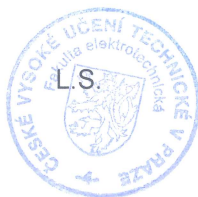
- [1] Vrána, J. a kol.: Technická zařízení budov v praxi. Grada Publishing, Praha 2007, ISBN 978-80-247-1588-9
- [2] Bitter, R., Mohiuddin, T., Nawrocki, M.: LabVIEW Advanced Programming Techniques. CRC Press, 2007, ISBN 978-0-8493-3325-5

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 25. listopadu 2013

Platnost zadání do¹: 30. ledna 2015


Prof. Ing. Vladimír Haasz, CSc.
vedoucí katedry




Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 11. 2013

¹ Platnost zadání je omezena na dobu dvou následujících semestrů.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Václav Jánský

Poděkování

Děkuji Ing. Pavlu Mlejnkoví, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a za podnětné nápady, které ji obohatily.

Václav Jánský

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a realizací senzoru pro měření vlhkosti ve stavebních konstrukcích. Senzor je k počítači připojen přes měřicí kartu myDAQ. Software je naprogramován v NI LabVIEW.

Klíčová slova

Vlhkost, myDAQ, NI LabVIEW, senzor.

Abstract

This thesis deals with design and construction moisture sensor for building constructions. The sensor is connected to computer through data acquisition device myDAQ. Software is programmed with NI LabVIEW.

Keywords

Moisture content, myDAQ, NI LabVIEW, sensor.

Obsah

1	Úvod	1
2	LabVIEW	3
2.1	DAQ	5
3	Popis systému	7
3.1	Zapojení s diodou	8
3.2	Sériové zapojení	9
3.2.1	Matematický popis	9
4	Součásti Bakalářské práce	11
4.1	Hardware	11
4.1.1	myDAQ	11
4.1.2	Kondenzátor	12
4.1.3	Operační zesilovač	14
4.2	Software	14
5	Výsledky	17
6	Závěr	21
A	Fotografie zapojení	25
B	Tabulka vlhkostí	27

Kapitola 1

Úvod

Tématem mé bakalářské práce je návrh a realizace senzoru pro měření vlhkosti ve stavebních materiálech. Cílem je sestavit low-cost přístroj, který bude jednoduchý na ovládání. Senzor není úplná novinka, v komerční sféře ho lze pořídit, ale mnou realizovaný senzor by oproti tomuto komerčnímu měl mít více funkcí. Zejména by měl umět měřit vlhkost různých materiálů (např. dřevo, beton, izolační materiál, apod.), měřit dlouhodobě a výsledky ukládat.

Ačkoliv způsob měření vlhkosti je v komerční sféře známý, vyrábějí se pouze ruční měřicí přístroje, přístroje měřící vlhkost dlouhodobě neexistují. Nejčastěji přístroje fungují na principu kapacitním nebo odporovém. U kapacitního principu se využívá skutečnosti, že hodnota relativní permitivity¹ vody ($\epsilon_r \approx 80$) je několikanásobně větší než hodnota relativní permitivity stavebního materiálu ($\epsilon_r \approx 4$). Způsoby měření permitivity jsou většinou nepřímé, měří se admitance kondenzátoru s dielektrikem.

Přístroje fungující na principu odporového měření měří vysoké hodnoty odporu přes přepočítávání pomocí integrovaných charakteristik. Změna vlhkosti se projevuje změnou jeho měrného odporu. Odpor se při tom mění o několik řádů. Tato velká změna odporu je způsobena přítomností látek iontového charakteru v materiálu, které působením vody disociují. Odpor materiálu při konstantním složení ovlivňuje kromě vlhkosti především teplota. Jelikož vodivost vlhkého materiálu má převážně iontový charakter, mění se odpor s teplotou stejně jako u vodičů druhého řádu a to tak, že při vyšší teplotě klesá. Teplotní koeficient se pohybuje okolo 0,1% vody na 1 °C. Pokud na vlhký materiál připojíme napětí, začne materiálem protékat proud, který však není stálý, časem se zmenšuje. Příčinou je polarizace elektrod. Tento jev se uplatňuje především při větších vlhkostech a vzrůstá také s rostoucím napětím a hustotou proudu. Čidla vlhkoměrů mohou mít různý tvar, ovšem nejčastěji se používají dvě jehlové elektrody. Důležité je vybrat správné místo pro měření, pryskyřice, suky nebo praskliny mohou měření negativně ovlivnit. Také se vlhkost liší uprostřed měřeného materiálu a na povrchu, proto je potřeba umístit

¹relativní permitivita udává kolikrát je permitivita daného prostředí větší než permitivita vakua

elektrody dostatečně hluboko. Výrobci doporučují umístit elektrody alespoň do 1/3 tloušťky měřeného materiálu. Přesnost měření může také ovlivnit vznik elektrostatického náboje.

Senzor vytvořený v rámci této práce se zaměřuje na detekci drobného úniku vody, jako je například kapající potrubí (topení, odpad, vodovod a další) nebo dlouhodobě zvýšené vlhkosti. Oba tyto případy jsou lidskými smysly téměř nedetekovatelné, zejména v dřevostavbách, kde tuto zvýšenou vlhkost absorbuje stavební materiál. Zvýšená vlhkost způsobuje problémy specifické pro tento materiál, a to plísně a dřevokazné houby. Vytvářený senzor by měl předejít těmto havarijním stavům, jejichž působení může v nejhorším zapříčinit drahou výměnu části stavby.

Kapitola 2

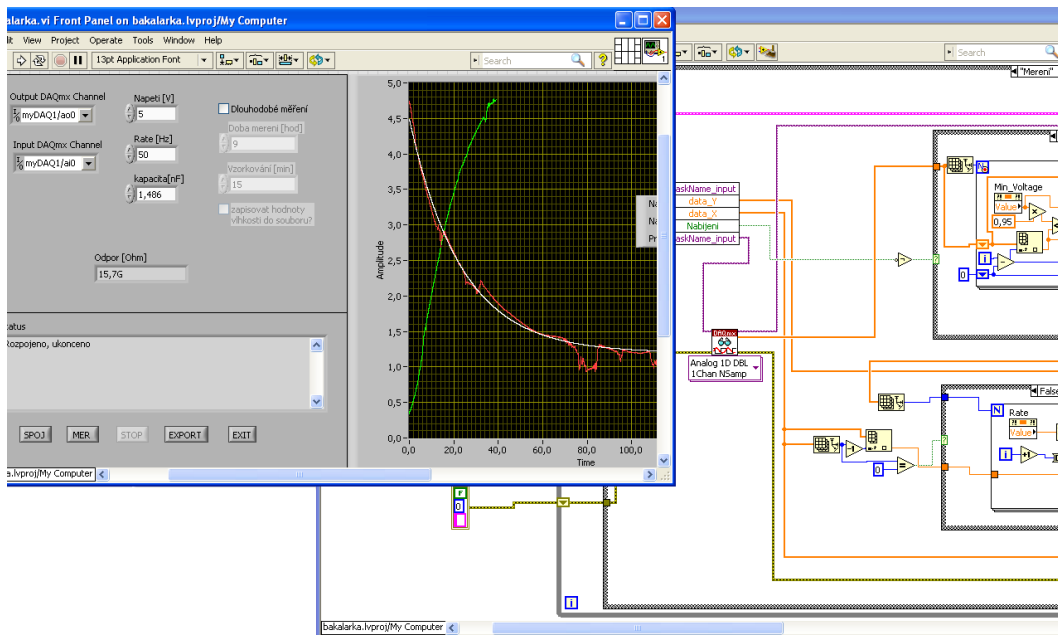
LabVIEW

LabVIEW je zkratkou *L*aboratory *V*irtual *I*nstrument *E*ngineering *W*orkbench. Je to grafické prostředí pro programování měřicích, řídicích, testovacích a jiných aplikací. LabVIEW je vývojové prostředí nad jazykem G, jehož zdrojovým kódem není jako obvykle text, ale obrázek, tedy místo psaní aplikace kreslíme. Vývojové prostředí LabVIEW je vyrobeno firmou National Instruments. Společnost National Instruments byla založena v roce 1976 studenty University of Texas Jamesem Truchardem, Jeffem Kodoskym a Billem Nowlinem. Hlavní impulzem k založení společnosti bylo, že při práci na projektu sběru a analýzy dat pro americké námořnictvo nebyli spokojeni se současnými metodami. Na začátku pracovali s rozhraním GPIB, pomocí kterého se jim povedlo vybudovat firmu, která byla v garáži rodinného domu. Když v roce 1983 propojili rozhraní GPIB s počítačem, začali pracovat na grafickém vývojovém prostředí LabVIEW, jehož první verze vyšla v roce 1986 pro Macintosh¹. V roce 1991 si National Instruments patentovala LabVIEW a v roce 1992 vytvořila první verze i pro Windows a UNIX.

