

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Měřič vlhkosti materiálů

Tomáš Hnilička

Bakalářská práce

2014

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš Hnilička**
Osobní číslo: **I10280**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Měřič vlhkosti materiálu**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Tématem práce je realizace měřiče vlhkosti stavebního materiálu (dřeva, betonu a dalších materiálů). Detektor bude schopen vyhodnotit vlhkost materiálu, naměřená data bude možné přenést do PC.

1. Nasdudujte základní principy měření vlhkosti materiálu podle norem
2. Navrhněte hardwarovou realizaci měřiče
3. Naprogramujte ovládací software pro hardware měřiče
4. Ověřte požadované funkce snímače

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

1. Atmel 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32KBytes In-System Programmable Flash. ATMEL CORPORATION. [online]. [cit. 2013-10-29]. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Summary.pdf
2. K. Zehnula. Snímače neelektrických veličin. SNTL, Praha 1977.
3. ANTON, Ondřej, Vendula BLAŽKOVÁ a Leonard HOBST. Měření vlhkosti v praxi soudního inženýra. In: Soudní inženýrství: časopis pro soudní znalectví v technických a ekonomických oborech. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Ústav soudního inženýrství, s. 175-178. 16: 2005. ISSN 1211-443x.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Roleček
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **20. prosince 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **9. května 2014**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan

L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2014

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 9. 5. 2014

Tomáš Hnilička

Poděkování

Děkuju vedoucímu, panu Ing. Jiřímu Rolečkovi za informace, materiály, čas a cenné rady, které mi věnoval při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych poděkoval rodině a blízkým přátelům za podporu při studiu.

Anotace

Tato bakalářská práce obsahuje přehled metod pro stanovení vlhkosti podlažních vrstev betonových podlah, kde jsou popsány zejména destruktivní a nedestruktivní metody měření. Práce dále zahrnuje popis funkce kapacitních senzorů. Dále je navržena vyhodnocovací elektronika pro demonstrování popisu funkce kapacitních senzorů, která je aplikována na měření vlhkosti vybraných stavebních materiálů. V závěru práce je provedeno testovací měření několika vybraných materiálů a následné zhodnocení konkrétního měření a funkce použitého kapacitního senzoru.

Klíčová slova

Vlhkost, metoda nedestruktivní, kapacitní senzory, ATmega16, RC oscilátor, analogový komparátor.

Title

Material moisture meter

Abstract

This work provides an overview of methods for determining moisture of concrete floors where are described mainly destructive and nondestructive methods of measures in this work. This work includes description of the function capacitive sensors. In next parts of this work, there is designed evaluation electronics for demonstrate the function capacitive sensors which is aplicated for chosen materials moisture measurement. In conclusion, the testing measurement of the chosen material and subsequent evaluation of the overall measurement and working of the aplicated capacity sensor are done.

Keywords

Humidity, nondestructive method, capacity sensores, ATmega16, RC oscillator, analog comparator.

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
Úvod	12
1 Základní definice	13
1.1 Vlhkost	13
1.2 Senzory	14
2 Přehled metod pro stanovení vlhkosti podlažních vrstev betonových podlah	15
2.1 Metoda destruktivní.....	15
2.2 Metoda nedestruktivní	17
3 Kapacitní senzory	23
3.1 Elektrická kapacita	23
3.2 Principy aplikace kapacitního senzoru	28
3.2.1 Kapacitní senzory s proměnnou dielektrickou konstantou.....	28
3.2.2 Použití kapacitních senzorů	29
3.3 Vyhodnocování signálu z kapacitního snímače.....	30
3.3.1 Převod elektrické kapacity na elektrické napětí	30
3.3.1.1 Nepřímé měření změny kapacity.....	30
3.3.1.2 Můstkové zapojení	31
3.3.1.3 Měření elektrické impedance operačními zesilovači	33
3.3.1.4 Zapojení s rezonančními obvody	34
4 Návrh schématu zapojení	36
4.1 Napájení.....	36
4.2 Mikrokontrolér ATmega16.....	37
4.3 Komunikace s PC	38
4.4 LCD zobrazovač	39
4.5 AVR ISP – programátor	39
4.6 Uživatelské rozhraní	40
5 Návrh vyhodnocovacího obvodu	41
5.1 RC oscilátor	41
5.2 Interní analogový napěťový komparátor	43

6	Návrh programu	45
6.1	Vývojový diagram	45
7	Měření.....	46
Závěr	52
Literatura	54
Příloha A – Fotografie měřených vzorků a komunikace UART.....	55
Příloha B – Schéma zapojení	57
Příloha C – Zdrojový kód program preruseni.atsln	58

Seznam zkratk

ČSN	Česká státní norma (dříve Československá státní norma)
ISO	International Organization for Standardisation
ASTM	American society for testing and materials
RH	Relative humidity
OZ	Operační zesilovač
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only memory
SRAM	Static Random Access Memory
FTDI	Future Technology Devices International limited
USB	Universal Serial Bus
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
LCD	Liquid Crystal Display
ISP	In System Programming
AK	Analogový Komparátor
ADC	Analog Digital Converter
SW	Software
HW	Hardware
PC	Personal Computer

Seznam obrázků

Obrázek 1 - CM přístroj [1].....	16
Obrázek 2 - Měření vlhkosti pomocí RH sondy [1].....	17
Obrázek 3 - Kalcium-Chloridový test [1].....	18
Obrázek 4 - Fóliová metoda[1].....	18
Obrázek 5 - Izolovaná RH krabice [1].....	19
Obrázek 6 - Termografický snímek podlahy [1]	20
Obrázek 7- Zapichovací odporový vlhkoměr [1]	21
Obrázek 8 – Příložné vlhkoměry [1]	22
Obrázek 9 - Náboj kondenzátoru v elektrickém poli [2].....	23
Obrázek 10 - Schéma kulového kondenzátoru [2]	24
Obrázek 11 - Schéma deskového kondenzátoru [2]	25
Obrázek 12 - Schéma válcového kondenzátoru [2].....	25
Obrázek 13 - Náhradní schéma reálné kapacity [2]	26
Obrázek 14 - Zobrazení impedance reálného kondenzátoru [2].....	26
Obrázek 15 - Deskový kondenzátor s ochrannými elektrodami [2].....	27
Obrázek 16 - Kapacitní senzor se změnou permitivity [2].....	28
Obrázek 17 – Použití kapacitního senzoru pro měření vlhkosti materiálů [6].....	29
Obrázek 18 - Schéma měření úbytku napětí na kondenzátoru [2]	31
Obrázek 19 - Schéma zapojení střídavých můstků [2]	31
Obrázek 20 - Schéma měření kapacity s OZ [2]	33
Obrázek 21 - Schéma měření změn třísvorkového kapacitního senzoru [2].....	34
Obrázek 22 - Převod změn elektrické impedance na frekvenci [2].....	35
Obrázek 23 – Napájení obvodu	36
Obrázek 24 – ATmega16.....	37
Obrázek 25 – ft230xs.....	38
Obrázek 26 – LCD zobrazovač	39
Obrázek 27 – ISP programátor	39
Obrázek 28 – Uživatelské rozhraní	40
Obrázek 29 – Vyhodnocovací obvod	41
Obrázek 30 – Blokové schéma interního napěťového analogového komparátoru [4]	43
Obrázek 31 – Registr ACSR [4].....	44
Obrázek 32 – Nastavení typu přerušení od analogového komparátoru [4]	44
Obrázek 33 – Multiplexor pro analogový komparátor [4]	44
Obrázek 34 – Vývojový diagram programu	45
Obrázek 35 – Měřená hodnota (bez elektrod)	46
Obrázek 36 – Měřená hodnota kapacity 22 pF.....	47
Obrázek 37 – Graf vysychání měřeného dřevěného vzorku.....	48
Obrázek 38 – Graf vysychání měřeného betonového vzorku.....	50
Obrázek 39 – Dřevěný vzorek	55
Obrázek 40 – Omítka vápenato-cementovitá	55

Obrázek 41 – Garáž (beton lehký).....	56
Obrázek 42 – Betonový vzorek (beton hutný)	56
Obrázek 43 – Komunikace UART	56
Obrázek 44 – Schéma zapojení	57

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Relativní permitivita vybraných materiálů.....	29
Tabulka 2 – Vybrané měřené stavební materiály [7]	46
Tabulka 3 – Orientační převodová tabulka.....	47
Tabulka 4 – Měřený dřevěný vzorek za suchého stavu.....	48
Tabulka 5 – Měřený dřevěný vzorek	48
Tabulka 6 – Měření vápenato-cementovité omítky	49
Tabulka 7 – Měřený beton - lehký (garáž – od středu k výjezdu).....	49
Tabulka 8 – Měřený beton - lehký (garáž – od středu ke stěně)	49
Tabulka 9 - Měřený beton - lehký (garáž – vpravo ke stěně).....	49
Tabulka 10 - Měřený beton - lehký (garáž – vlevo k oknu)	49
Tabulka 11 – Měřený betonový vzorek (beton hutný)	50
Tabulka 12 – Beton hutný (obrubník)	51

Úvod

Měření vlhkosti materiálů je velice rozšířený vědný obor, který je využíván v mnoha technických směrech. Měření vlhkosti materiálů je využíváno například ve stavebnictví, kde je měřena např. vlhkost dřevěných trámů či vlhkost betonových konstrukcí. Měření vlhkosti je dále využíváno např. v lesnictví či chemicko-technologických vědních oborech.

Pro měření vlhkosti materiálů je velice důležitá vhodná volba měřícího senzoru, který bude následně vyhodnocovat vlhkost daného měřeného materiálu. Senzor je volen dle elektrických vlastností, reprezentujících daný měřený materiál. Sensory jsou dále rozděleny např. na kapacitní, indukční, odporové atd.

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou měření vlhkosti stavebních materiálů a vhodnou volbou senzoru, který je aplikován na daný měřený materiál. Ve stavebnictví je používáno velké množství stavebních materiálů, z tohoto důvodu bylo měření obsažené v této bakalářské práci omezeno na několik základních, nejvíce využívaných, stavebních materiálů.

V teoretické části budou popsány základní definice pro měření vlhkosti, metody měření pro stanovení vlhkosti betonových podlažních vrstev se zaměřením na destruktivní a nedestruktivní metody měření a princip funkce kapacitních senzorů. Většina destruktivních metod měření vlhkosti je definována dle Československých státních norem (ČSN). Několik nedestruktivních metod je definováno dle American society for testing and materials (ASTM). Většina těchto nedestruktivních metod není definována žádnou normou, tedy tato metoda je využívána pouze pro orientační měření.

V praktické části bude dále navrženo vyhodnocovací zařízení, které reaguje na vlhkost dané měřené konstrukce. Následně bude provedeno testovací měření pro několik vybraných stavebních materiálů a ověření funkce snímače, využívající principu kapacitních senzorů.

1 Základní definice

1.1 Vlhkost

Vlhkost je základní vlastností vzduchu a udává obsah vody v plynném stavu (vodní páry) v jednotkovém objemu vzduchu, který je v reálném stavu směsí suchého vzduchu a vodní páry, která je závislá na teplotě. Při měření lze užít těchto označení:

- a) **Absolutní vlhkost** Φ udává hmotnost vodní páry v jednotce objemu vzduchu s jednotkou gram na krychlový metr [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]. Jedná se tedy o měrnou hmotnost P_p .

Platí vztah:

$$\phi = \frac{m}{V}[\text{g}\cdot\text{m}^{-3}], \quad (1.1)$$

kde m je hmotnost vodní páry a V je objem vzduchu.

- b) **Relativní vlhkost** φ udává poměr mezi skutečným a maximálním nasyceným obsahem vody ve vzduchu či měřeného materiálu. Udává se řádově v procentech (%RH, %RV). Jedná se o procentní nasycení suchého vzduchu vodní parou při dané teplotě. Můžeme tvrdit, že suchý plyn má relativní vlhkost 0% a nasycený plyn vodní parou má relativní vlhkost 100%. Platí vztah:

$$\varphi = 100 \cdot \frac{\phi}{\phi_n}[\%], \quad (1.2)$$

kde ϕ je absolutní vlhkost vzduchu a ϕ_n je absolutní vlhkost vzduchu nasyceného vodními parami.

- c) **Měrná vlhkost** χ je hmotné množství vodní páry připadající na 1 kg suchého vzduchu, tedy vodní obsah. Vyjadřuje se pomocí hmotnostního zlomku, jako poměr hmotnosti vodní páry m_p a hmotnosti suchého vzduchu m_v . Udává se v [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$].

Platí vztah:

$$\chi = \frac{m_p}{m_v}[\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}], \quad (1.3)$$

kde m_p je hmotnost vodní páry a m_v je hmotnost suchého vzduchu.

- d) **Teplota rosného bodu (DP)** je teplotou, při které není vzduch schopen přijímat žádnou páru. Jednotkou je Celsiův stupeň (nebo Kelvin). Platí vztah:

$$\log EW = 0,66077 + 7,5 \left(\frac{t}{237,3+t} + \log_{10}(RH) - 2 \right), \quad (1.4)$$

$$DP = \frac{237,3 \cdot (0,66077 - \log EW)}{\log EW - 8,16077}, \quad (1.5)$$

kde EW je hodnota mezivýpočtu, t je naměřená teplota, RH je relativní vlhkost a DP je rosný bod.

1.2 Senzory

Senzory jsou základním prvkem technických prostředků pro měření a pro snímání údajů, dat a informací u řídicích a informačních systémů. Jsou klíčovými částmi určujícími vlastnosti a činnosti systémů.

Technická praxe i vědecká oblast používá velké množství různých typů senzorů. Při tom se využívají různé fyzikální principy pro zajištění snímání různých veličin od vnějších podnětů.

Jsou popisovány základní druhy senzorů s fyzikálními, chemickými, mechanickými a tekutinovými principy, používané v dnešní moderní praxi. Z velmi obsáhlého souboru senzorů jsou uváděny ty druhy, na kterých lze vyzvednout princip, na tomto principu vysvětlit podstatu aplikace zákonů fyziky, mechaniky, elektrotechniky, chemie a dalších vědních oborů a na kterých lze zároveň vytvořit příkladný vzor možného používání senzorů v praxi.