V současné době neexistuje česká verze programu LabVIEW, proto některé výrazy v této práci budou počestělé nebo ponechané v původní podobě. Program vytvořený v LabVIEW nazýváme virtuální přístroj, částečně i proto, že vzhled aplikace vytvořené v LabVIEW připomíná měřicí přístroj. Tento název je přeložen z anglického virtual instrument a je často nahrazován zkratkou VI, kterou v této práci budu používat i já. Každé VI se skládá ze dvou oken, z čelního panelu a blokového diagramu (z anglického front panel a block diagram), jak lze vidět na obrázku 2.1.

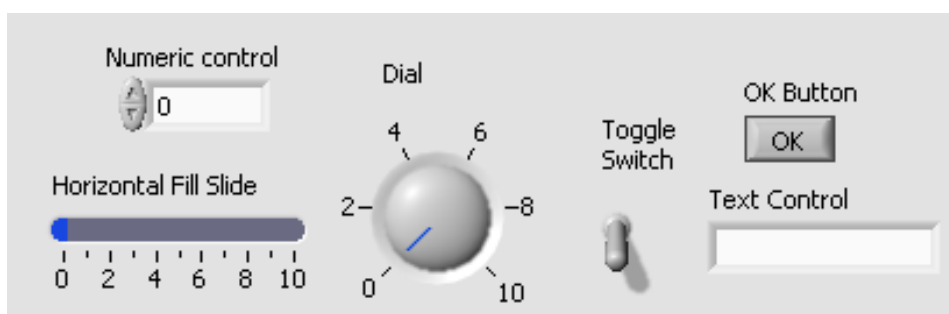
Čelní panel je část, kterou vidí uživatel, určuje vzhled a předává uživatelské instrukce ke zpracování. Obsahuje ovládací prvky (obrázek 2.2), mezi které patří například: číselný ovladač, textový ovladač, přepínače a tlačítka a indikátory (obrázek 2.3), například: textový zobrazovač, číselný zobrazovač, kontrolky a grafy. Každý ovladač nebo indikátor může mít více jak vzhledů (obrázek 2.2 respektive 2.3) tak i stylů (například: Silver, Modern, Clasic a System). Čelní panel lze pomocí dekorací a dalších prvků přizpůsobit

¹V té době byl Macintosh jediný operační systém s grafickým prostředím.

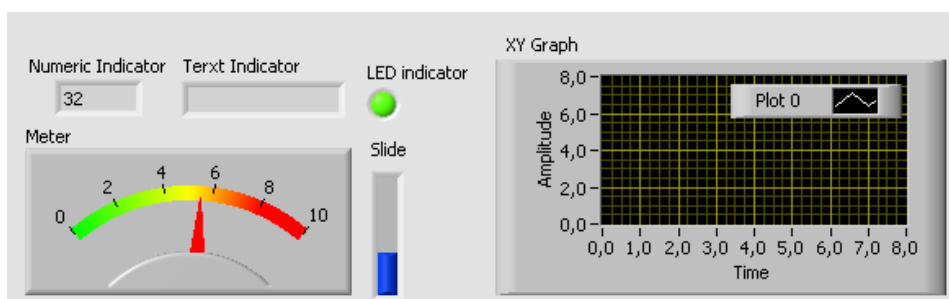


Obrázek 2.1: Front panel a block diagram aplikace

k požadovanému vzhledu. V liště čelního panelu jsou různé funkce pro vzhled daného VI, například: velikost písma nebo zarovnání objektů.



Obrázek 2.2: Příklady ovládacích panelů (vstupů)



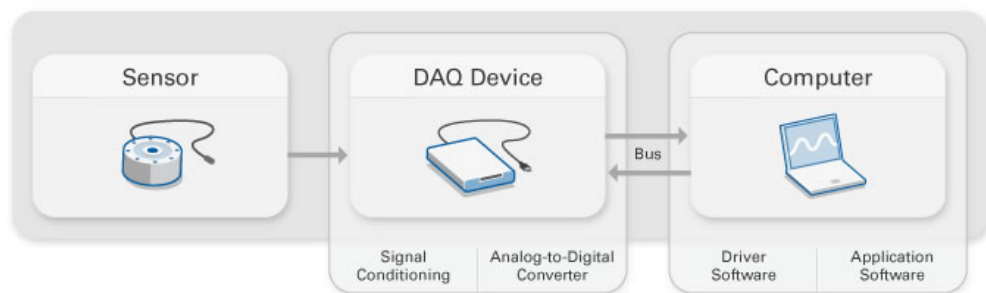
Obrázek 2.3: Příklady indikátorů (výstupů)

Blokový diagram je část se zdrojovým kódem, obsahuje vodiče (data) a bloky, které symbolizují funkce, vstupní data, podprogramy (subVI) a jiné. Vodiče propojují bloky. Každý blok má několik vstupů a výstupů. Tyto funkce dělíme na expresní a nízkoúrovňové (klasické). Expresní funkce je jeden velký blok, který je jednoduchý na použití, ale méně přizpůsobivý než nízkoúrovňové funkce. Pokud chceme stejnou funkci jako dělá funkce expresní pomocí funkcí nízkoúrovňových, musíme jich sice použít více, ale tím lze každou část funkce přizpůsobit požadované vlastnosti programu.

Oproti textovým programovacím jazykům, kde se program vykonává řádek po řádku, má LabVIEW posloupnost vykonání kódu složitější. Tato posloupnost se u grafických vývojových prostředí nazývá tok dat (dataflow). Základní princip je, že průchod dat přes bloky v rámci programu určuje pořadí vykonávání funkcí. Vždy, když všechny vstupy bloku obsahují platná data, je blok vykonán. Když je funkce vykonána, hodnoty na výstupu začnou být platné a přesunou se po drátech na vstupy dalších bloků. Spojením bloků, které mají propojené vstupy a výstupy, dohromady určuje programátor pořadí, ve kterém jsou bloky vykonávány. Často jeden drát vede skrz celé VI a vynucuje pořadí vykonávání bloků (například chybová cluster nebo reference). Pokud běží dvě části kódu najednou, tak se tento jev nazývá paralelismus. Paralelismus je současné zpracování dvou a více vzájemně na datech nezávislých částí zdrojového kódu. V LabVIEW se paralelismus spouští automaticky, pokud se mu chce programátor vyhnout, musí si obdobně jako u dataflow závislost vynutit předáním dat mezi částmi zdrojového kódu.

2.1 DAQ

Systém sběru dat (Data Acquisition System – DAQ) je proces vzorkování změřených signálů a jejich následné převedení do digitální hodnoty, se kterou dokáže pracovat počítač. Naměřené signály jsou obvykle analogové průběhy.