Problematika senzorů je zpracována primárně podle fyzikálních principů a následně jsou senzory popisovány podle druhu měřené veličiny a podle použití. Celkový popis principů senzorů navazuje na znalosti oborů fyziky, částečně chemie, elektrotechniky, mikroelektroniky, teorie automatického řízení a aplikované informatiky [2].

2 Přehled metod pro stanovení vlhkosti podlažních vrstev betonových podlah

V dnešní uspěchané době se technologické přestávky zkracují na minimum, často dochází k pokládce nášlapné vrstvy, ačkoliv podklad ještě není připraven. Je proto důležité zkontrolovat jeho připravenost (tj. vlhkost) před pokládkou finální vrstvy vhodným způsobem. Představme si tedy metody používané u nás i v zahraničí ke zjištění vlhkosti stavu podkladní vrstvy podlahy.

Požadavky na vlhkost podkladu stanovuje ČSN 74 4505 [10], kde jsou též specifikovány normou stanovené metody zjišťování vlhkosti podkladu (jsou to metoda gravimetrická a alternativně karbidová).

2.1 Metoda destruktivní

Známým znakem destruktivních metod je nutnost mechanickým způsobem poškodit povrch. To znamená, že měření vlhkosti probíhá na odebraném vzorku z konstrukce.

Tato metoda je jednak časově i finančně náročná, jednak riskantní pro destruovaný povrch. Další nevýhodou je také nereprodukovatelnost měření, protože nelze provést měření na stále stejném místě. Při podlahovém vytápění nelze tuto metodu použít. Pro destruktivní metody jsou známy tři druhy měření:

a) Gravimetrická metoda

Jedná se o nejznámější metodu, která je normovaná podle ČSN 74 4505 [10]. Zde se vlhkost materiálů stanovuje vysušením odebraného vzorku z konstrukce do ustálení hmotnosti.

Odběr vzorků provádíme ručním odsekáváním (nedoporučuje se použít příklepové vrtačky kvůli ohřívání materiálu).

Materiál dále vysoušíme dle normy ČSN EN ISO 12570 [11] ve větrané troubě s definovanou teplotou a relativní vlhkostí menší než 10%.

b) Karbidová metoda

Jedná se o nejrozšířenější destruktivní metodu v Evropě, kterou lze na rozdíl od gravimetrické metody provádět přímo na stavbě. Nevýhodou je velká nepřesnost ($\pm 3\%$).

Vzorky jsou odebírány v celé tloušťce podlahy a je velice nutné vysekat je ručně. Použitím příklepové vrtačky může dojít k ohřátí materiálu a tím pádem ke zkreslení naměřených výsledků. Ke stanovení vlhkosti se používá CM přístroj. Celá tato metoda je založena na chemické reakci, která probíhá ve speciální uzavřené nádobě [1].



Obrázek 1 - CM přístroj [1]

c) Zkouška s vývrty

Jedná se o metodu rozšířenou zejména ve Velké Británii a v USA. Její hlavní výhodou je provádění in-situ (přímo v konstrukci).

Na rozdíl od předchozích dvou metod, kde se odebíral vzorek přímo z konstrukce, dochází u této metody jen k nepatrnému porušení povrchu. Jedná se o malý vývrt, do kterého se nastrčí vlhkostní sonda.

Tato metoda je prováděna dle americké normy ASTM F 2170, "Standard Test Method for Determining Relative Humidity in Concrete Floor Slabs Using in situ Probes" [1].



Obrázek 2 - Měření vlhkosti pomocí RH sondy [1]

2.2 Metoda nedestruktivní

Hlavní výhodou nedestruktivních metod je, že se při jejich použití obejdeme bez odběru vzorku, nedojde tedy k poškození konstrukce a měření provádět na stejných místech.

V principu se jedná o měření určité fyzikální veličiny, která se mění vlivem obsahu vlhkosti. Obvykle se jedná o elektrické vodivostní vlastnosti materiálů. Uvedeme si tedy šest nedestruktivních metod pro měření vlhkosti materiálů:

a) Kalcium-chloridová metoda

Jedná se o běžně používanou metodu v USA, které je normována dle ASTM F 1869. Jedná se o metodu, která stanovuje množství vlhkosti, uvolňující se z betonové desky ve vymezeném prostoru pod nepropustným krytem, kde uvolňovaná vlhkost je pohlcována chloridem vápenatým.



Obrázek 3 - Kalcium-Chloridový test [1]

b) Fóliová metoda

Jedná se o primitivní obdobnou metodu k metodě Kalcium-chloridové. Tato metoda je normována dle ASTM D 4263.

Jedná se o rychlou a levnou metodu, při které ale může dojít k velké chybě v měření. Při této zkoušce se výsek podlahy o ploše 450 mm x 450 mm překryje čistou plastovou folií, která se po všech čtyřech stranách pevně připevní k podlaze. Vyhodnocení zkoušky se provádí po 16 hodinách. Pokud se po této době na spodní části folie objeví patrná kondenzace, beton není pravděpodobně připraven na pokládku krytiny [1].



Obrázek 4 - Fóliová metoda[1]

c) British Standard Test (Britská normová zkouška)

Jedná se o nejvíce rozšířenou metodu pro měření vlhkosti betonových podkladů ve Velké Británii. Zkouška vlhkosti je založena na principu zjišťování relativní vlhkosti.

Po dobu 72 hodin je na povrchu konstrukce přiložena nepropustná „krabice“ (hydrohood). Měření relativní vlhkosti se provede buď integrovaným hydrometrem, nebo vlhkostní sondou, která se vsune do nepropustné krabice.

Měření se pak opakuje po 24h, dokud nejsou 2x po sobě naměřeny stejné hodnoty. Pokud jsou naměřené hodnoty relativní vlhkosti 75% (tomu přibližně odpovídá hmotnostní vlhkost betonu 5% při teplotě 21°C) nebo nižší, pak lze desku považovat za dostatečně suchou pro pokládku podlahové krytiny [1].

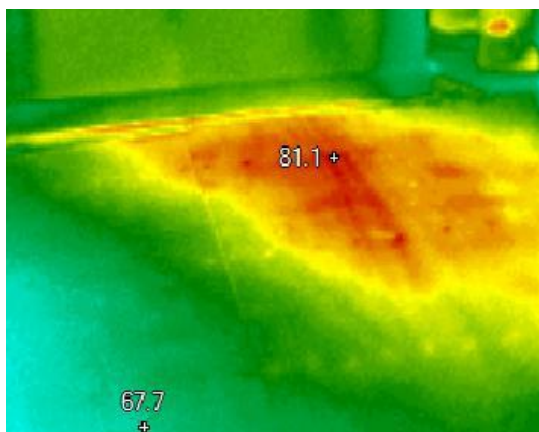


Obrázek 5 - Izolovaná RH krabice [1]

d) Metoda termografická

Termografická metoda je založena na principu zviditelnění energie, kterou tělesa vyzařují formou elektromagnetických vln, jejichž frekvence a vlnová délka se liší v závislosti na teplotě tělesa.

Jedná se o velmi rychlou metodu, díky které za pár okamžiků získáme představu o rozložení vlhkosti v konstrukci. Povrch je snímán termovizní kamerou, která nám dá pouze informaci o povrchové vlhkosti, nezjistíme tedy stav uvnitř konstrukce.



Obrázek 6 - Termografický snímek podlahy [1]

e) Zapichovací vlhkoměry

Jedná se o velmi rozšířenou kontrolní metodu, kterou provádíme za pomoci zapichovacích odporových vlhkoměrů. Tato metoda je dostupná a jednoduchá. Tyto vlhkoměry nejsou však pro účely zjišťování vlhkosti podlahového potěru vůbec vhodné. Hrotové vlhkoměry jsou určeny především pro dřevo, do kterého lze hroty zabodnout.

Hrotové vlhkoměry fungují na principu měření elektrického odporu, který závisí na množství vlhkosti přítomné v materiálu. U hrotových vlhkoměrů je velmi důležité, aby hroty pronikly do určité hloubky měřené konstrukce (měření probíhá mezi hroty). To se u měření betonu provádí velice obtížně. Měření probíhá v povrchové vrstvičce, výsledky měření tudíž nejsou objektivní [1].



Obrázek 7- Zapichovací odporový vlhkoměr [1]

f) Příložné vlhkoměry

Pro ideální zjištění vlhkosti podkladní vrstvy podlah jsou nedestruktivní příložné vlhkoměry. Měření těmito vlhkoměry je založeno na kapacitním či impedančním měření.

Na spodní straně přístroje jsou umístěny dvě elektrody – přijímací a vysílací, mezi kterými dochází k přenosu signálu. Tento přístroj stačí pouze přitisknout k měřené konstrukci a na digitálním displeji se okamžitě zobrazují naměřené hodnoty.

Signál přístroje proniká do hloubky několika centimetrů (u betonu obvykle cca 20-30 mm; záleží na typu přístroje a objemové hmotnosti materiálu). Můžeme získat informace o vlhkosti uvnitř posuzovaného materiálu i na jejím povrchu.

Tyto typy vlhkoměrů jsou nejběžněji používané k měření vlhkosti betonu. Naměřené hodnoty kapacity, nebo také impedance, jsou přepočteny na hodnotu obsahu hmotnostní vlhkosti betonu.

Výhodou tohoto typu měření je její rychlost a jednoduchost, výsledkem této metody je tedy okamžitý a reprodukovatelný výsledek. U některých výše popsaných metod bychom museli dodržovat složité postupy, docházelo by tudíž k chybám v měření.

Nevýhodou tohoto typu měření je, že není zakotvena v normě. Důležitá je zde smluvní dohoda, že vlhkost bude měřena normovaným postupem, tedy nezbyvá než provést test gravimetrickou nebo karbidovou metodou. Tato metoda slouží tedy jako předběžné zjištění vlhkosti betonu před měřením metodou normovanou [1].



Obrázek 8 – Příložné vlhkoměry [1]

3 Kapacitní senzory

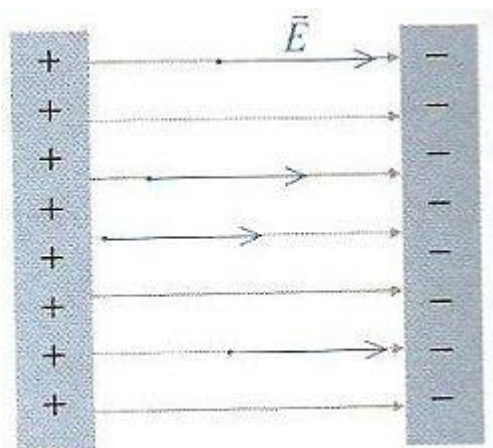
Kapacitní senzor se skládá ze dvou nebo více elektrod, mezi kterými uvažujeme dielektrické pole. Změna kapacity senzoru se mění pod vlivem vnějších podnětů, které působí na vyhodnocovací elektrody. Používání kapacitních senzorů je velmi rozšířené a aplikované v oboru měření neelektrických veličin [2].

3.1 Elektrická kapacita

Elektrická kapacita je definována mezi dvěma nebo více elektricky vodivými deskami a dielektrikem, kdy mezi deskami vzniká elektrický potenciál. V principu se jedná o dvě nekonečně velká vodivá tělesa umístěná v prostoru, kdy z jednoho tělesa můžeme odebrat elektrický náboj Q a umístit ho na druhé těleso. Elektrická kapacita je tedy poměr velikosti opačných volných nábojů na elektrodách k elektrickému potenciálu vytvořenému těmito náboji. Platí vztah:

$$C = \frac{Q_0}{V_1 - V_2}, \quad (3.1)$$

kde Q_0 jsou volné náboje, V_1 a V_2 je elektrický potenciál.



Obrázek 9 - Náboj kondenzátoru v elektrickém poli [2]

Pro teoretické a matematické poznatky elektrického pole je důležité uvažovat hodnotu elementárních nábojů. Jejich hodnota je různá a velmi malá, proto má tzv. elementární náboj stejnou hodnotu.

$$e = 1,606 \cdot 10^{-19} [C], \quad (3.2)$$

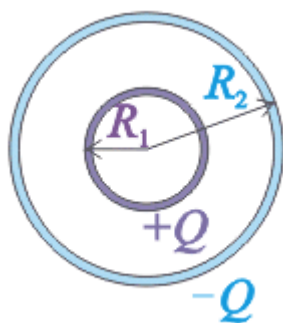
kde e je hodnota elementárního náboje.

Pro vztah rychlosti světla platí:

$$c = 2,9979 \cdot 10^8 [m \cdot s^{-1}] \quad (3.3)$$

Jednotka kapacity je *farad* [F], pro který platí: $1F = C/V$. Tedy kapacita jednoho F vznikne, pokud je přesunut z jednoho vodivého tělesa na druhé náboj o velikosti jeden C a vznikne napětí o velikosti 1V.

Praktickou realizací elektrické kapacity jsou tzv. kondenzátory (kapacitory). Kondenzátory jsou konstruovány tak, aby hodnota kapacity byla při co nejmenších rozměrech elektrod co největší. Uvažujme několik typů kondenzátorů, a to kondenzátory kulové, rovinné a válcové.



Obrázek 10 - Schéma kulového kondenzátoru [2]

Pro ideální kulový kondenzátor platí vztah:

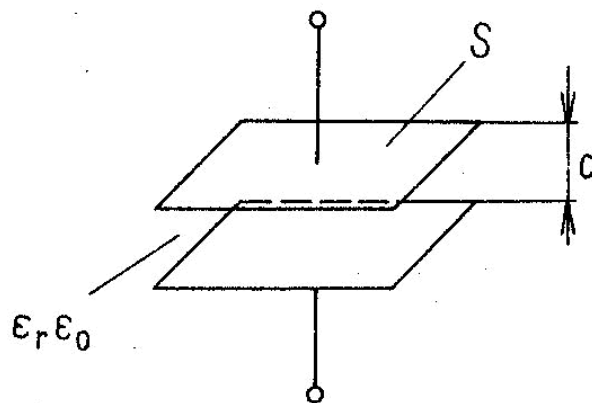
$$C = \frac{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot R_1 \cdot R_2}{R_2 - R_1}, \quad (3.4)$$

kde R_1 je průměr vnitřní kulové plochy a R_2 je průměr vnější kulové plochy. Kapacita je dále určena relativní permitivitou ε_r , permitivitou vákua ε_0 a rozměry kondenzátoru.

Pro ideální rovinný (deskový) kondenzátor platí vztah:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{d}, \quad (3.5)$$

kde ε_0 je permitivita vákua, ε_r je relativní permitivita, S je plocha elektrod a d je vzdálenost.