Obrázek 2.4: Příklad systému sběru dat (DAQ), převzato z [1]

System sběru dat obsahuje 3 základní hardwarové součásti:

- **Senzor** převádí měřenou veličinu na měřenosnou veličinu (napětí, proud, amplitudu a jiné)
- **DAQ zařízení** změří analogový průběh na senzoru a následně převádí na digitální hodnotu
- **Počítač** zpracovává data a řídí systém

Kapitola 3

Popis systému

Pojmem vlhkost se rozumí podíl vody v daném materiálu. Hodnota vlhkosti se udává v procentech a vypočte se pomocí rovnice 3.1. Vlhkost dřeva se dělí na vodu volnou, vodu vázanou a vodu chemicky vázanou. Volná voda se nachází v dutinách uvnitř buněk a mezibuněčných prostorech. Vázaná voda vyplňuje mikroskopické dutinky v buněčných stěnách. Při změně hodnoty vázané vody dřevo bobtná nebo sesychá. Hodnota vázané vody závisí na vlhkosti okolního prostředí. Voda chemicky vázaná je součástí chemického složení dřeva, obsahuje ji i suché dřevo.

$$M = \frac{m_v}{m_s} \cdot 100, \quad (3.1)$$

kde M je vlhkost, m_v je hmotnost vody a m_s je hmotnost suchého materiálu.

hodnota vlhkosti [%]	poloha materiálu
30	ve styku s vodou
18 - 25	bednění, lešení
16 - 20	zakryté venkovní konstrukce
13 - 17	zakryté vnitřní konstrukce
12 - 14	dřevo v interiéru
10 - 12	trvale vytápěné místnosti

Tabulka 3.1: hodnoty vlhkosti dřevěné části stavby podle umístění

Základem systému na měření vlhkosti je měření velkého odporu (řádově se pohybuje v desítkách až stovkách gigaohmů). Takto velký odpor není lehké změřit, většina multimetrů měří maximálně hodnoty okolo 100 M Ω jako například Agilent 34401A. Při měření takto velkého odporu teče obvodem malý proud, řádově jednotky nA, což je náročné měřit přesně. V důsledku tohoto předpokladu byly vyřazeny metody měření odporu v závislosti na proudu, jako je například srovnávací metoda nebo Ohmova metoda měření velkých odporů, kde je proud měřen v těsné blízkosti měřeného prvku a na sériové kombinaci

měřeného odporu a ampérmetru je měřeno napětí. Jako nejvhodnější metoda na měření velkých odporů byla zvolena metoda nabíjení nebo vybíjení kondenzátoru přes měřený prvek.

Pro převedení odporu na vlhkost se mi nepovedlo najít žádný vhodný vztah, který by vyřešil tento problém. Jednou možností, jak získat z odporu vlhkost, je získat dostatek dat a interpolovat je, v případě nalezených dat. Druhou možností je kalibrovat přístroj podle naměřených dat. Tato data se nacházejí v příloze B.1. Tyto hodnoty jsou specifické pro teplotu 80 °F (26,67 °C), vzdálenost elektrod 1 – 1,25 palce (2,54 – 3,81 cm) a hloubku zaražení elektrod do dřeva 0,31 palce (0,79 cm). Protože není vždy možné umístit elektrody do uvedené polohy, je nutné v případě jiné polohy naměřený odpor přepočítat pomocí rovnice 3.2.

$$R = \rho \frac{d}{A} \quad (3.2)$$

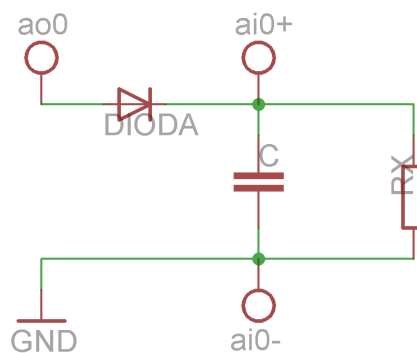
kde R je elektrický odpor (Ω), ρ - elektrická rezistivita (Ωm), d - vzdálenost sond (m), A - plocha sond (m^2). Za předpokladu, že hodnota elektrické rezistivity se nemění v závislosti na poloze elektrod, lze z rovnice 3.2 vyjádřit hodnotu odporu pro námi chtěnou pozici elektrod

$$R = \frac{dAR_n}{d_nA_n}, \quad (3.3)$$

kde hodnoty s indexem n značí naměřené hodnoty.

3.1 Zapojení s diodou

V této metodě, se nabije kondenzátor a měří se na něm hodnota napětí při vybíjení přes měřený materiál. Aby proud netekl zpět do napájení z myDAQu, který byl nastaven na 0 V, byla zapojena v obvodu dioda, která tomu měla zabránit. Schéma tohoto zapojení je na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Schéma obvodu s diodou pro měření

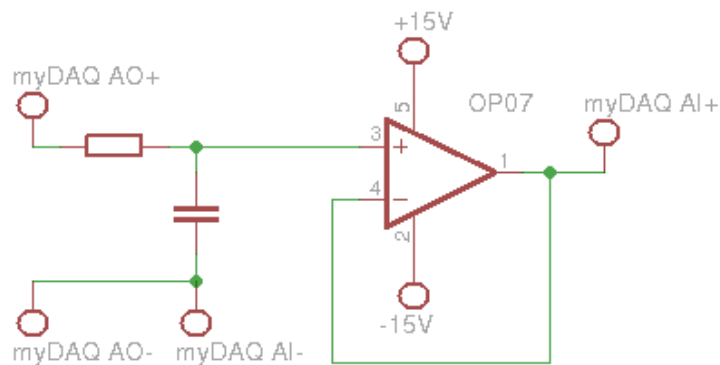
Bohužel nakonec tento postup selhal na tom, že jsem nenašel diodu s dostatečně velkým svodovým odporem¹, měřil jsem tedy odpor diody místo odporu

¹Pokud je dioda zapojena v závěrném směru, tak se chová jako rezistor o velkém odporu, jak velkém nám říká svodový odpor diody.

daného materiálu. Další nepřesnost byla způsobena velkým odběrem proudu analogového vstupu, kde při napětí 5 V tek l proud v řádech jednotek mA.

3.2 Sériové zapojení

V tomto zapojení je kondenzátor zapojený sériově s měřeným materiálem a zdrojem, jak je vidět na obrázku 3.2. Zapojení umožňuje měřit odpor, jak při nabíjení, tak i při vybíjení kondenzátoru. Toho se dá využít pro přesnější odhadování měřeného odporu. Operační zesilovač je zde zapojen jako sledovač. Z důvodu velkého vstupního odporu tohoto zapojení je operační zesilovač využit k oddělení analogového vstupu od obvodu.



Obrázek 3.2: Schéma obvodu pro měření

3.2.1 Matematický popis

Ze schématu na obrázku 3.2, jsem si metodou uzlových napětí vyjádřil základní rovnici, která popisuje daný systém.

$$C \frac{du}{dt} + \frac{u}{R} = 0 \quad (3.4)$$

Pro tuto rovnici je charakteristický polynom ve tvaru

$$\lambda + \frac{1}{CR} = 0 \quad (3.5)$$

a jeho řešení je

$$\lambda = -\frac{1}{CR}. \quad (3.6)$$

Obecné řešení vychází

$$u = k \exp(\lambda t) = k \exp\left(-\frac{t}{CR}\right). \quad (3.7)$$

Pokud rovnici 3.7 počítáme v $t=0$, tak se zjednoduší a hodnota konstanty k je hned vidět

$$u(0) = k. \quad (3.8)$$

Tedy řešením diferenciální rovnice 3.4 je pro vybíjení kondenzátoru

$$u(t) = u(0) \exp\left(-\frac{t}{CR}\right). \quad (3.9)$$

Pro nabíjení se pouze liší počáteční a konečné podmínky

$$u(t) = -u(0) \exp\left(-\frac{t}{CR}\right) + u(0). \quad (3.10)$$

Při měření přechodové charakteristiky napětí na kondenzátoru nejsou pokaždé získána data, která jsou shodná s teoretickými. Často je měření zašuměné nebo ovlivněné chybou měření. K získání parametrů, nejvíce podobné naměřené charakteristice se používá procedura prokládání dat (fitování). Fitování vytváří křivku nebo matematickou funkci z naměřených dat. Ze znalosti obecného vztahu, který odpovídá přechodové charakteristice, lze ze znalosti vstupních a výstupních hodnot získat parametry tohoto vztahu. Existují matematicko-statické metody, podle kterých se dané parametry dopočítávají. Jedna z nejčastěji používaných metod je metoda nejmenších čtverců, která se snaží výsledné řešení minimalizovat součtem druhých mocnin odchylek vůči každé rovnici. Pro exponenciální průběh, který se podle rovnice 3.9 očekává, je obecný vztah

$$u(t) = A \cdot \exp(B \cdot t) + C. \quad (3.11)$$

V závislosti na naměřených datech fitování vrátí koeficienty A , B , C . Pokud tento obecný vztah porovnáme s rovnicí 3.9, lze vidět, že pro výpočet odporu je použit pouze parametr B , pro který platí

$$B = -\frac{1}{CR} \quad (3.12)$$

Ze znalosti parametru B a kapacity kondenzátoru je získán odpor měřeného materiálu.

Kapitola 4

Součásti Bakalářské práce

4.1 Hardware

Základem hardwaru při měření je USB zařízení myDAQ, které obstarává jak napájení obvodu, tak i měření napětí. Klíčovou součástí je ve finálním zapojení kondenzátor, který je nabíjený přes měřený materiál a operační zesilovač pro filtrování parazitních proudů a odstranění klidových proudů AD převodníků.

4.1.1 myDAQ

Měřicí karta myDAQ, představená firmou National Instruments, je levné a přenosné zařízení pro sběr a analýzu dat, je určena pro studijní účely (studentské projekty). Má plnou podporu spolupráce s programovým vybavením firmy National Instruments, tj. LabVIEW, LabWindows/CVI. Karta poskytuje 2 analogové vstupy, 2 analogové výstupy a 8 digitálních vstupů nebo výstupů. Měřicí karta obsahuje dva zdroje. Zejména pro napájení analogových součástek, například: operační zesilovače, je symetrický zdroj o hodnotě ± 15 V, nesymetrický zdroj má hodnotu $+5$ V a je často používán jako napájení digitálních součástek, například: logických obvodů. Celkový výkon digitálních výstupů, analogových výstupů a zdrojů je omezen na 500 mW. Propojení měřicí karty s počítačem je pomocí USB kabelu typu A-B. MyDAQ lze také použít jako multimetr s pomocí programů od National Instruments, například NI ELVISmx.

Analogové výstupy (AO) – Karta obsahuje dva analogové výstupy, které mají společný jeden digitálně analogový převodník (DAC), který je schopen obnovovat signál na výstupu rychlostí 200 kS/s. Jednotlivými výstupy lze nastavovat signál v rozsahu ± 10 V.

Analogové vstupy (AI) – Karta obsahuje dva analogové vstupy, které jsou multiplexovány a přivedeny na jeden analogově digitální převodník (ADC). Převodník je schopen obnovovat signál na vstupu rychlostí maximálně 200 kS/s. Tyto kanály mohou být nastaveny jako vysoko-impedanční dife-

renční vstupy nebo jako audio vstupy. Jednotlivými vstupy lze měřit signál v rozsahu ± 10 V.

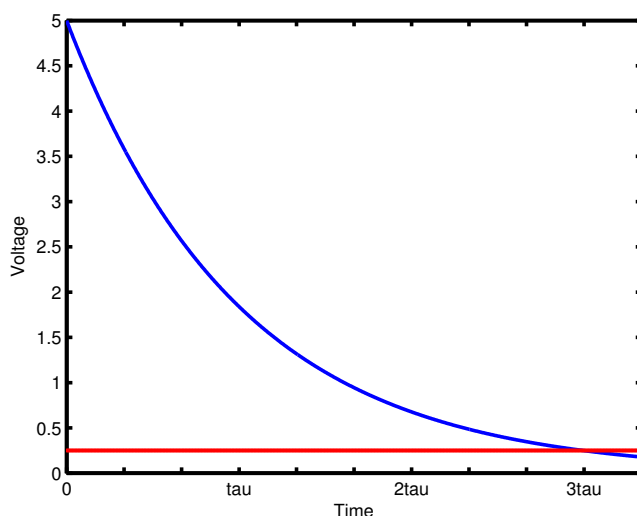


Obrázek 4.1: Měřicí karta myDAQ, převzato z [1]

4.1.2 Kondenzátor

Podle [2] se hodnoty pro vlhkost 20% pohybují v rozsahu od $0,5 \text{ M}\Omega$ do $6,3 \text{ M}\Omega$ v závislosti na materiálu. Tento interval je dostatečně malý, proto výběr reprezentativního prvku bude mít na výpočet minimální vliv. Zvolil jsem $3 \text{ M}\Omega$. Pro vlhkost 7% je interval značně větší – od $12,5 \text{ G}\Omega$ do $700 \text{ G}\Omega$, ovšem to je pouze pro několik materiálů, u naprosté většiny se pohybuje od $20 \text{ G}\Omega$ do $40 \text{ G}\Omega$, proto jsem jako průměr zvolil $30 \text{ G}\Omega$. Kondenzátor se nabíjí na 95% vstupního napětí. Napětí dosáhne hodnoty 95% vstupního napětí přibližně v čase 3τ , kde pro RC článek platí $\tau = RC$, jak lze vidět na obrázku 4.2. Po tomto čase se už hodnoty fitované křivky mění minimálně, není tedy potřeba dále pokračovat v měření. Pro reálné použití senzoru by doba měření neměla přesáhnout cca 1 minutu, aby byly zajištěny konstantní podmínky měření a zároveň byla zajištěna rozumná časová odezva. Z tohoto předpokladu pro $30 \text{ G}\Omega$ vychází velikost kondenzátoru $0,6 \text{ nF}$. Pro univerzální použití je vhodné volit velikost kondenzátoru řádově jednotky nF.

Po zvolení velikosti použitého kondenzátoru 1 nF , je možné použít kondenzátory buď keramické, nebo fóliové. V tabulce 4.1 jsou uvedeny údaje několika kondenzátorů, ze kterých byl jako nejvhodnější produkt firmy Faratronic. Pro kondenzátory od firmy Faratronic rozhodla jejich přesnost, tolerance je zde pouze 5%. Velikost kondenzátoru závisí na velikosti odporu, který se bude měřit. Z rovnice 3.9 lze vyjádřit hodnotu kondenzátoru.



Obrázek 4.2: Hodnota 3τ a hodnota napětí při ukončení měření

Název	Hitano CK 10n/100V	Faratronic CF1-10n/J	Wima MKS02-10n/63V
C [nF]	10	10	10
ztrátový úhel ($\tan \delta$)	$15 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
tolerance [%]	20	5	10
typ	Keramický	Fóliový	Fóliový

Tabulka 4.1: Hodnoty pro vybírané kondenzátory

$$C = \left| \frac{-t}{R \ln \left(\frac{u(t)}{u(0)} \right)} \right|. \quad (4.1)$$

Čas nabíjení kondenzátoru lze vyjádřit z rovnice 3.9

$$t = \left| RC \cdot \ln \left(\frac{u(t)}{u(0)} \right) \right| \quad (4.2)$$

Pro výše odůvodněnou hodnotu odporu měřeného materiálu $30 \text{ G}\Omega$ lze pro zvolený kondenzátor $C = 1 \text{ nF}$ vypočítat čas z rovnice 4.2.

$$t = \left| 30 \cdot 10^9 \cdot 1 \cdot 10^{-9} \cdot \ln \left(\frac{0,25}{5} \right) \right| \doteq 90 \text{ s} \quad (4.3)$$

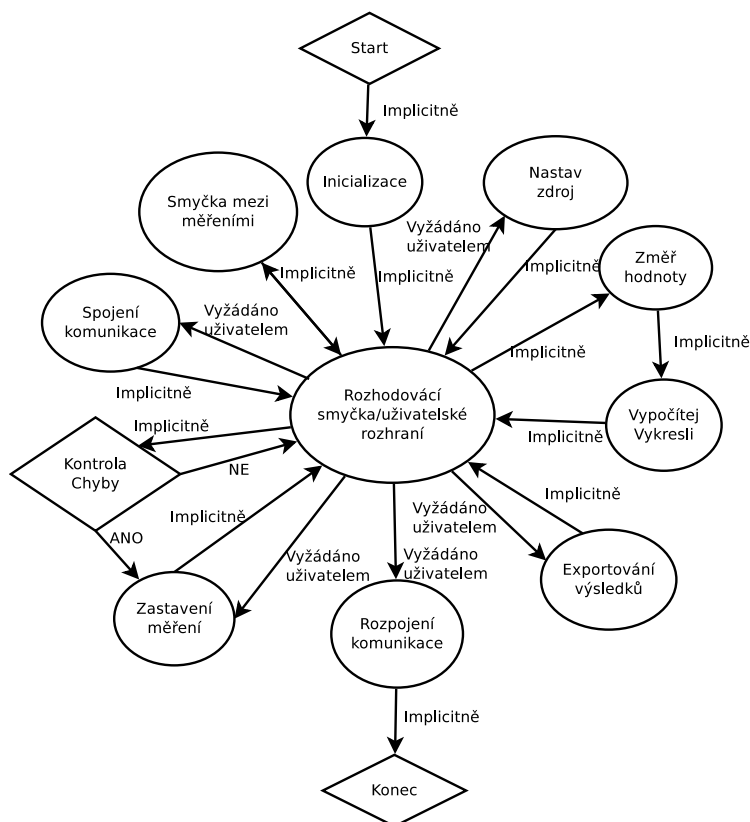
Pokud by tento kondenzátor byl nabíjen přes vlhký materiál o odporu $3 \text{ M}\Omega$, jeho doba nabití je 10 ms . Při takto rychlých měřeních je potřeba přizpůsobit frekvenci měření pro získání alespoň 10 hodnot. V opačném případě nebude možné vypočítat přesné hodnoty.