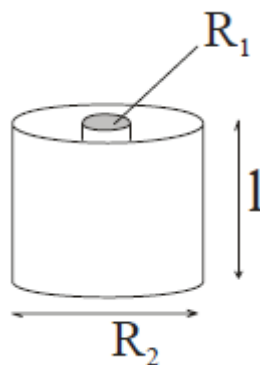


Obrázek 11 - Schéma deskového kondenzátoru [2]

Pro ideální válcový kondenzátor platí vztah:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l}{\ln(R_2 / R_1)}, \quad (3.6)$$

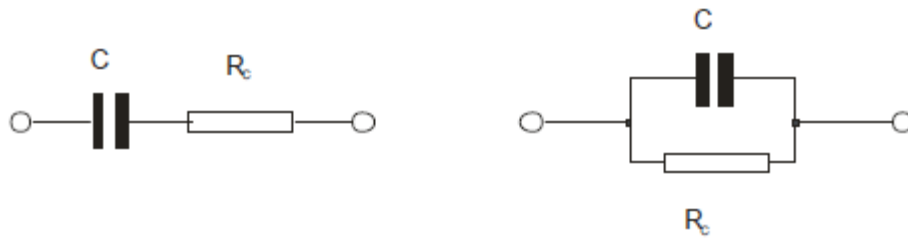
kde l je výška válcové plochy, R_1 je průměr vnitřní válcové plochy a R_2 je průměr vnější válcové plochy.



Obrázek 12 - Schéma válcového kondenzátoru [2]

Kapacita kondenzátoru v elektrickém obvodu má pro stejnosměrné a střídavé napětí rozdílné projevy, například vlivem elektrického odporu. Odpor se chová při zapojení pro stejnosměrný i střídavý proud stejně.

Při zapojení v obvodu se střídavým napájecím napětím se kondenzátor chová jako zdánlivý elektrický odpor, jinak také nazývaný „elektrická impedance“ [2].



Obrázek 13 - Náhradní schéma reálné kapacity [2]

Elektrický zdánlivý odpor, tedy elektrická impedance (značena Z), má tři složky, a to složky rezistanční, kapacitní a indukčnostní. Pro kondenzátor se nazývá jako kapacitance (značena X_C), nebo také kapacitní reaktance, která je dána vztahem:

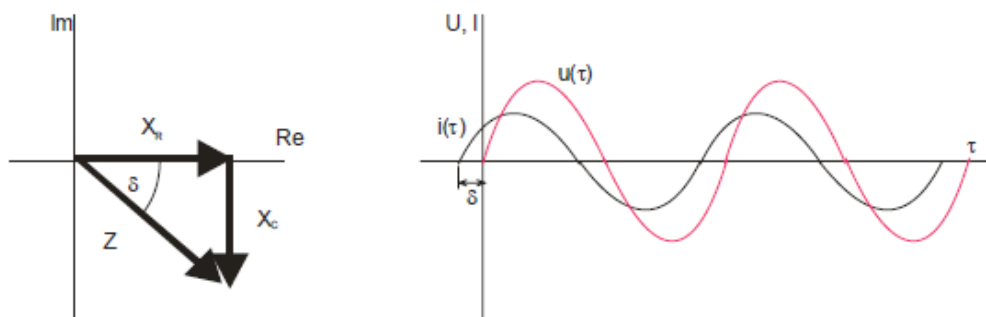
$$Z = X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}, \quad (3.7)$$

kde $\omega = 2\pi f$ je úhlový kmitočet napájecího střídavého napětí.

Při zapojení kondenzátoru v obvodu se střídavým napětím předpokládáme, že kapacita není ideální, ale že reálný kondenzátor má tzv. svodový odpor R_c . Zapojení ideální kapacity můžeme chápat jako sériové nebo paralelní zapojení kondenzátoru C a odporu R_c , viz. **Obrázek 13**.

Pro reálný kondenzátor, kde je tedy vedle ideální kapacity navíc i parazitní odpor v sériovém zapojení, platí pro impedanci Z vektorový vztah:

$$\vec{Z} = \overline{R_c} \pm j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C}, \quad (3.8)$$



Obrázek 14 - Zobrazení impedance reálného kondenzátoru [2]

Hodnota impedance Z je složena ze dvou složek, a to ze složky činné a reaktanční (jalové). Činná složka je dána svodovým odporem $X_R = R_c$. Reaktanční složka je vyjádřena jako X_c pro sériové zapojení složek reálného kondenzátoru, viz **Obrázek 14**. Zobrazení elektrických poměrů je provedeno pomocí Gaussovy roviny na reálné a imaginární ose (levá část obrázku 14) nebo jako průběh periodického napětí a proudu přes kondenzátor C na časové ose (pravá část obrázku 14).

Pomocí Pythagorovy věty, kde nám složky X_R a X_c vytvářejí přeponu, která znázorňuje impedanci Z daného reálného kondenzátoru lze odvodit vztah [2]:

$$\bar{Z} = \bar{X}_R + \bar{X}_C = \sqrt{R_c^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}, \quad (3.9)$$

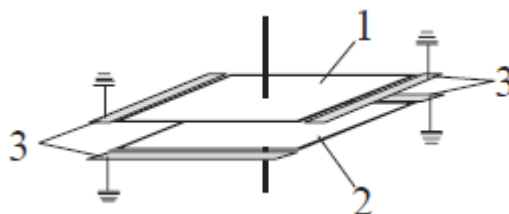
Z **Obrázek 14** je patrné, že vektory X_R a X_c svírají úhel δ , nazývaný jako ztrátový úhel. Tento úhel mezi činnou a jalovou složkou v časové ose (pravá strana obrázku 16) zobrazuje posunutí průběhu proudu a napětí na kapacitě kondenzátoru. Díky tomuto úhlu lze vyjádřit tzv. jakostní součinitel Q_c :

$$Q_c = \frac{1}{\operatorname{tg}(\delta)} = \omega \cdot C \cdot R_c, \quad (3.10)$$

kde δ je ztrátový úhel, ω je úhlový kmitočet, C je kapacita, R_c je paralelní odpor.

Nejmenší $\operatorname{tg} \delta$ mají kondenzátory vzduchové (přibližně 1. 10⁻⁶ při kmitočtu nad desítky MHz a teplotě několik desítek °C), největší $\operatorname{tg} \delta$ mají kondenzátory hliníkové, elektrolytické (přibližně 0,1 až 0,5 při desítkách Hz a teplotě okolo 20 °C).

Při určování kapacity senzoru bylo doposud uvažováno homogenní elektrické pole mezi elektrodami a nulové elektrické pole ve vnějším prostředí kolem kondenzátoru. V praxi je ovšem kolem kondenzátoru nehomogenní elektrické pole, které negativně působí na náboje na kondenzátoru. Pro odstranění těchto negativních vlivů jsou používány ochranné uzemněné prstence kolem elektrod kondenzátoru [2].



Obrázek 15 - Deskový kondenzátor s ochrannými elektrodami [2]

Standartní ploché elektrody (1, 2) jsou na okrajích doplněny elektrodami (3), které jsou uzemněny. Rozměry těchto elektrod jsou řešeny následovně:

$$m \geq 5 \cdot d,$$

$$b \geq 5 \cdot d; l \geq 5,$$

kde m je šířka ochranné elektrody, $b \times l$ jsou rozměry základních elektrod, d je tloušťka dielektrika.

3.2 Principy aplikace kapacitního senzoru

Na velikost kapacity kapacitního senzoru mohou působit vnější podněty tak, že změní do jisté míry jeho relativní permitivitu, plochy elektrod, nebo vzdálenost elektrod. Charakteristika senzoru v případě závislosti výstupu ke vstupu vnějšího podnětu je zpravidla nelineární [2].

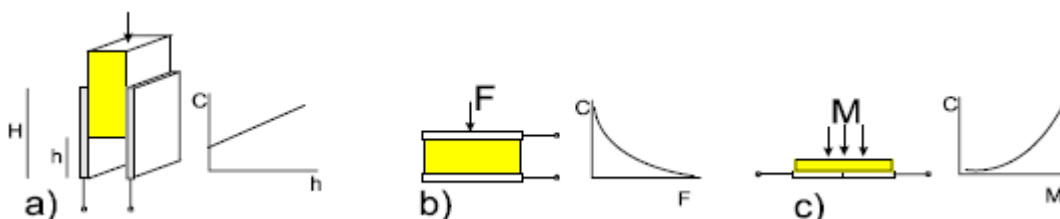
V diferenčním vyjádření lze určit kapacitu senzoru ΔC , podle které lze popisovat změnu kapacity pro různé druhy kapacitních senzorů:

$$C + \Delta C = \frac{\varepsilon_0 \cdot (\varepsilon_r + \Delta\varepsilon_r)}{(d + \Delta d)} \cdot (S + \Delta S), \quad (3.11)$$

kde $\Delta\varepsilon_r$ je změna relativní permitivity, ΔS je změna plochy elektrod a Δd je změna vzdálenosti elektrod.

3.2.1 Kapacitní senzory s proměnnou dielektrickou konstantou

Použití kapacitních senzorů v praxi je při působení vnějších podnětů velice rozšířené. Dochází zde ke změně permitivity prostředí mezi elektrodami senzoru. Změna permitivity prostředí mezi elektrodami je vyvolána různými podněty, například působení vnější vlhkosti na dielektrikum, při působení tlaku na dielektrikum apod. Příklady jak mohou vnější podmínky měnit permitivitu prostředí, jsou uvedeny v **Obrázek 16**.



Obrázek 16 - Kapacitní senzor se změnou permitivity [2]

Na pozici a) nalezneme senzor, kde se mění permitivita vlivem změny plochy mezi elektrodami. V principu dochází k zasouvání dielektrika mezi elektrody senzoru.

Na pozici b) nalezneme senzor, kde změnu permitivity vyvolává silové působení tlakem síly F na jednu desku kondenzátoru. V tomto případě se mění tloušťka dielektrika.

Na pozici c) nalezneme senzor, kde změnu permitivity vyvolává absorpce nebo resorpce vlhkosti. Zde je prostor mezi elektrodami vyplněn látkou, která je ovlivněna vlhkostí. Využívá se zde skutečnosti, že permitivita vody je vždy mnohem větší než permitivita ostatních látek.

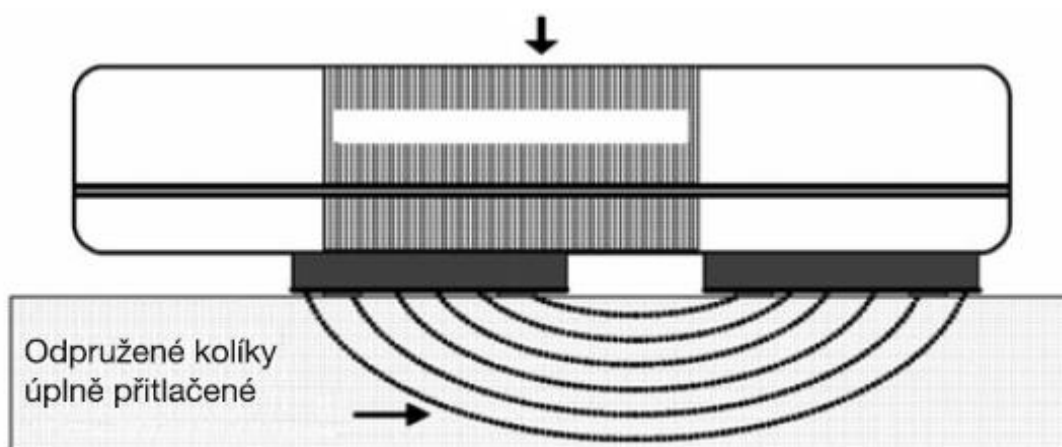
Tabulka 1 – Relativní permitivita vybraných materiálů

Materiál	permitivita ϵ_r	Materiál	Permitivita ϵ_r
vzduch	1,000585	pryž	2,0-6,0
CO2	1,00096	písek	3,0-5,0
N2	1,000602	porcelán	4,5-7,0
benzín	2,0-2,2	slída	5,0-8,0
jantar	2,6-2,8	sklo	3,7-10,0
tvrdá guma	2,55	voda	81
cukr	3		

3.2.2 Použití kapacitních senzorů

V praxi se jedná o relativně kvalitní senzory s vysokým činitelem jakosti, s malými rozměry, s malou hmotností, jednoduchou konstrukcí atd. Přihlíží se také na parazitní vlivy, jako je teplota, vlhkost dielektrika, rušící elektrické pole okolních zařízení, vstupní odpor vyhodnocovacích obvodů a také kapacita a indukčnost přívodů.

Kapacitní senzory jsou aplikovány při zjišťování výšky hladiny vody, polohy, tlakové síly, vlhkosti materiálů a dalších veličin [2].



Obrázek 17 – Použití kapacitního senzoru pro měření vlhkosti materiálů [6]

3.3 Vyhodnocování signálu z kapacitního snímače

Kapacitní senzor mění podle vnějších podnětů svoji kapacitu. Tento výstupní signál, tj. změny kapacity je nutno převést na elektrický signál pro jeho další zpracování ve výpočetní technice systémů informatiky a automatizace [2].

3.3.1 Převod elektrické kapacity na elektrické napětí

Pro převod velmi malých změn elektrické kapacity na elektrické napětí odolnému interferenčnímu rušení jsou v praxi aplikovány metody různými způsoby [2].

Vyhodnocovací obvod kapacity senzoru může používat zapojení:

- a) pro nepřímé měření změny kapacity
- b) můstkové zapojení
- c) zapojení s rezonančními obvody
- d) zapojení s aktivními operačními zesilovači.

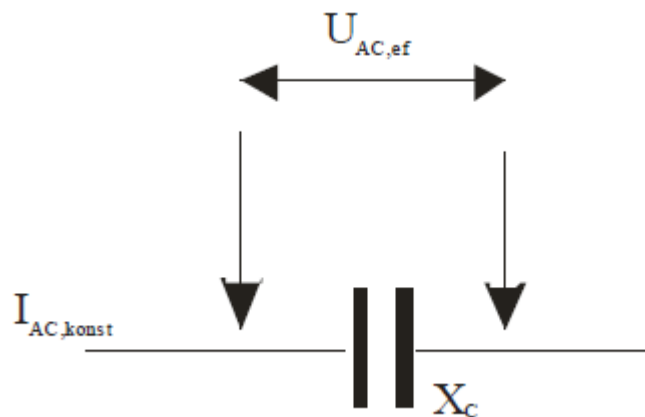
3.3.1.1 Nepřímé měření změny kapacity

Při uvažování konstantního napájecího napětí platí Ohmův zákon, který je základem pro měření úbytku napětí na odporu, jako metody převodu změn elektrického odporu na napětí. Ohmův zákon tedy říká, že při průtoku konstantního elektrického proudu přes odpor vzniká na odporu elektrické napětí úměrné hodnotě odporu. Při měření elektrické kapacity je kondenzátor napájen konstantním střídavým proudem a můžeme uvažovat kapacitanci jako elektrický odpor. Pak se může také aplikovat metoda nepřímého měření úbytku střídavého napětí na kondenzátoru a jeho hodnota $U_{AC,ef}$ je úměrná elektrické impedanci svoji efektivní hodnotou [2]. Pak platí:

$$U_{AC,ef} = I_{AC,ef} \cdot X_C, \quad (3.12)$$

kde $I_{AC,ef}$ je protékající konstantní proud, X_C je měřená reaktance.

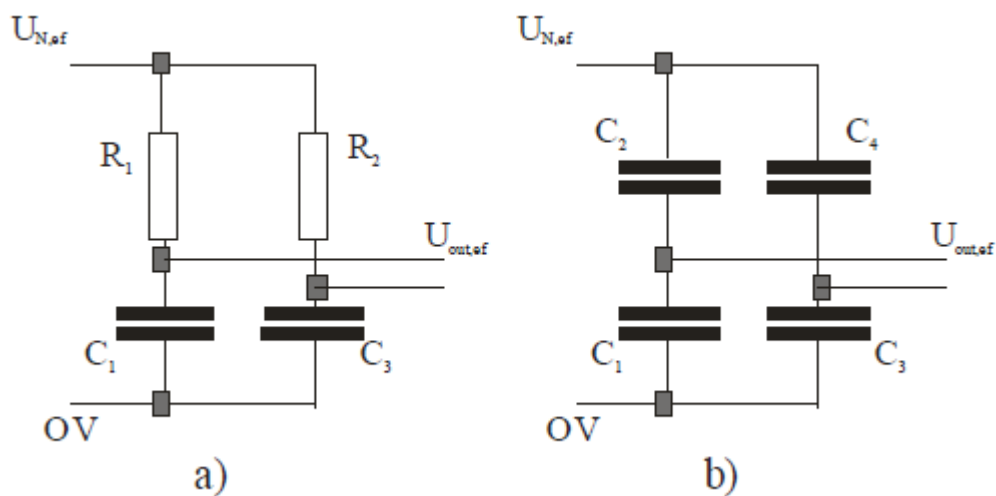
Tento princip je používán pro měření hodnot kapacity multimetry a lze tento princip využít pro vyhodnocení změn kapacity senzorů.



Obrázek 18 - Schéma měření úbytku napětí na kondenzátoru [2]

3.3.1.2 Můstkové zapojení

Dalším způsobem, jak změřit změny kapacity senzoru je pomocí můstkového zapojení. Jedná se z pravidla o střídavé můstkové zapojení, stejnosměrné můstkové zapojení je používáno u odporových senzorů.



Obrázek 19 - Schéma zapojení střídavých můstků [2]

Základní zapojení střídavého můstku pro kapacitní změny jsou na **Obrázek 19**. Zapojení a) je tzv. půl můstek, v dolní polovině můstku je jeden kapacitní senzor C_1 . Jeden elektronický kondenzátor C_2 nebo oba dva kondenzátory C_1 a C_2 představují kapacitní senzor. V horní polovině jsou elektronické odpory R_1 a R_2 [2].

Zapojení podle b) je zapojení se čtyřmi kapacitami C_1 , C_2 , C_3 a C_4 . Může se jednat o kombinace jeden senzor a tři elektronické kondenzátory, nebo dva senzory a dvě součástky až všechny čtyři kapacitní senzory. Zapojení používá napájení $U_{N,ef}$, tj. střídavé elektrické napětí u harmonické frekvence 10 kHz i více. Výstupní napětí můstku je také střídavé $U_{OUT,ef}$ [2].

Pro elektrické zapojení střídavého můstku lze použít Ohmův zákon. Zde je napětí uvažováno jako napětí efektivní a místo odporu R je použita hodnota impedance Z . Pro můstek s napájením konstantním efektivním napětím platí [2]:

$$U_{N,ef} = Z \cdot I_{ef} = Z \cdot (I_{1,ef} + I_{2,ef}), \quad (3.13)$$

kde Z je celkový zdánlivý odpor můstku – impedance (sériově paralelní zapojení reaktancí). Pro výstupní napětí (zapojení a) $U_{out,ef} = U_{1,ef} - U_{2,ef}$ platí:

$$U_{1,ef} = X_{C1} \cdot I_{1,ef} = U_{N,ef} \cdot \frac{X_{C1}}{R_1 + X_{C1}}, \quad (3.14)$$

$$U_{2,ef} = X_{C3} \cdot I_{2,ef} = U_{N,ef} \cdot \frac{X_{C3}}{R_2 + X_{C3}}, \quad (3.15)$$

Jestliže všechny čtyři prvky můstku představují kapacity (zapojení b), pak platí vztahy:

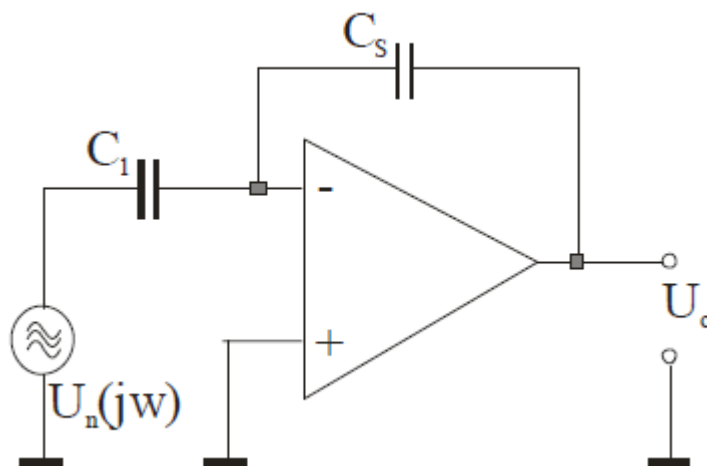
$$U_{1,ef} = X_{C1} \cdot I_{1,ef} = U_{N,ef} \cdot \frac{X_{C1}}{X_{C2} + X_{C1}}, \quad (3.16)$$

$$U_{2,ef} = X_{C3} \cdot I_{2,ef} = U_{N,ef} \cdot \frac{X_{C3}}{X_{C4} + X_{C3}}, \quad (3.17)$$

Protože má střídavý můstek střídavé výstupní napětí, musí mít ještě dodatečně obvod pro převod efektivního napětí na stejnosměrné napětí: $U_{AC,ef}/U_{DC}$. Pro tento převod jsou vybrány speciální integrované obvody [2].

3.3.1.3 Měření elektrické impedance operačními zesilovači

Zapojení s operačními zesilovači (OZ) je vhodné například pro neuzemněné kapacitní senzory (tzv. plovoucí). Základní zapojení pro měření elektrické impedance s OZ je na **Obrázek 20**. Vazební kondenzátor tvoří kapacita C_1 a měřicí kapacitní senzor v tomto zapojení znázorňuje kapacita C_s .



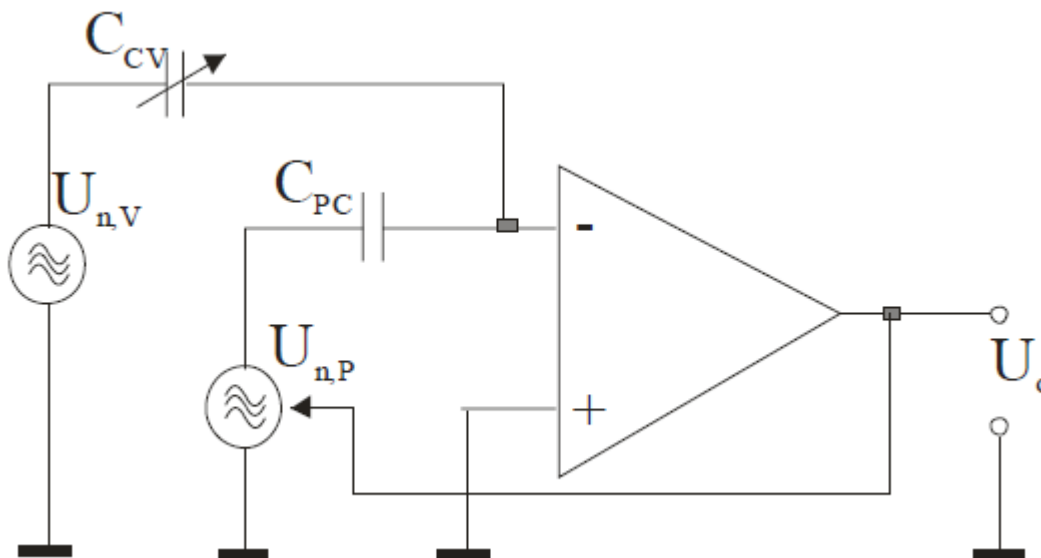
Obrázek 20 - Schéma měření kapacity s OZ [2]

Zapojení obvodu na **Obrázek 20** potlačuje parazitní kapacity přívodů jak na výstupu, tak k virtuální zemi měřicí kapacity. Zdrojem napětí pro senzor je zdroj harmonického napětí $U_n(jw)$. Výstupní napětí $u_o(t)$ se rovná [2]:

$$u_o(t) = -\frac{C_1}{C_s} \cdot u_n(t) = -\frac{C_1}{\varepsilon S} \cdot du_n(t), \quad (3.18)$$

kde C_1 je propojovací kapacita, C_s je měřicí kapacitní senzor a $u_n(t)$ je napájecí harmonické napětí.

Pro třísvorkové kapacitní senzory je určené zapojení podle **Obrázek 21**.



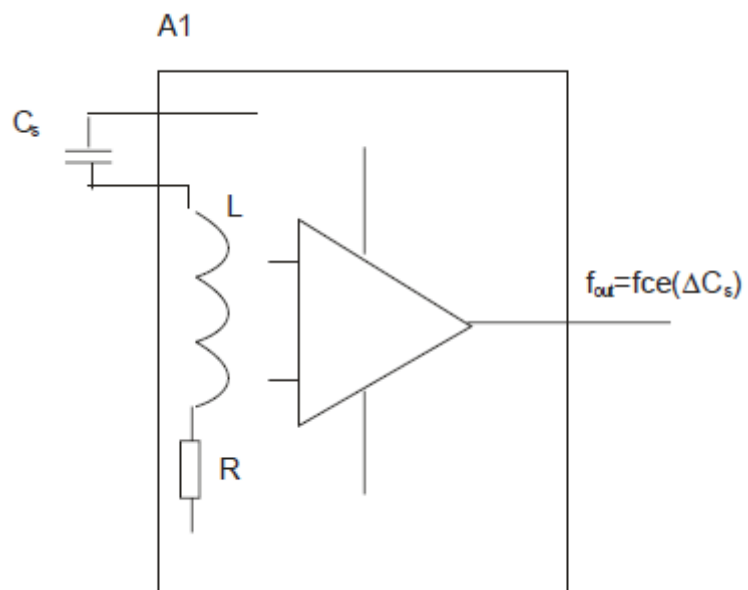
Obrázek 21 - Schéma měření změn třísvorkového kapacitního senzoru [2]

Zapojení má konstantní napájecí střídavé napětí $U_{n,V}$, pro proměnný kondenzátor C_{cv} a z výstupu řízené napájecím napětím $U_{n,P}$ pro elektronický kondenzátor C_{PC} . Řízeným napětím se dosáhne na invertujícím vstupu nulový proud. Parazitní kapacity elektrod, okolí a přívodů se neuplatňují [2].

3.3.1.4 Zapojení s rezonančními obvody

Způsoby k úpravám signálů z kapacitních senzorů jsou v praxi využívány pomocí RLC rezonančních obvodů. Jedná se o vyhodnocení změn elektrické impedance na periodickou frekvenci. Zapojení obvodu viz. **Obrázek 22**.

Změna elektrické kapacity na senzoru C_s se v jednotce A1 upravuje v zapojení RLC oscilátoru na změny frekvence f_{out} . Výstupem je, že kapacitní senzor má 100 mF výstupní frekvenci např. $f_{out} = 1$ kHz a změna 0,1 mF bude 10 Hz. Výstupní frekvenční signál je zapojen na vstup mikrokontroléru a následně vyhodnocen na číslo reprezentující změnu kapacity [2].



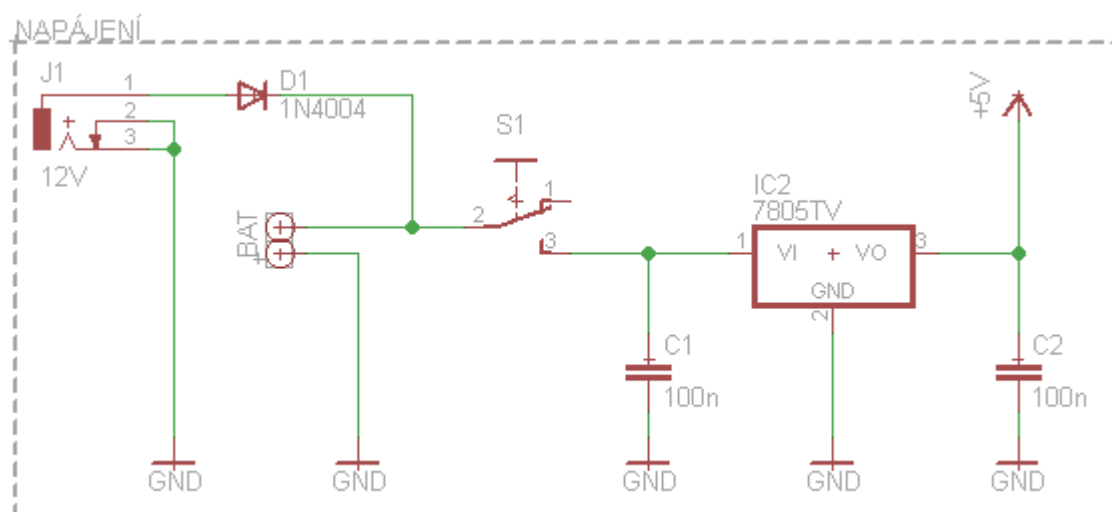
Obrázek 22 - Převod změn elektrické impedance na frekvenci [2]

4 Návrh schématu zapojení

Po teoretickém úvodu do problematiky kapacitních senzorů bylo navrženo schéma zapojení, které vyhodnocuje a zpracovává naměřená data snímaná kapacitním senzorem. Schéma zapojení, a následně deska plošných spojů, byly navrženy v programu EAGLE 6.1.0. Jednotlivé bloky zapojení jsou popsány v následujících kapitolách.