4.1.3 Operační zesilovač

Operační zesilovač je zapojen jako sledovač. Z důvodu velkého vstupního odporu tohoto zapojení je operační zesilovač využit k oddělení analogového vstupu od obvodu a tím odstraní klidové proudy, které by tekly do analogového vstupu myDAQu. Zvolený OP07 má vstupní proud maximálně 2nA.

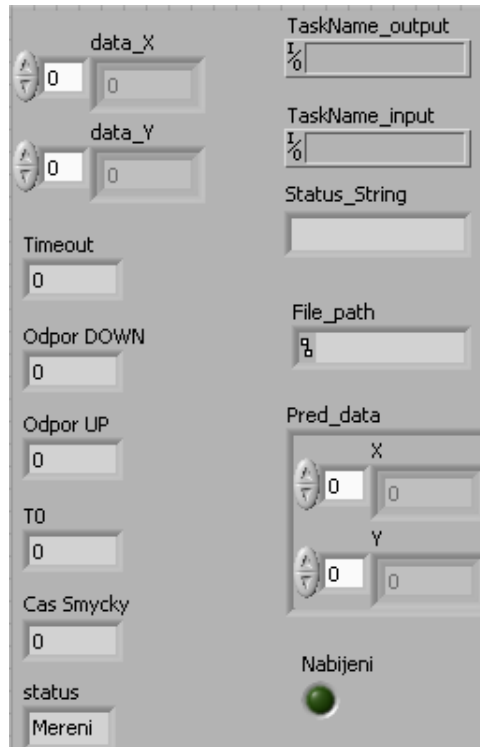
4.2 Software

Jádrum měřicího programu je stavový automat. Je uskutečněn while cyklem, ve kterém se mění stavy podle potřeby. Stavový automat je složen z 11 stavů jako například inicializace, měření, výpočet, export, spojení se zařízením a další. Na obrázku 4.3 jsou vidět všechny stavy i s pořadím, v jakém mohou následovat. Stavovým automatem prochází 3 důležité datové proměnné – datový cluster, proměnná pro následující stav a chybový cluster.



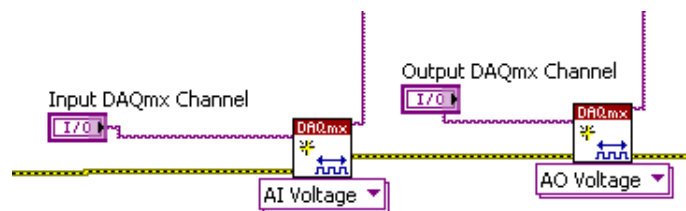
Obrázek 4.3: Vývojový diagram stavového automatu

Na obrázku 4.4 lze vidět obsah datového clusteru. Obsahuje pole pro čas i pro napětí, názvy vstupního i výstupního kanálu měřicího zařízení, prostor pro uložení dat z první části měření, string, který se v každé smyčce vypisuje do textového pole, enum pro kontrolu statusů, hodnotu timeoutu ve stavu na čekání tlačítek, boolean pro zjištění, zda nabíjím nebo vybíjím, místo pro uložení naměřených odporů, počáteční časy smyčky a měření a nakonec cestu k logování odporů.



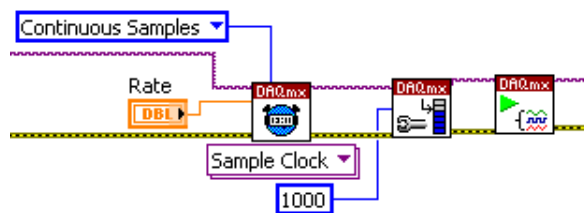
Obrázek 4.4: Obsah datového clusteru

Spojení komunikace mezi počítačem a myDAQem lze vidět na obrázku 4.5. Spojení se vytvoří pomocí funkce DAQmx create channel, kde v rozbalovacím seznamu pod ikonkou můžeme vybrat typ kanálu (na obrázku 4.5 je to vlevo analogový vstup a vpravo analogový výstup). Adresu přístrojů získají funkce od uživatele.



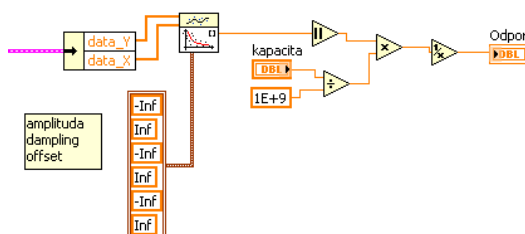
Obrázek 4.5: Spojení komunikace s měřicí kartou

Na obrázku 4.6 je vidět nastavení vstupního kanálu. V prvním bloku se nastavuje frekvence odebrání vzorků (Rate) a kolik vzorků je očekáváno (Continuous samples), druhý blok nastavuje velikost bufferu, do kterého myDAQ data ukládá a třetí pouští měření.



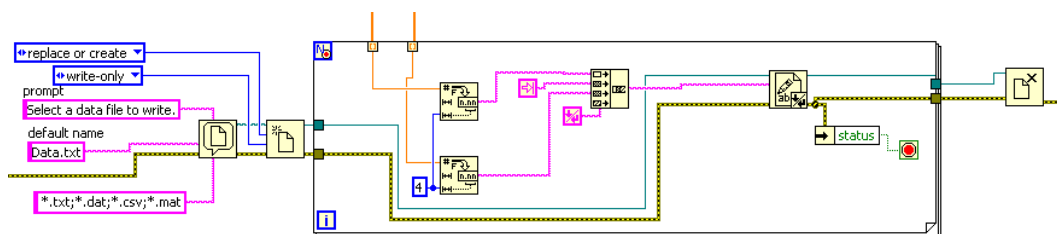
Obrázek 4.6: Nastavení vstupního kanálu

Jak se v LabVIEW fituje exponenciální funkce, ve formátu rovnice 3.11, lze vidět na obrázku 4.7. Vstupem do fitovací funkce jsou x-ová, y-ová data a rozsah parametrů funkce, výstupem je amplituda (A), tlumení (B) a offset (C) grafu. Z těchto výstupů se využívá pro dopočtení odporu pouze tlumení. Algoritmus na výpočet odporu z tlumení je hned za fitovací funkcí.



Obrázek 4.7: Fitovací funkce a algoritmus pro výpočet odporu

Na obrázku 4.8 je vidět, jak probíhá export dat. Blok vlevo vyvolá dialogové okno, kde se zvolí cesta k souboru, do kterého se bude zapisovat. V tomto bloku se dají nastavit defaultní hodnoty názvu souboru nebo složky, ve které se dialogové okno otevře. Tento blok poté předá dalšímu cestu ke zvolenému souboru, který se ho pokusí otevřít, vytvořit, nebo nahradit podle zvolené možnosti. Poté předá refnum a chybový cluster for smyčky, kam jsou přivedeny i vstupní data. Data se pomocí funkcí **number to string** překonvertují na string a pomocí funkce **concatenate** se vytvoří jeden dlouhý řetězec, který se zapíše do souboru. For cyklus se opakuje, dokud nedojdou data nebo se nestane chyba při zápisu do souboru. Po vykonání smyčky for se soubor uzavře.