4.1 Napájení

Pro napájení obvodu byla zvolena hodnota stejnosměrného napětí 5V. Stabilizaci vstupního stejnosměrného napětí vytváří model stabilizátoru L7805, který stabilizuje vstupní napětí v rozmezí od 5V do 18V. Blokovací kapacity C_1 a C_2 byly zvoleny dle katalogu stabilizátoru L7805. Pro vstupní napájení byla zvolena hodnota napětí 9V (baterie), nebo externí napájení např. 12V stejnosměrného napětí.



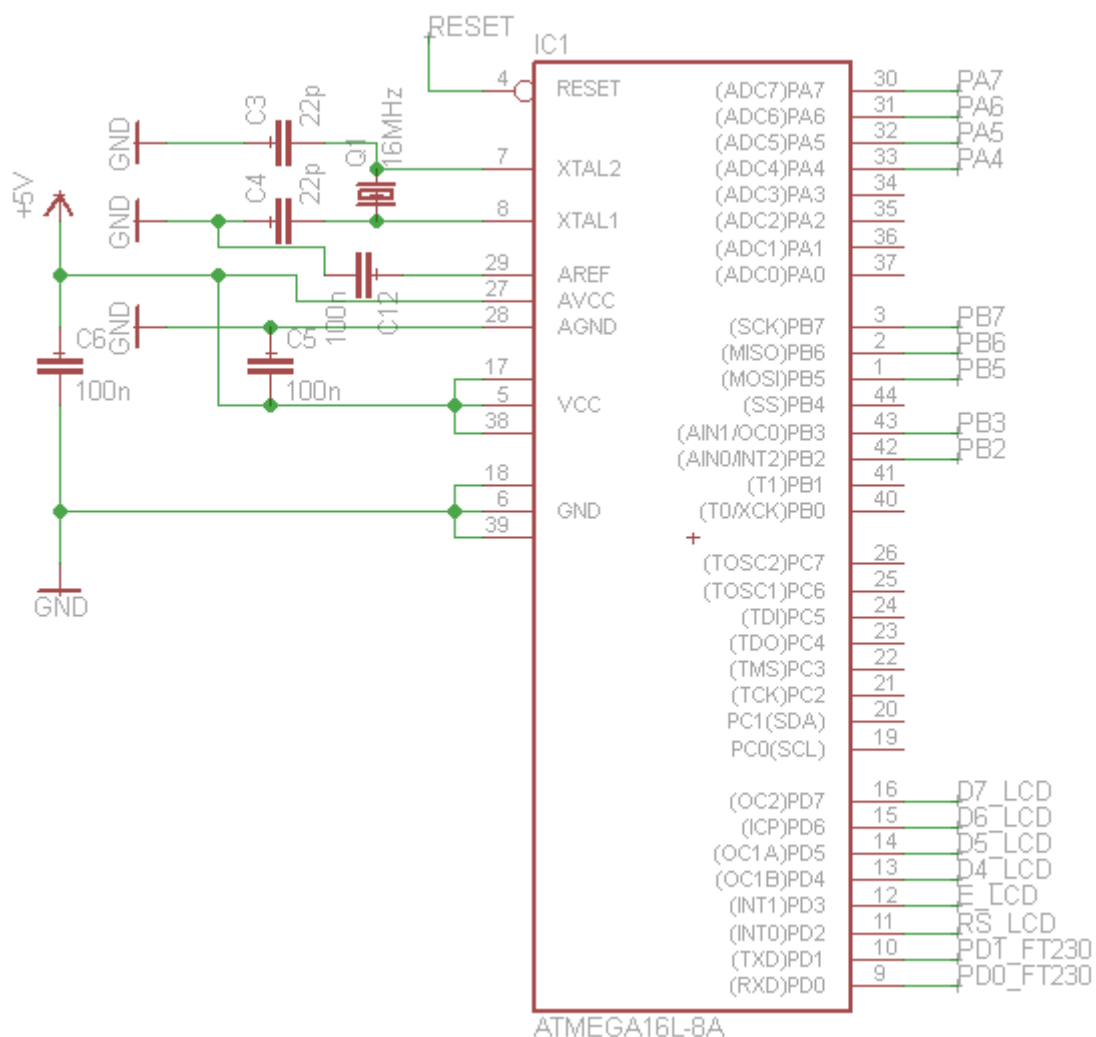
Obrázek 23 – Napájení obvodu

V **Obrázek 23** tvoří $J1$ konektor pro externí napájení (např. 12V), dioda $D1$ tvoří ochranný prvek, BAT tvoří svorkovnici pro napájení 9V (baterie), $S1$ tvoří posuvný spínač, $IC2$ tvoří stabilizátor vstupního napájecího napětí a prvky $C1$, $C2$ tvoří ve schématu zapojení vazební kapacity zapojené dle katalogu stabilizátoru L7805.

4.2 Mikrokontrolér ATmega16

ATmega16 je mikrokontrolér firmy Atmel. Jedná se o integrovaný obvod v pouzdře se vstupy a výstupy. Většina těchto vstupů a výstupů je softwarově nastavitelná.

Mikrokontrolér obsahuje 16kB Flash paměti, 512B EEPROM a 1kB interní SRAM. ATmega16 dále obsahuje např. 8-bitové časovače/čítače (*timer/counter*), 16-bitový časovač/čítač, interní komparátor atd. Pracovní napětí je 4,5V až 5,5V.

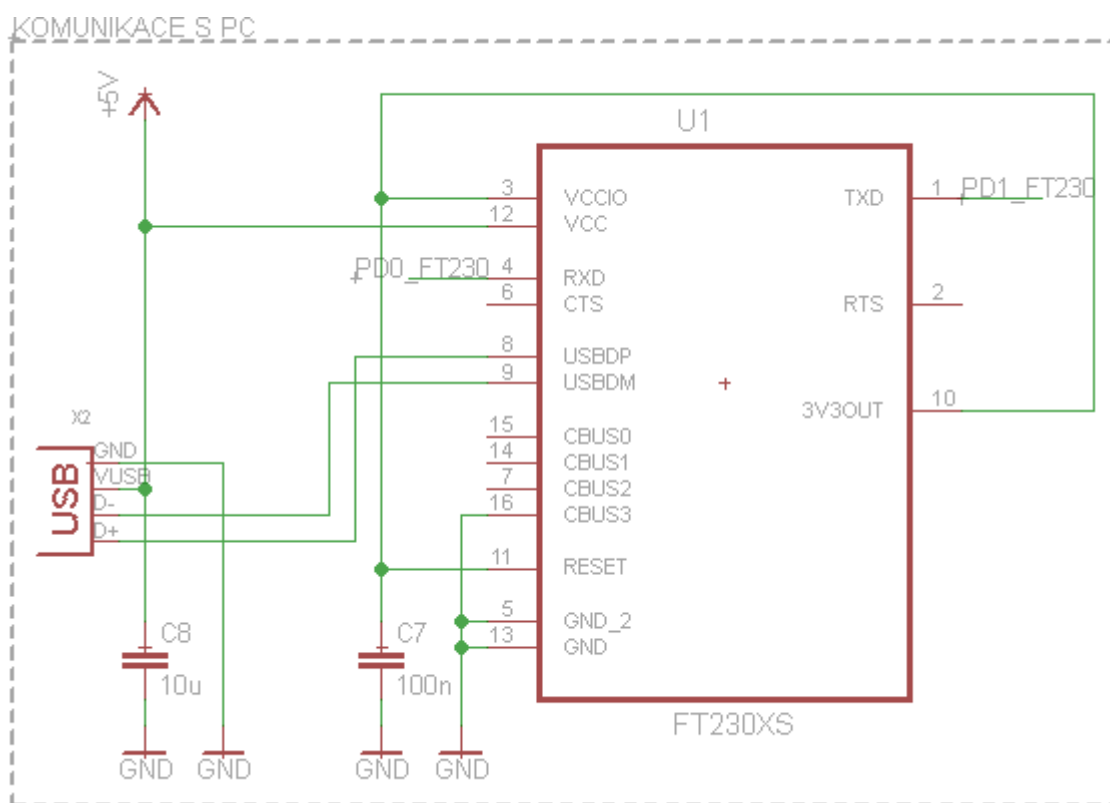


Obrázek 24 – ATmega16

V **Obrázek 24** tvoří Q_1 krystal, jako zdroj externího taktovacího kmitočtu a prvky C_3 , C_4 , C_5 , C_6 , C_{12} slouží v schéma zapojení jako blokovací kapacity.

4.3 Komunikace s PC

Pro komunikaci s PC byl použit FTDI (future technology devices international limited) chip, který slouží k asynchronnímu přenosu dat, která jsou uložena v paměti mikrokontroléru ATmega16, po sériové lince. Výhodou ft230xs je umístění protokolů pro komunikaci s USB přímo na chipu, zařízení se tedy nemusí složitě programovat. Dalšími výhodami jsou malé rozměry, menší počet pinů a rychlá komunikace USB se sériovým rozhraním, jejíž datová rychlost se pohybuje řádově kolem 3,4 Mbit/s.

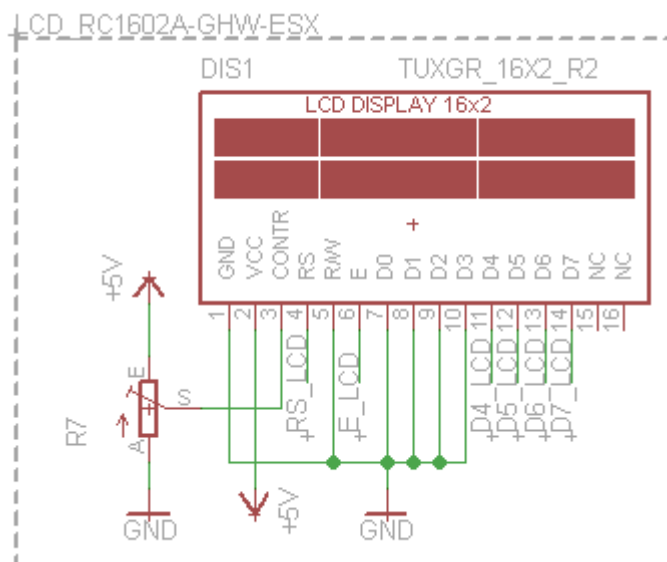


Obrázek 25 – ft230xs

V **Obrázek 25** tvoří X2 konektor USB-B a prvky C_8 , C_9 slouží ve schématu zapojení jako blokovací kapacity.

4.4 LCD zobrazovač

Jako zobrazovač byl použit 16x2 LCD displej, konkrétně RC1602A. Jednotlivé piny byly dle katalogu připojeny k mikrokontroléru ATmega16. LCD zobrazovač je dále nakonfigurován v programu dle katalogu a potřeby uživatele.

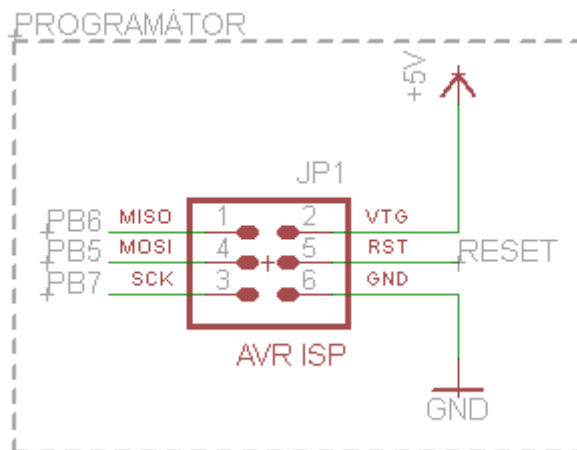


Obrázek 26 – LCD zobrazovač

V **Obrázek 26** je prvek *R7* použit ve schématu zapojení jako odporový trimr pro ovládání jasu LCD zobrazovače.

4.5 AVR ISP – programátor

Pro sériové programování mikrokontroléru ATmega16 byl použit šestipinový AVR ISP (in system programming) programátor.

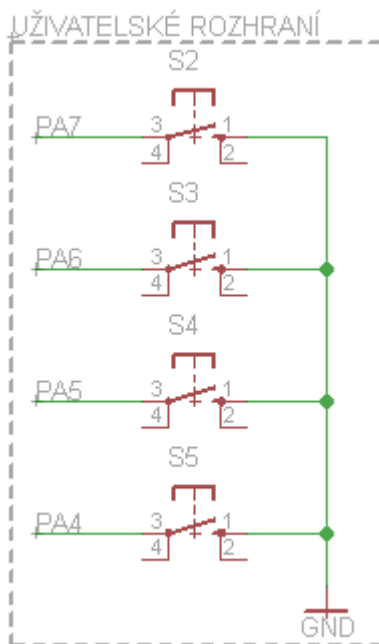


Obrázek 27 – ISP programátor

4.6 Uživatelské rozhraní

Pro uživatelský přístup byly použity mikrospínače, které slouží uživateli k snadnému přístupu a ovládnání zařízení.

Jednotlivé mikrospínače jsou přivedeny na neobsazené piny mikrokontroléru, které jsou v programu dále nakonfigurovány dle potřeby uživatele.



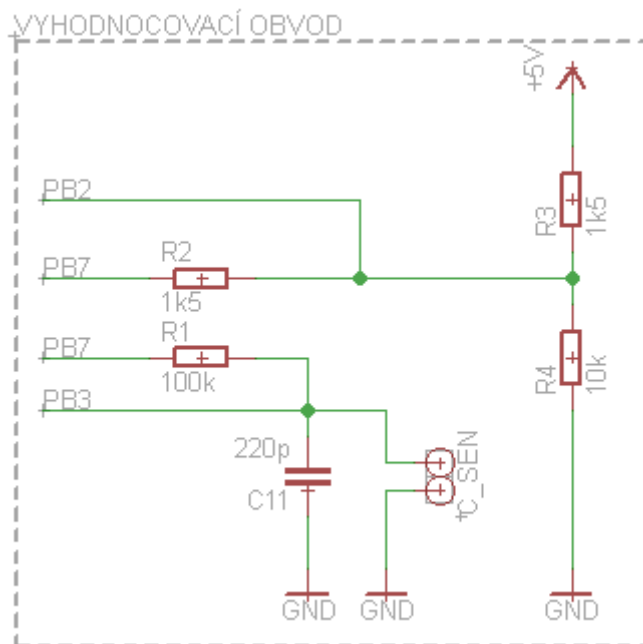
Obrázek 28 – Uživatelské rozhraní

V **Obrázek 28** tvoří prvky S2, S3, S4 a S5 mikrospínače.

5 Návrh vyhodnocovacího obvodu

5.1 RC oscilátor

Pro vyhodnocování kapacity dané měřené konstrukce byl navržen RC oscilátor s využitím interního analogového napěťového komparátoru mikrokontroléru ATmega16.



Obrázek 29 – Vyhodnocovací obvod

Hodnoty rezistorů R_2 , R_3 a R_4 definují v obvodu velikost prahové hodnoty napětí $1/3$ napájecího napětí $U_{nap.}$ a $2/3 U_{nap.}$, ve kterých interní komparátor mikrokontroléru ATmega16 překlápí. Tyto prahové hodnoty určují prahové hodnoty napětí pro změnu úrovně signálu na výstupu.

Perioda oscilací (frekvence) je nastavována hodnotami rezistoru $R_1 = 100k\Omega$ a kapacitami $C_{11} = 220pF$ a C_{SEN} . Hodnota rezistoru $R_1 = 100k\Omega$ byla ponechána, tedy hodnotu oscilací určuje pouze velikost paralelně připojených kapacit C_{SEN} a $C_{11} = 220pF$.

Pro výpočet pracovní frekvence RC oscilátoru platí následující vztah:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (5.1)$$

kde f je pracovní frekvence RC oscilátoru, R je hodnota rezistoru $R_1 = 100k\Omega$ a C je kapacita paralelní kombinace C_{11} a C_{SEN} .

Výsledná hledaná kapacita senzoru je získána z následujícího vztahu:

$$C = C_{11} + C_{SEN}, \quad (5.2)$$

kde C je výsledná hodnota měřené kapacity, C_{11} je zvolená hodnota kapacity a C_{SEN} je změřená hodnota kapacity.

Při měření kapacity bez použití složitějších matematických výpočtů bylo vhodné zvolit hodnoty rezistorů R_3 a R_4 tak, aby realizovaný dělič napětí nepřesáhl 90 % napájecího napětí. Hodnota dělicího poměru větší než 90 % by snížila stabilitu a přesnost měření.

Pro výpočet napětí na rezistoru R_4 platí vztah:

$$U_2 = U_{nap.} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} = 5 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{1,5 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3} = 4,35V, \quad (5.3)$$

kde U_2 je napětí na rezistoru R_4 , $U_{nap.}$ je hodnota napájecího napětí 5V a R_3 , R_4 jsou rezistory děliče napětí.

Pro procentuální výpočet dělicího poměru platí následující vztah:

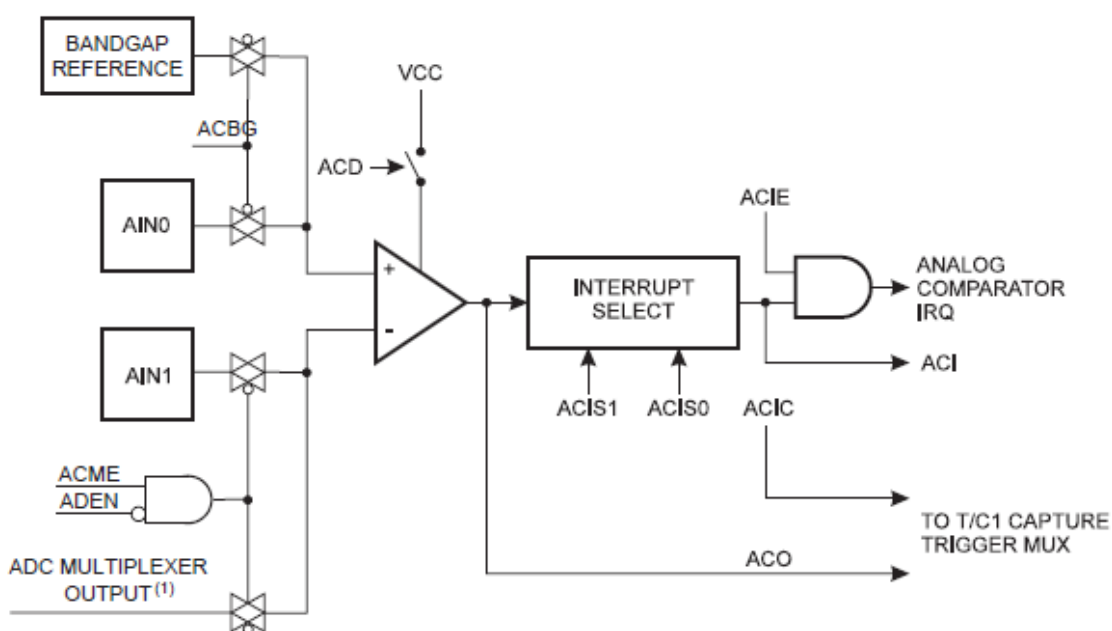
$$x = \frac{U_2}{U_{nap.}} \cdot 100\% = \frac{4,35}{5} \cdot 100 = 86,9\%, \quad (5.4)$$

kde x je procentuální dělicí poměr napětí na děliči, U_2 je napětí na rezistoru R_4 a $U_{nap.}$ je hodnota napájecího napětí 5V.

5.2 Interní analogový napěťový komparátor

Princip interního analogového napěťového komparátoru mikrokontroléru ATmega16 spočívá v porovnávání vstupních hodnot napětí na neinvertujícím vstupu AIN0 (PB2) a invertujícím vstupu AIN1 (PB3). Pokud je napětí na neinvertujícím vstupu AIN0 větší, než napětí na invertujícím vstupu AIN1, je výstup komparátoru nastavený do hodnoty log. 1.

Ve schématu zapojení je na invertující vstup komparátoru připojen výstup z RC oscilátoru a na neinvertující vstup komparátoru je připojena reference jako hodnota napájecího napětí. Zpětnou vazbu v zapojení vytváří na mikrokontroléru pin PB7 (SCK), který je nastaven jako výstup komparátoru.



Obrázek 30 – Blokové schéma interního napěťového analogového komparátoru [4]

Při použití analogového napěťového komparátoru lze softwarově generovat přerušení při překlopení komparátoru např. z log.0 na log.1, z log.1 na log.0, nebo při libovolné změně. Přerušení rozdělujeme na funkci Input Capture v timer/counter (*časovač/čítač*) pro zachycení hodnoty časovače od signálu analogového komparátoru a funkci přerušení přímo od analogového komparátoru. Přerušení může být dále uskutečněno pro náběžnou, nebo sestupnou hranu výstupního signálu.

Vstupní a výstupní registr s nastavením přerušení od analogového komparátoru je popsán pomocí následujících tabulek, které jsou obsaženy v katalogovém listu mikrokontroléru ATmega16.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ACD	ACBG	ACO	ACI	ACIE	ACIC	ACIS1	ACIS0	ACSR
Read/Write	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	N/A	0	0	0	0	0	

Obrázek 31 – Registr ACSR [4]

Kde *ACD* je Analog Comp Disable – log.1 (analogový komparátor je vypnutý), *ACGB* je Analog Comparator Bandgap Select – log.1 (vnitřní reference bandgap je připojená na neinvertující vstup komparátoru), *ACO* je Analog Comparator Output (výstup komparátoru), *ACI* je Analog Comparator Interrupt Flag – log.1 (došlo k přerušení), *ACIE* je Analog Comparator Interrupt Enable – log.1 (aktivace přerušení od analogového komparátoru), *ACIC* je Analog Comparator Input Capture Enable – log.1 (aktivace funkce Input Capture v timer/counter) a *ACIS1:0* je Analog Comparator Interrupt Mode Select (výběr typu přerušení).

ACIS1	ACIS0	Interrupt Mode
0	0	Comparator Interrupt on Output Toggle
0	1	Reserved
1	0	Comparator Interrupt on Falling Output Edge
1	1	Comparator Interrupt on Rising Output Edge

Obrázek 32 – Nastavení typu přerušení od analogového komparátoru [4]

V **Obrázek 32** jsou vypsány bitové kombinace pro nastavení přerušení od analogového komparátoru.

V následující tabulce je popsáno nastavení ADC (analogově digitální převodník) multiplexoru pro přivedení na neinvertující vstup analogového komparátoru.

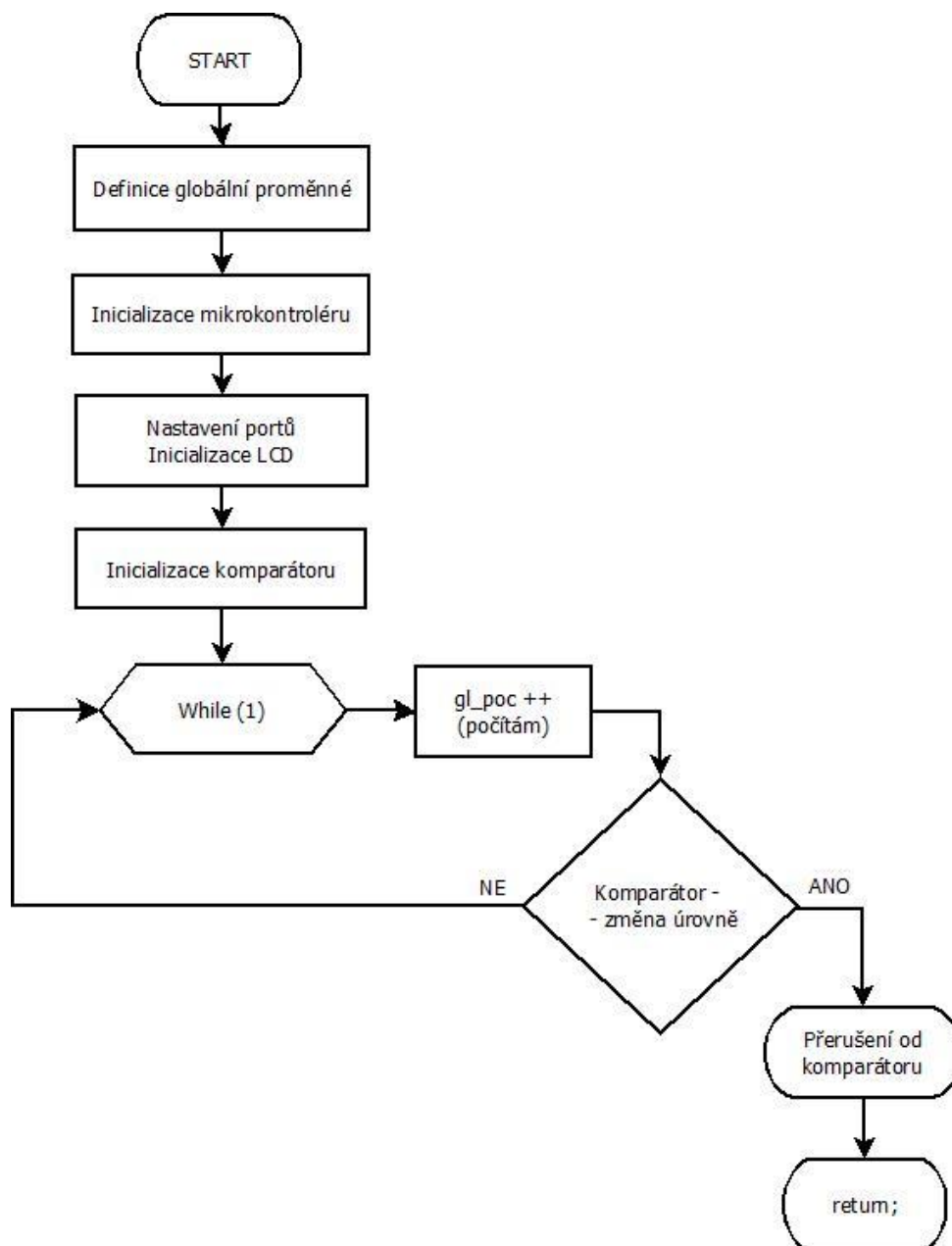
ACME	ADEN	MUX2..0	Analog Comparator Negative Input
0	x	xxx	AIN1
1	1	xxx	AIN1
1	0	000	ADC0
1	0	001	ADC1
1	0	010	ADC2
1	0	011	ADC3
1	0	100	ADC4
1	0	101	ADC5
1	0	110	ADC6
1	0	111	ADC7

Obrázek 33 – Multiplexor pro analogový komparátor [4]

6 Návrh programu

Po návrhu hardwaru zařízení, byl navržen vyhodnocovací software. Program byl navržen ve vývojovém prostředí Atmel Studio 6.2 a vývojový diagram v Dia studiu.

6.1 Vývojový diagram



Obrázek 34 – Vývojový diagram programu

7 Měření

Po hardwarovém a softwarovém návrhu vyhodnocovacího zařízení bylo provedeno několik testovacích měření v průběhu několika dní. Pro měření bylo vybráno několik základních stavebních materiálů. Byla měřena a pozorována reakce měřiče na vlhkost daného měřeného materiálu. Dále byla vytvořena orientační převodní tabulka pro pozorování změn např. elektrické kapacity, která se s vlhkostí daného materiálu měnila.