Obrázek 4.8: Export naměřených hodnot

Kapitola 5

Výsledky

Pro přesnější výsledky bylo potřeba proměřit, jak přesně jsou vyrobeny kondenzátory, výrobce udává 5% což se může pro velké odpory znásobit a dojít k velké nepřesnosti. V dalším textu budu používat katalogové označení kvůli přehlednosti.

hodnota určená výrobcem [nF]	reálně naměřená hodnota [nF]
2,2	2,176
1,5	1,486
3,3	3,27
1	0,982
10	9,74

Tabulka 5.1: Přesné hodnoty kapacity kondenzátorů

Pomocí multimetru Agilent 34401A byly určeny referenční hodnoty odporů. Bylo provedeno přibližně 10 měření pro každý kondenzátor a odpor, hodnoty byly zprůměrovány. Z provedeného měření těchto referenčních odporů pomocí

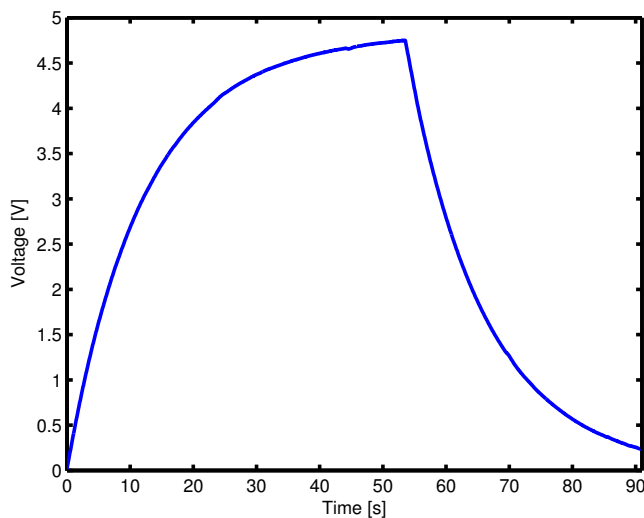
	R [MΩ]				
R _{ref} [MΩ]	C = 1 nf	C = 1,5 nf	C = 2,2 nf	C = 3,3 nf	C = 10 nf
102,6	104,63	104,21	102,92	102,37	102,00
205,1	207,92	206,63	206,09	204,42	203,67
307,4	309,75	308,37	306,50	307,17	306,13
409,4	411,73	410,34	408,63	407,92	406,79
521,7	521,33	523,45	522,34	519,46	519,09

Tabulka 5.2: Měření přesnosti kondenzátorů na referenčních odporech

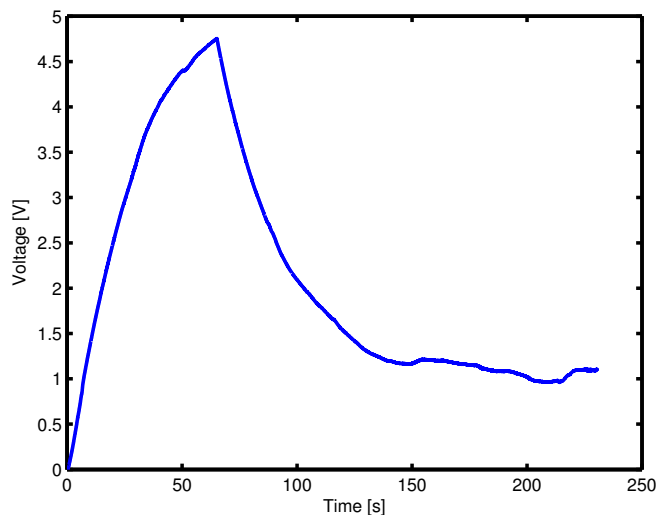
kondenzátorů o různých velikostech, lze vidět, že přesnosti různých kondenzátorů se od sebe liší velmi málo. Výběr kondenzátoru pro dlouhodobé měření

tedy není ovlivněn přesností, ale dobou, po jakou budeme chtít provádět jedno měření.

V následujícím měření (obrázek 5.1) byl proměřen suchý dubový kvádr, v němž byly umístěné elektrody ve vzdálenosti 2,9 cm a hloubce 7 mm. Přes měřený odpor byl nabíjen kondenzátor o kapacitě 1,5 nF. Výsledný odpor naměřený aplikací je 12 G Ω , podle přílohy B.1 odpovídá naměřenému odporu 7,3% vlhkosti. Průběh, až na jednu drobnou nepřesnost, odpovídá teoretickým hodnotám. Takto přesný průběh se podaří naměřit výjimečně, většinou se vyskytne chyba měření, jako na příklad na obrázku 5.2.



Obrázek 5.1: Naměřené hodnoty napětí, měřený vzorek – dub

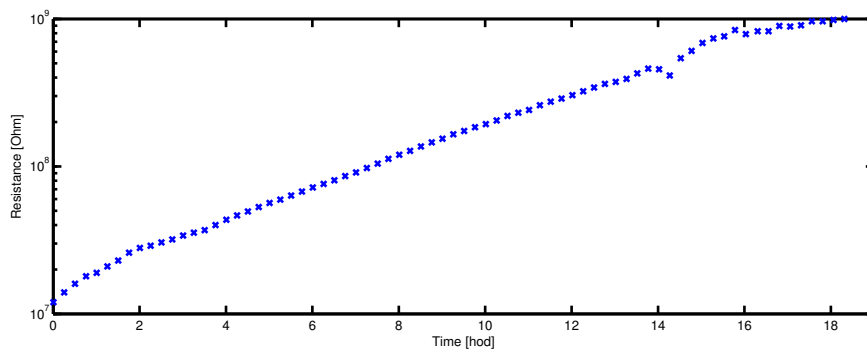


Obrázek 5.2: Naměřený průběh napětí na kondenzátoru 1,5 nF, měřený vzorek – dub

Zde byl měřen opět dub, ale tentokrát ještě trochu víc vysušený. Nabíjení kon-

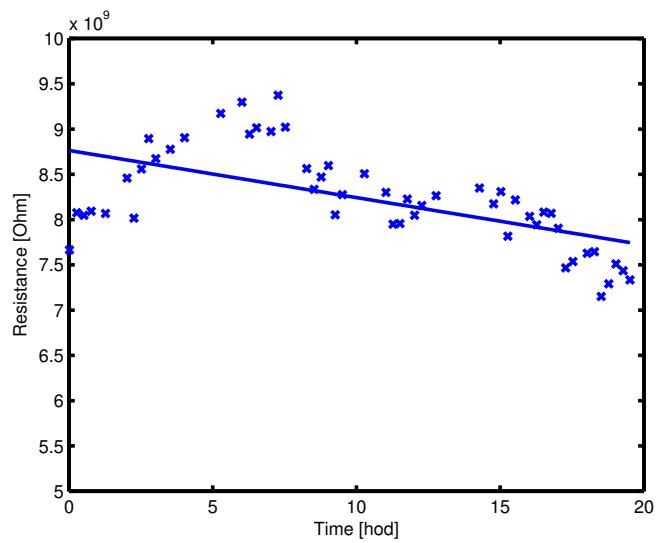
denzátoru proběhlo v pořádku, ale při vybíjení klesl proud pod hodnotu vstupního proudu operačního zesilovače, který začal kondenzátor nabíjet. Proto hodnota napětí neklesala, ale zůstala na hodnotě přibližně 1 V. Ačkoliv druhé měření bylo ovlivněno chybou, rozdíl mezi těmito měřeními nebyl velký, u druhého měření naměřila aplikace 13 M Ω .

V další části bylo naměřeno několik desítek těchto přechodových charakteristik za sebou. Na obrázku 5.3 lze vidět změnu odporu v závislosti na množství vody přítomné v dřevěném prvku. V tomto případě byl vzorek modřínu ponořen na den do vody. Poté, co byl z vody vyjmut na něm začalo měření. Na začátku je vidět přesnou přechodovou charakteristiku vysychání měřeného prvku. Čím prvek více vysychal, tím se odpor měřeného prvku zvyšoval. Konec měření je ovlivněn denním ruchem u měření. Do měření se projevilo větrání pokoje, zvýšení teploty vlivem slunečního záření nebo i lehké otřesy způsobené pouhým projitím kolem místa, kde měření probíhalo.