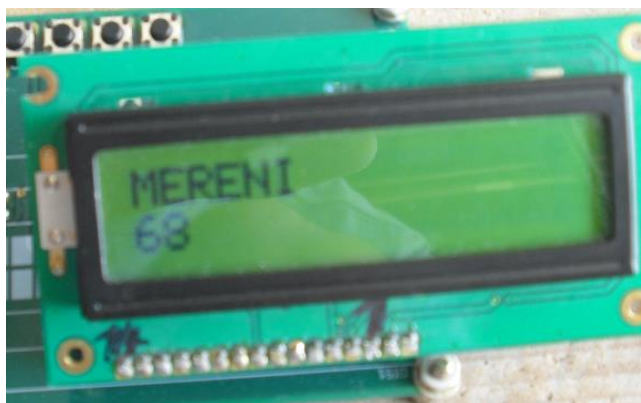
Tabulka 2 – Vybrané měřené stavební materiály [7]

	ϵ_r [-]	ρ_{dn} [kg/m ³]	c_{dn} [J/kg.K]	μ_n [-]	$\delta_n \cdot 10^9$ [S]	λ_p [W/m.K]
Beton - lehký	5 - 9	480 - 680	840	6 - 9	0,031	0,19 - 0,24
Beton - hutný	5 - 9	2200	1020	17 - 23	0,009	1,3
Omítka - vápenato cementovitá	< 12	2000	790	19	0,01	0,99
Dřevo	2,04 - 7,3	600	2510	157	0,0012	0,22

Kde ϵ_r je relativní permitivita, ρ_{dn} je objemová hmotnost v suchém stavu, c_{dn} je měrná tepelná kapacita v suchém stavu, μ_n je faktor difuzního odporu, $\delta_n \cdot 10^9$ je součinitel difuze vodní páry a λ_n je součinitel tepelné vodivosti.

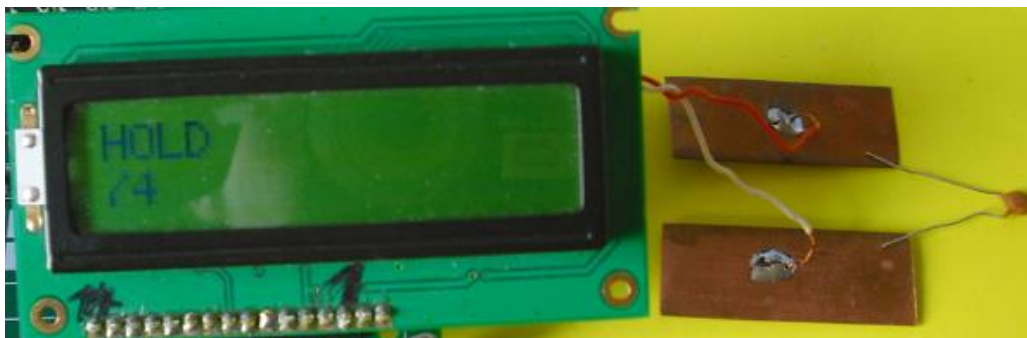
Pro detekci vlhkosti měřených materiálů byly použity dvě totožné tenké měděné elektrody o rozměrech 4 cm x 1,5 cm (délka x šířka). Měděné elektrody byly vystřiženy ze zemnicích pásek, používaných k uzemnění vysokého napětí. Elektrody reprezentují vodivé desky kondenzátoru a měřený materiál reprezentuje dielektrikum mezi elektrodami. Během měření je dodržována symetrická vzdálenost 2 cm od středu elektrod.

Hodnota zobrazovaná na měřiči bez přiložených elektrod k měřenému materiálu znázorňuje počet přerušení za dobu nabíjení elektrické kapacity vyhodnocovacího obvodu. Po přiložení měřících elektrod k měřenému materiálu zobrazovaná hodnota vzroste. Tato pozorovaná hodnota se bude s vlhkostí daného materiálu měnit.



Obrázek 35 – Měřená hodnota (bez elektrod)

Pro testovací měření byla vytvořena orientační převodní tabulka, která udává přibližné hodnoty elektrické kapacity a dobu přerušení. Hodnota doby jednoho přerušení byla naměřena kolem 100 ns. Tato naměřená hodnota doby jednoho přerušení byla vynásobena naměřenou proměnnou. Doba jednoho přerušení se nelineárně mění, ale pro účely této práce je tato doba přijatelná. Pro měření byla dále uvažována skutečnost velikosti hodnoty relativní permitivity vody ($\epsilon_r = 81$) a relativní permitivity měřeného materiálu ($\epsilon_r < 12$), tedy s rostoucí vlhkostí vzroste velikost kapacity. Pro realizaci převodní tabulky bylo změřeno několik elektrických kapacit řádově od desítek pF do desítek μF .



Obrázek 36 – Měřená hodnota kapacity 22 pF

Obrázek 36 znázorňuje měření kapacitoru s hodnotou elektrické kapacity 22 pF. Podobné měření bylo provedeno pro kapacity 220 pF, 100 nF, 3n3 F, 6n8 F, 15 nF, 68 nF, 100 nF a 47 μF . Z těchto hodnot elektrických kapacit byla vytvořena orientační převodní tabulka.

Tabulka 3 – Orientační převodová tabulka

Orientační převod		
Přerušení [-]	čas[ms]	Kapacita [F]
74	> 0,0074	> $22 \cdot 10^{-12}$
124	> 0,0124	> $100 \cdot 10^{-12}$
610	> 0,061	> $220 \cdot 10^{-12}$
905	> 0,0905	> $3,3 \cdot 10^{-9}$
1898	> 0,1898	> $6,8 \cdot 10^{-9}$
17711	> 1,7711	> $68 \cdot 10^{-9}$
30077	> 3,0077	> $100 \cdot 10^{-9}$
65500	> 6,55	> $47 \cdot 10^{-6}$

Po vytvoření orientační převodní tabulky bylo provedeno několik měření za účelem ověřit funkci použitého senzoru. Použit byl kapacitní senzor vyhodnocující dle vytvořené převodní tabulky přibližnou hodnotu elektrické kapacity daného měřeného materiálu.

Prvním měřeným stavebním materiálem byl dřevěný vzorek, konkrétně tvrdý dřevěný trám o rozměrech 36,5 cm x 9,5 cm x 3 cm (délka x šířka x tloušťka). Cílem tohoto měření bylo pozorovat změnu kapacity, tedy vlhkosti, měřeného materiálu za daný čas. Nejprve byla změřena hodnota za suchého stavu. Po změření této hodnoty byl měřený vzorek po dobu 45 min ponořen do vody. Po vyjmutí vzorku z vody byla při venkovní teplotě 20 °C měřena změna kapacity, tedy vlhkosti, za daný čas.

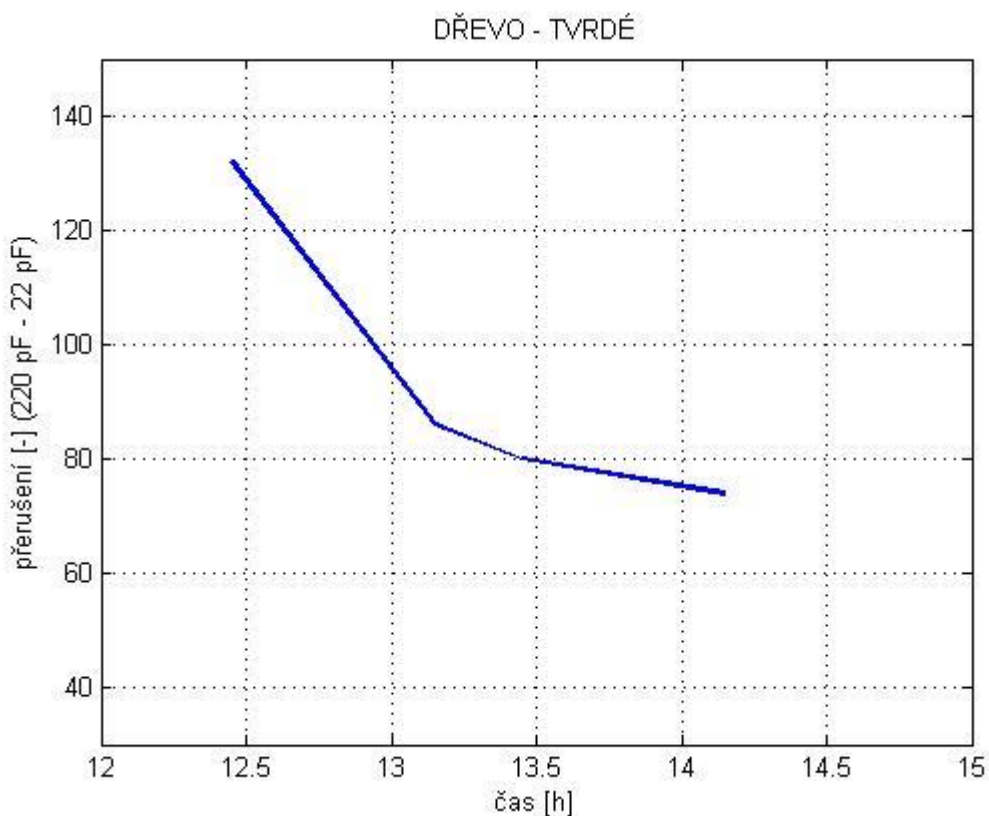
Tabulka 4 – Měřený dřevěný vzorek za suchého stavu

Počet přerušení [-]	71
Kapacita [F]	$> 22 \cdot 10^{-12}$

Tabulka 5 – Měřený dřevěný vzorek

Čas [h:min]	11:45	12:15	12:45	13:15	13:45	14:15
Počet přerušení [-]	45635	33884	132	86	80	74
Kapacita [F]	$> 10 \cdot 10^{-6}$		$> 220 \cdot 10^{-12}$	$> 22 \cdot 10^{-12}$		

*Doba jednoho přerušení je přibližně 100 ns



Obrázek 37 – Graf vysychání měřeného dřevěného vzorku

Druhým měřeným stavebním materiálem byla vápenato-cementovitá omítka. Měření bylo provedeno při pokojové teplotě 20,5 °C pro tři okna v prvním patře domu a tři okna v přízemí domu.

Tabulka 6 – Měření vápenato-cementovité omítky

	1. patro			Přízemí		
	Okno 1	Okno 2	Okno 3	Okno 4	Okno 5	Okno 6
Počet přerušení [-]	71	74	71	71	77	71
Kapacita [F]	$> 22 \cdot 10^{-12}$					

*Doba jednoho přerušení je přibližně 100 ns

Třetí měření bylo provedeno pro betonový vzorek. Měření bylo provedeno v prostoru garáže domu o rozměrech 595 cm x 335 cm x 5 cm (délka x šířka x tloušťka) při venkovní teplotě 20 °C. Provedeno bylo několik měření od středu prostoru garáže.

Tabulka 7 – Měřený beton - lehký (garáž – od středu k výjezdu)

Od středu k výjezdu							
Rozměr [cm]	300	250	200	150	100	50	5
Počet přerušení [-]	86	85	88	80	71	71	83
Kapacita [F]	$> 22 \cdot 10^{-12}$						

*Doba jednoho přerušení je přibližně 100 ns

Tabulka 8 – Měřený beton - lehký (garáž – od středu ke stěně)

Od středu ke stěně							
Rozměr [cm]	300	250	200	150	100	50	5
Počet přerušení [-]	86	85	224	153	164	153	128
Kapacita [F]	$> 22 \cdot 10^{-12}$		$> 220 \cdot 10^{-12}$				

Tabulka 9 - Měřený beton - lehký (garáž – vpravo ke stěně)

Od středu - vpravo (stěna)					
Rozměr [cm]	195	150	100	50	5
Počet přerušení [-]	86	85	85	147	132
Kapacita [F]	$> 22 \cdot 10^{-12}$			$> 220 \cdot 10^{-12}$	

Tabulka 10 - Měřený beton - lehký (garáž – vlevo k oknu)

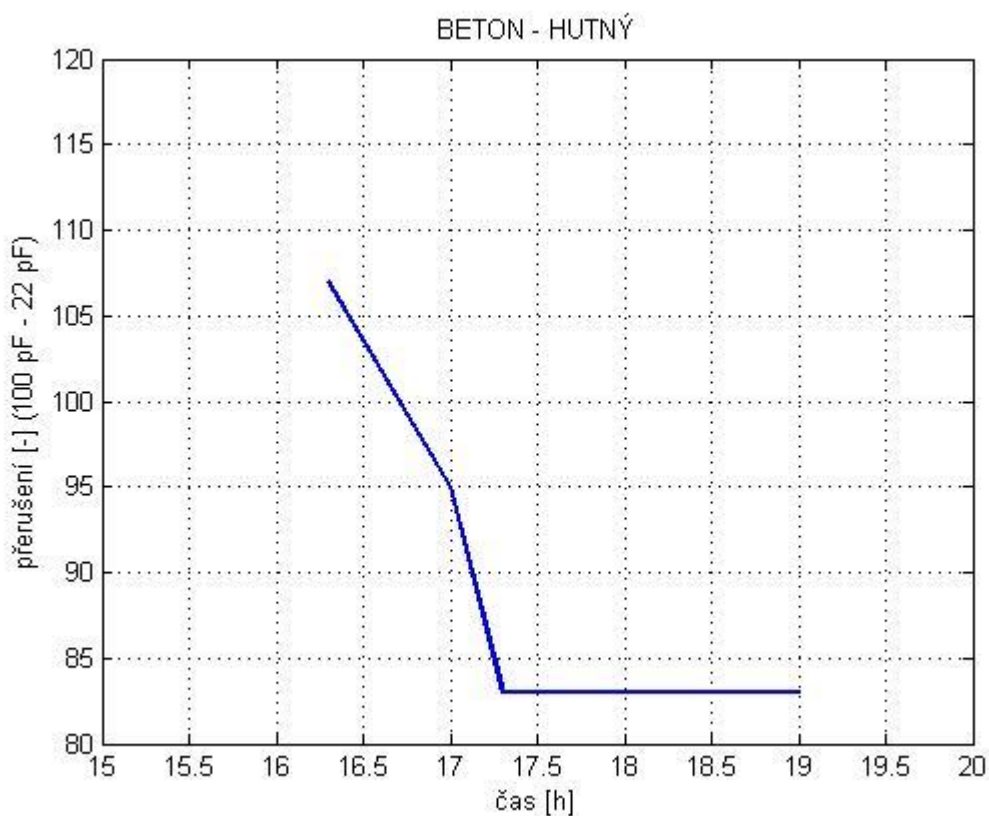
Od středu - vlevo (okna)					
Rozměr [cm]	195	150	100	50	5
Počet přerušení [-]	86	85	144	132	132
Kapacita [F]	$> 22 \cdot 10^{-12}$			$> 220 \cdot 10^{-12}$	

Čtvrtým měřeným stavebním materiálem byl hutný beton, konkrétně betonový obrubník o rozměrech 200 cm x 20 cm x 6 cm (délka x šířka x tloušťka). Měřený betonový vzorek je přibližně 2 roky starý. Cílem tohoto měření bylo pozorovat změnu kapacity, tedy vlhkosti, měřeného materiálu za daný čas. Měřený betonový vzorek byl po dobu přibližně 20 min vystaven přímému dešti. Za 25 min, po dešti, byl při venkovní teplotě 18 °C měřený materiál po 30 min pravidelně měřen.