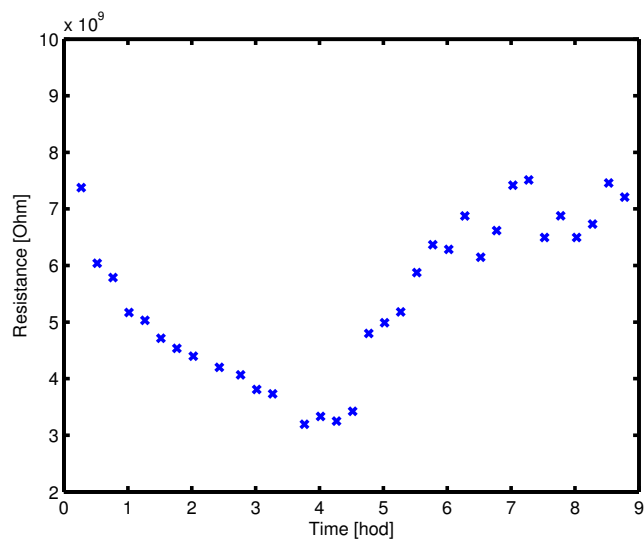
Obrázek 5.3: Naměřené hodnoty přechodové charakteristiky vysychání materiálu, měřený vzorek – modřín

Na obrázku 5.4 lze vidět měření nezávislé na množství vody v měřeném prvku. V tomto měření byl zkoumán vliv dalších faktorů, které mohou ovlivnit měření, například teplota. Měření začalo kolem 8. hodiny večerní v pokoji orientovaném na západ. Přes noc začala teplota klesat a rostl odpor měřeného prvku. Ráno když se začalo oteplovat odpor klesal. Nejnižší odpor byl naměřen kolem 16. hodiny, kdy do pokoje svítí slunce nejintenzivněji. Čas měření od 20 hodin do 16 hodin byl zvolen úmyslně, protože v tomto čase je v pokoji největší klid, tedy měření nebylo tolik ovlivněno denním ruchem.



Obrázek 5.4: Naměřené hodnoty závislosti odporu na denní teplotě

V měření jehož data lze vidět na obrázku 5.5 se napřed měřený prvek ponořil přibližně na 3,5 hodiny do přibližně 2 cm hluboké vody. To značí na začátku snižování odporu. Po 3,5 hodinách byl z vody vyndán aby vysychal na vzduchu. To ukazuje zvětšování odporu v druhé půlce grafu.



Obrázek 5.5: Naměřené hodnoty závislosti na vlhkosti materiálu

Kapitola 6

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat senzor pro měření vlhkosti ve stavebních konstrukcích. Při návrhu senzoru bylo definováno následující

- jednoduchost
- spolehlivost
- dlouhodobá stabilita
- cena senzoru.

Práce v úvodu vysvětluje princip měření vlhkosti. Toto vysvětlení slouží k pochopení řešené problematiky v předchozích kapitolách. K řešení zadaného úkolu byly vybrány produkty firmy National Instruments, která nejenže celosvětový trh ve sběru dat vytvářela, ale také je dlouhodobě špičkou ve svém oboru.

V rámci bakalářské práce byl v prostředí LabVIEW vytvořen program, který komunikuje pomocí knihovny DAQmx s měřicí kartou myDAQ. Také byl navrhnout a realizován senzor pro měření vlhkosti. První zapojení (viz obrázek 3.1) ještě nebylo úspěšné pro velké odpory, ale druhým návrhem (viz obrázek 3.2) se počáteční nedostatky vyřešily. Vývoj této aplikace je detailně popsán v této práci.

Vytvořený senzor je dlouhodobě stabilní, jak lze vidět ve výsledcích, dokáže měřit 20 hodin v kuse než byl přerušen uživatelem. Senzor se skládá ze dvou součástí a povrchu do kterého se dají uchytit, ať už nepájivé pole nebo plošný spoj, proto se dá považovat jako jednoduchý. Cena operačního zesilovače a kondenzátoru se celkově pohybuje přibližně 15 korun. Do této hodnoty by se také měla zahrnout cena nepájivého pole na kterém je teď senzor realizován.

Z časových důvodů se nepodařilo vylepšit senzor. Mezi možné vylepšení patří přesunutí z nepájivého pole na plošný spoj, tím by se zmenšila velikost senzoru. Také by bylo vhodné senzor kalibrovat. Kalibrace potřebuje velké množství hodnot, na jejichž naměření nebyl čas. Pro každý materiál měřit vlhkost alespoň v rozsahu 5% – 30%. Měření dřeva je ovlivněno i směrem měření,

ve směru letokruhů je naměřen jiný odpor než ve směru kolmém na letokruhy. Po těchto vylepšeních se naskytuje možnost vytvořit senzorovou síť, která bude monitorovat celý objekt. Zejména místa náchylná k vyšší vlhkosti.

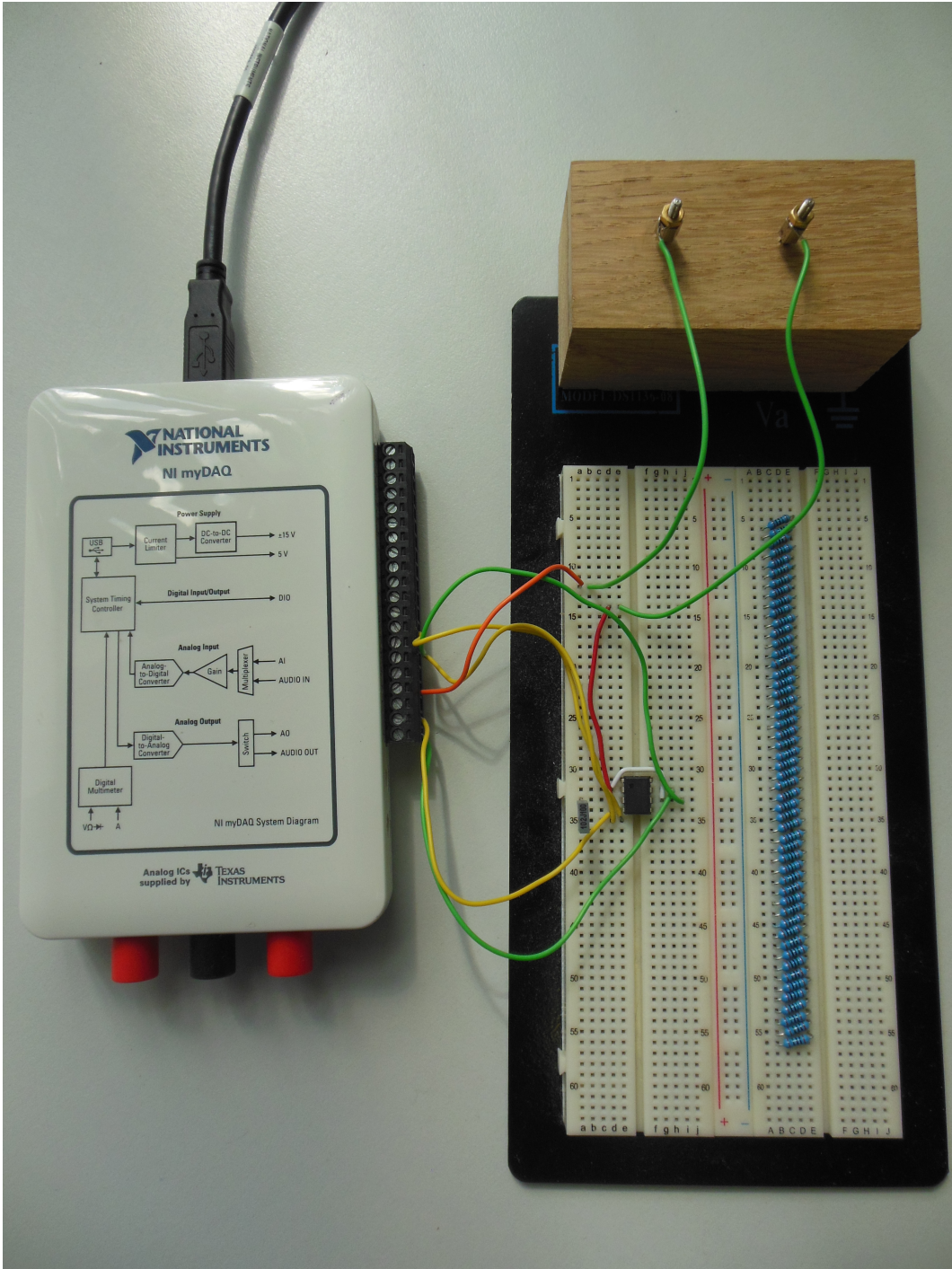
Tento senzor má budoucnost zejména u dnešních novostaveb, kde si majitelé všimnou zvýšené vlhkosti až podle plísně nebo jiného havarijního stavu.