Tabulka 11 – Měřený betonový vzorek (beton hutný)

Čas [h:min]	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30
Počet přerušení [-]	593	107	95	83	83	83
Kapacita [F]	$> 100 \cdot 10^{-12}$	$> 22 \cdot 10^{-12}$				

*Doba jednoho přerušení je přibližně 100 ns



Obrázek 38 – Graf vysychání měřeného betonového vzorku

Pro měření betonového obrubníku byla vytvořena tabulka pro orientační zhodnocení míry vlhkosti měřeného materiálu. Pro 100 % vlhkost byla nadefinována hodnota 7100 počtu přerušení. Naměřená hodnota je dána do poměru s hodnotou, která reprezentuje 100 % míru vlhkosti. Hodnoty lze porovnat s reálnými naměřenými hodnotami vlhkosti, které byly měřeny profesionálním měřičem [9].

Tabulka 12 – Beton hutný (obrubník)

Čas [h:min]	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30
Počet přerušení [-]	593	107	95	83	83	83
Kapacita [F]	$> 100 \cdot 10^{-12}$	$> 22 \cdot 10^{-12}$				
Vlhkost [%]	8,35	1,5	1,33	1,16		

*Doba jednoho přerušení je přibližně 100 ns

Závěr

V této bakalářské práci byly shrnuty základní principy měření vlhkosti betonových podlažních vrstev a princip použití kapacitních senzorů. Tato bakalářská práce byla zaměřena především na nedestruktivní metody měření. Teoretické znalosti nedestruktivních metod měření a kapacitních senzorů umožnily navrhnout měřič, schopný vyhodnocovat hodnoty v závislosti na změně vlhkosti daného měřeného materiálu.

Podle navrženého schématu zapojení byla vyrobena, osazena a oživena deska plošných spojů. Navržený software zobrazuje na LCD displeji hodnotu, která je dána počtem přerušení časovače mikroprocesoru za dobu, za kterou se nabije kapacitor vyhodnocovacího obvodu.

Pro vyhodnocování měřené veličiny byl navržen RC oscilátor připojený na interní napěťový analogový komparátor, který je obsažený v mikrokontroléru ATmega16. Hlavní úlohu tohoto RC oscilátoru vytváří RC člen, který je připojen na invertující vstup interního analogového komparátoru. Z poznatku o měření elektrických vlastností betonu a jiných stavebních materiálů je zřejmé, že elektrická kapacita senzoru se bude měnit vlivem obsahu vlhkosti po velmi malých hodnotách, tedy řádově desítky pF [8]. Z důvodu měření velice malých hodnot elektrické kapacity byla zvolena hodnota rezistoru RC členu dostatečně veliká, konkrétně 100 kΩ. Tato hodnota rezistoru určuje dobu, po kterou se bude nabíjet měřená kapacita na maximální hodnotu. Hodnota tohoto rezistoru byla zvolena experimentálně.

V poslední kapitole této bakalářské práce bylo provedeno v průběhu několika dní, za účelem otestování měřiče vlhkosti, několik testovacích měření. První měření bylo uskutečněno pro tvrdý dřevěný trám. Zde byla měřena změna kapacity měřeného vlhkého dřevěného vzorku v závislosti na čase. Měřič nejprve v první hodině měření zobrazoval veliké hodnoty, kterým lze nadefinovat např. 100 % obsah vlhkosti. Po hodině začal měřič zobrazovat hodnoty řádově stovky přerušení a po kratší době se hodnota měřeného dřevěného vzorku ustálila na hodnotě odpovídající řádově desítky pF. Této ustálené hodnotě můžeme přiřadit např. povolené množství obsahu vlhkosti. Naměřené hodnoty byly vyneseny do grafu, ze kterého je patrná doba vysychání měřeného dřevěného vzorku. Dále bylo provedeno několik měření pro vápenato cementovou omítku a betonové vrstvy garáže domu. Z naměřených hodnot omítky je patrné, že v přízemí je udržována menší teplota, než v prvním patře domu a z naměřených hodnot betonové vrstvy garáže je patrné, že u stěn a pod okny je obsah vlhkosti řádově o pár desítek přerušení vyšší, než např. na okraji betonové vrstvy, která je téměř každodenně vystavována přímému slunečnímu svitu. Posledním měřeným vzorkem byl betonový obrubník. Tento měřený betonový vzorek byl po určité době vystaven přímému dešti. Po dešti byl betonový vzorek po dobu přibližně 2,5 h při venkovní teplotě 18 °C opakovaně měřen. Naměřené hodnoty byly vykresleny do grafu, který znázorňuje dobu, po kterou měřený betonový vzorek vysychá. Z naměřených hodnot posledního betonového vzorku je patrná vyšší hodnota ustálení,

než je u naměřených hodnot dřevěného vzorku. Z tohoto důvodu je důležité pro každý měřený materiál jednotlivě nadefinovat podmínky, při kterých bude možno realizovat reálné měření např. hmotnostní vlhkosti, nebo relativní vlhkosti daného materiálu.

Požadované funkce snímače byly ověřeny, senzor reagoval na každý měřený stavební materiál. Hodnoty vypisované na LCD displeji lze matematickými výpočty přepočítat např. na frekvenci, čas, hmotnostní vlhkost, relativní vlhkost, nebo v případě této bakalářské práce na elektrickou kapacitu. Tato metoda měření není definována žádnou normou ČSN, tudíž je toto měření pouze orientační a bez záruky. Navržený měřič komunikuje s PC za účelem přenosu aktuálně naměřených dat do paměti počítače.

Literatura

- [1] POCHMANOVÁ, Petra a Ivan MISAR. Kontrolní metody pro stanovení vlhkosti podkladních vrstev podlah. [online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/podlahy/8050-kontrolni-metody-pro-stanoveni-vlhkosti-podkladnich-vrstev-podlah>
- [2] HRUŠKA František. Senzory, fyzikální principy. Zlín, 2011.
- [3] ZEHNULA Karel. Snímače neelektrických veličin. SNTL, Praha 1977.
- [4] Atmel 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32KBytes In-System Programmable Flash. ATMEL CORPORATION. [online]. [cit. 2013-10-29]. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Summary.pdf
- [5] ANTON, Ondřej, Vendula BLAŽKOVÁ a Leonard HOBS. Měření vlhkosti v praxi soudního inženýra. In: Soudní inženýrství. [online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2005-03-175-178.pdf>
- [6] JANSER GMBH. *Vlhkoměr CME4* [online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: [http://www.videopodlahy.cz/userfiles/files/vlhkomer%20cme%204_cz\(1\).pdf](http://www.videopodlahy.cz/userfiles/files/vlhkomer%20cme%204_cz(1).pdf)
- [7] LABOUTKA, Karel a Tomáš SUCHÁNEK. Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů. [online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu#t01>
- [8] KUSÁK, Ivo, Bohumil KOKTAVÝ a Miroslav LUŇÁK. Měření elektrických parametrů u betonových plátů různého složení. [online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: http://www.ndt.net/article/defektoskopie2011/papers/71_p.pdf
- [9] HORSKÝ, Jan a Šrubařová PETRA. Měření vlhkosti betonu na mostovkách. In: [online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://www.mosty.cz/index.asp?module=ActiveWeb&page=WebPage&DocumentID=3108>
- [10] ČSN 74 4505. *Podlahy - Společná ustanovení*. 1.8.2008.
- [11] ČSN EN ISO 12570. *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení vlhkosti sušením při zvýšené teplotě*. 1.9.2001.

Příloha A – Fotografie měřených vzorků a komunikace UART



Obrázek 39 – Dřevěný vzorek



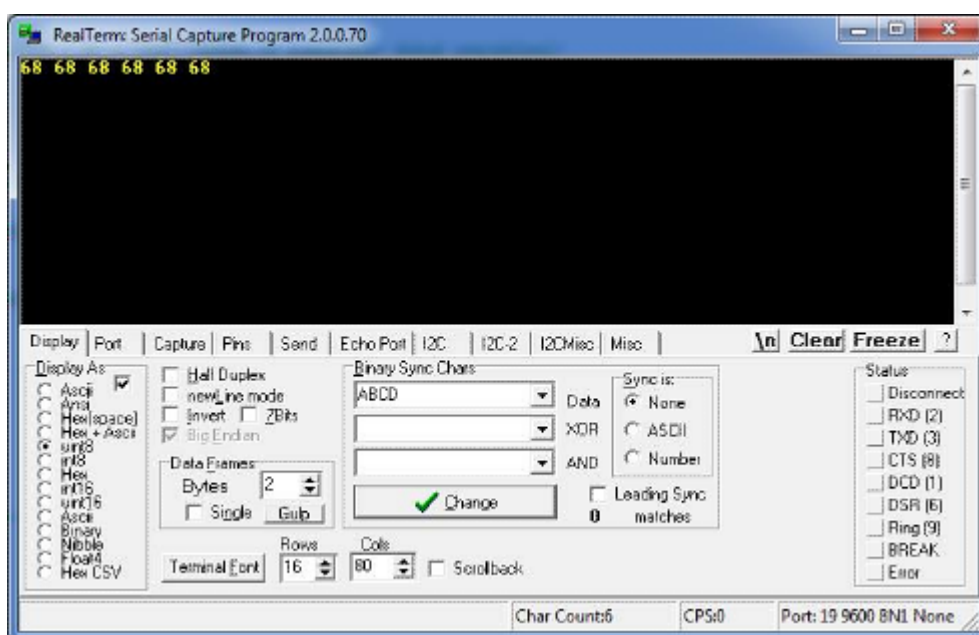
Obrázek 40 – Omítka vápenato-cementovitá



Obrázek 41 – Garáž (beton lehký)

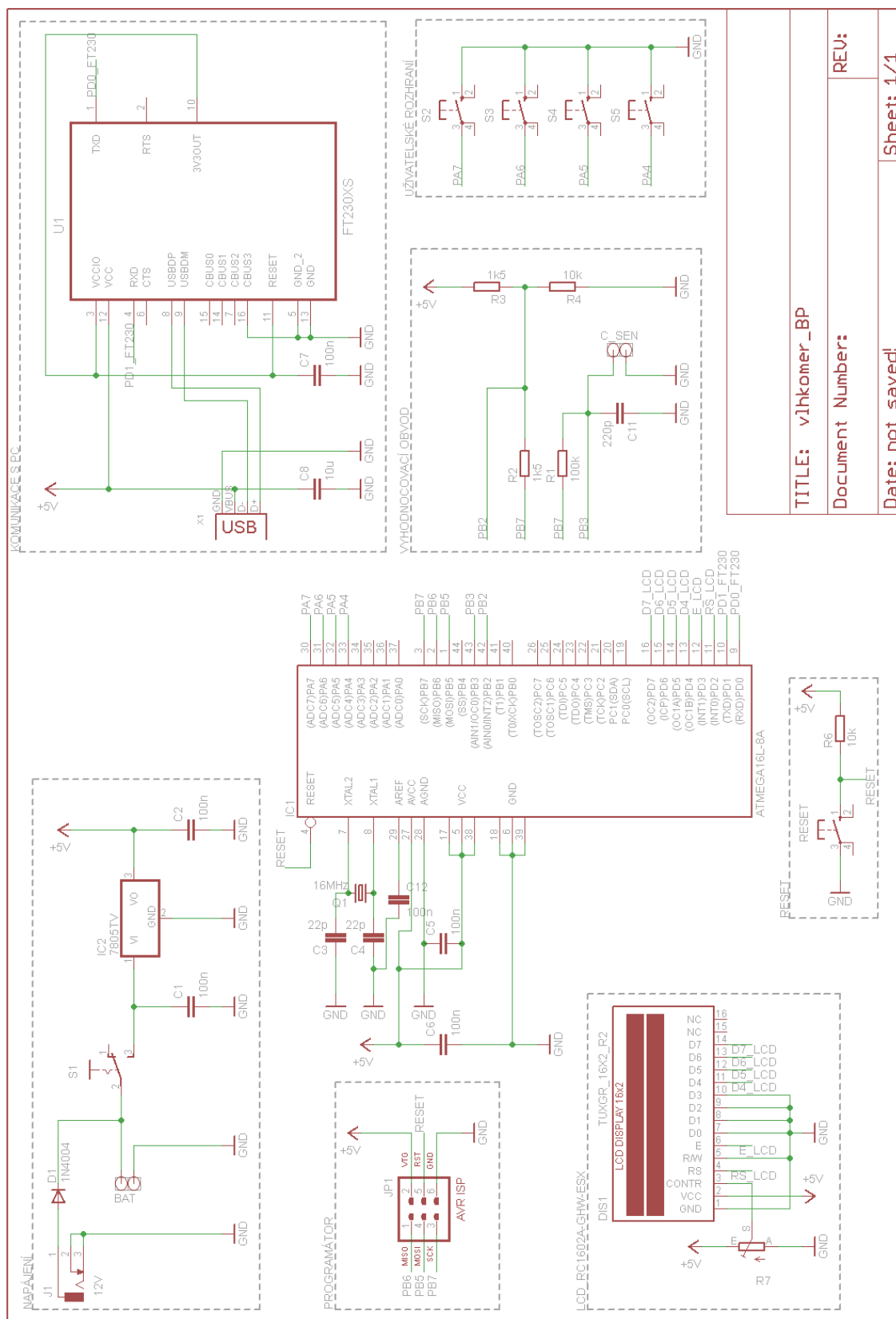


Obrázek 42 – Betonový vzorek (beton hutný)



Obrázek 43 – Komunikace UART

Příloha B – Schéma zapojení



Obrázek 44 – Schéma zapojení

Příloha C – Zdrojový kód program preruseni.atsIn

CD