Literatura

- [1] National instrument. <http://www.ni.com/>.
- [2] William L. James. *Electric Moisture Meters for Wood*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-6, Madison, 1988. <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr06.pdf>.
- [3] Josef Fexa and Karel Široký. *Měření vlhkosti*, volume 1. vyd. SNTL, Praha, 1983.
- [4] Petr Klouda. *Základní vlastnosti dřeva*. <http://strechy-klouda.eu/files/prezentace/zakladni-vlastnosti-dreva.pdf>.
- [5] Duff J. E. *A Probe for Accurate Determination of Moisture Content of Wood Products in Use*. U.S. Forrest Service Research Note FPL-0142, 1966. <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrn/fplrn0142.pdf>.
- [6] *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. U.S. Forrest Service, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010. http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf.
- [7] Greisinger. *Návod k obsluze pro odporový měřič vlhkosti materiálů GMR 100*. <http://www.greisinger.info/soubor.aspx?id=118&pid=10>.
- [8] National Instrument. *USER GUIDE AND SPECIFICATIONS NI myDAQ*. <http://www.ni.com/pdf/manuals/373060e.pdf>.

Příloha A

Fotografie zapojení



Obrázek A.1: Fotografie navrženého senzoru vlhkosti

Příloha B

Tabulka vlhkostí

Table 1 – The average electrical resistance along the grain of several species of wood at different levels of moisture content¹

Species of wood	Moisture content (pct)																								
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25						
	Resistance (MΩ)																								
Conifers																									
Baldypress	12,600	3,980	1,410	630	265	120	60	33	18.6	11.2	7.1	4.6	3.09	1.78	1.26	0.91	0.66	0.51	0.42						
Douglas-fir (coast region)	22,400	4,780	1,660	630	265	120	60	33	18.6	11.2	7.1	4.6	3.09	1.78	1.26	0.91	0.66	0.51	0.42						
Fir, California red	31,600	6,760	2,000	725	315	150	83	48	28.8	18.2	11.8	7.6	5.01	3.31	2.29	1.58	1.15	.83	.63						
Fir, white	57,600	15,850	3,980	1,120	415	180	83	46	26.9	16.6	11.0	6.6	4.47	3.02	2.14	1.55	1.12	.86	.62						
Hemlock, eastern	—	120,000	20,000	4,300	1,300	450	200	100	45.0	25.0	14.0	8.8	5.40	3.50	2.30	1.60	1.10	.78	.57						
Hemlock, western	22,900	5,620	2,040	850	400	185	98	51	28.2	16.2	10.0	6.0	3.89	2.52	1.58	1.05	.72	.51	.37						
Larch, western	39,800	11,200	3,980	1,445	560	250	120	63	33.9	19.9	12.3	7.6	5.02	3.39	2.29	1.62	1.20	.87	.66						
Pine, jack	450,000	52,000	9,500	2,800	1,000	440	210	110	60.0	35.0	21.0	13.0	8.80	5.80	3.80	2.60	1.80	1.30	.98						
Pine, longleaf	25,000	8,700	3,160	1,320	575	270	135	74	41.7	24.0	14.4	8.9	5.76	3.72	2.46	1.66	1.15	.79	.60						
Pine, red	700,000	100,000	17,000	4,300	1,300	470	210	100	52.0	28.0	16.0	10.0	6.80	4.40	2.80	1.90	1.20	.91	.67						
Pine, white	20,900	5,620	2,090	850	405	200	102	58	33.1	19.9	12.3	7.9	5.01	3.31	2.19	1.51	1.05	.74	.52						
Pine, ponderosa	39,800	8,910	3,310	1,410	645	300	150	81	44.7	25.1	14.8	9.1	5.62	3.55	2.34	1.62	1.15	.87	.69						
Pine, shortleaf	43,600	11,750	3,720	1,350	560	255	130	69	38.9	22.4	13.8	8.7	5.76	3.80	2.63	1.82	1.29	.93	.66						
Pine, sugar	22,900	5,250	1,660	645	280	140	76	44	25.7	15.9	10.0	6.6	4.36	3.02	2.09	1.48	1.05	.75	.56						
Redwood	22,400	4,680	1,550	615	250	100	45	22	12.6	7.2	4.7	3.2	2.29	1.74	1.32	1.05	.85	.71	.60						
Spruce, black	700,000	90,000	16,000	4,300	1,400	580	250	120	68.0	38.0	23.0	14.0	9.60	6.30	4.30	3.00	2.10	1.40	1.00						
Spruce, Sitka	22,400	5,890	2,140	830	365	165	83	44	25.1	15.5	9.8	6.3	4.27	3.02	2.14	1.58	1.17	.91	.71						
Hardwoods																									
Ash, black	14,000	2,300	600	200	85	40	20	10	6.0	3.4	2.1	1.3	.90	.60	.42	.32	.25	.20	.17						
Ash, white	12,000	2,190	690	250	105	55	28	14	8.3	5.0	3.2	2.0	1.32	.89	.63	.50	.44	.40	.40						
Aspen, bigtooth	300,000	24,000	4,000	1,100	360	150	60	30	16.0	8.6	5.0	3.1	2.00	1.30	.88	.61	.43	.33	.26						
Basswood ²	36,300	1,740	470	180	85	45	27	16	9.6	6.2	4.1	2.8	1.86	1.32	.93	.69	.51	.39	.31						
Birch ³	87,000	19,950	4,470	1,290	470	200	96	53	30.2	18.2	11.5	7.6	5.13	3.55	2.51	1.78	1.32	.95	.70						
Birch, paper	200,000	24,000	5,000	1,400	550	230	110	57	30.0	17.0	10.0	6.0	4.00	2.50	1.70	1.10	.81	.59	.43						
Elm, American	18,200	2,000	350	110	45	20	12	7	3.9	2.3	1.5	1.0	.66	.48	.42	.40	.40	.40	.40						
Hickory ⁴	—	31,600	2,190	340	115	50	21	11	6.3	3.7	2.3	1.5	1.00	.71	.52	.44	.40	.40	.40						
Khaya ⁵	44,600	16,200	6,310	2,750	1,260	630	340	180	105.0	60.2	35.5	21.9	14.10	9.33	6.16	4.17	2.82	1.99	1.44						
Magnolia ²	43,700	12,600	5,010	2,040	910	435	205	105	56.2	29.5	16.2	9.1	5.25	3.09	1.86	1.17	.74	.50	.32						
Mahogany (<i>Swietenia</i>)	20,900	6,760	2,290	870	380	180	85	43	22.4	12.3	7.2	4.4	2.69	1.66	1.07	.72	.49	.35	.26						
Maple, sugar	72,400	13,800	3,160	690	250	105	53	29	16.6	10.2	6.8	4.5	3.16	2.24	1.62	1.23	.98	.75	.60						
Oak, northern red ⁴	14,400	4,790	1,590	630	265	125	63	32	18.2	11.3	7.3	4.6	3.02	2.09	1.45	.95	.80	.63	.50						
Oak, white	17,400	3,550	1,100	415	170	80	42	22	12.6	7.2	4.3	2.7	1.70	1.15	.79	.60	.49	.44	.41						
Philippine mahogany (<i>Shorea</i> Spp.)	2,890	690	220	80	35	15	9	5	2.8	1.7	1.1	.7	.45	.30	.21	.16	.12	.09	.07						
Sweetgum	38,000	6,460	2,090	815	345	160	81	45	25.7	15.1	9.3	6.0	3.98	2.63	1.78	1.26	.87	.63	.46						
Tupelo, black ¹	31,700	12,600	5,020	1,820	725	275	120	58	27.6	13.0	6.9	3.7	2.19	1.38	.95	.63	.46	.33	.25						
Walnut, black	51,300	9,770	2,630	890	355	155	78	41	22.4	12.9	7.3	4.9	3.16	2.14	1.48	1.02	.72	.51	.38						
Yellow-poplar ⁴	24,000	8,320	3,170	1,260	525	250	140	76	43.7	25.2	14.5	8.7	5.76	3.81	2.64	1.91	1.39	1.10	.85						

¹Resistance measured in megohms at 80 °F between two pairs of needle electrodes spaced 1-1/4 inches apart and driven to a depth of 5/16 inch. The reciprocals of these data are conductance in micro siemens.

²Exact species unknown.

³Known in the trade as "African mahogany."

⁴The values for this species were calculated from measurements on veneer.