

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra elektrotechniky a automatizace



Diplomová práce

Zařízení pro kontrolu stavu vody ve studni

Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislava Papežová, CSc.

Diplomant: Bc. Tomáš Bohuslav

© 2015 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra elektrotechniky a automatizace

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Tomáš Bohuslav

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Zařízení pro kontrolu stavu vody ve studni

Název anglicky

The device for water check in pumpwell

Cíle práce

Návrh a realizace zařízení pro kontrolu stavu vody ve studni. Účelem zařízení je kontrola minimálního stavu vody s výstupem pro blokování čerpadla v případě poklesu stavu vody pod definované minimum a možnost získání informace o aktuálním stavu vody ve studni v číslicovém tvaru.

Metodika

1. Výběr vhodného typu tržně dostupného hladinového snímače pro použití v domácí kopané studni
2. Výběr vhodného typu řídicí jednotky a periferních obvodů včetně přizpůsobení rozhraní
3. Na základě předchozího rozboru proveďte návrh zařízení pro kontrolu stavu vody ve studni
4. Systém vybavte potřebným řídicím programem
5. Systém realizujte a ověřte jeho funkčnost

Doporučený rozsah práce

40 – 50 stran

Klíčová slova

hladinoměr, mikropočítač, čerpadlo

Doporučené zdroje informací

Alexandrescu, A.: Moderní programování v C++ návrhové vzory a generické programování v praxi, Brno, Computer Press, 2004

Ďaďo, S., Kreidl, M.: Senzory a měřicí obvody, Praha, ČVUT, 1996, 1. vyd.

ISBN: 8001015009

Matoušek, D., Brtník, B.: Programování mikrokontrolérů s jádrem 8051 v jazyce C: názorné příklady a funkční programy pro AT89S52, BEN – technická literatura, 2010, ISBN: 8073002647

Matoušek, D.: Práce s inteligentními displeji LCD, Elektronická kniha ve formátu PDF na CD ROM, BEN – technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-273-2

Předběžný termín obhajoby

2015/05 (květen)

Vedoucí práce

doc. Ing. Stanislava Papežová, CSc.

Elektronicky schváleno dne 15. 1. 2014

prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 3. 2. 2014

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 01. 04. 2015

Zařízení pro kontrolu stavu vody ve studni

The device for water check in pumpwell

Souhrn

Cílem této práce bylo vytvořit zařízení, řízené mikropočítačem, pro řízení periferních zón rozvodu vody ze studně. Součástí je analýza dostupných prvků pro tento systém. V první části je uveden přehled technologií používaných k měření a detekci hladiny vody, dále teoretické rozebrání většiny používaných hladinoměrů, pro spojitě i bodové měření hladiny. Součástí vytváření projektu byl i výběr senzoru a počítače pomocí vícekritériálního rozhodování. Projekt je pak řešen s pomocí uvedených elementů. Jako zobrazovací a ovládací prvek byl zvolen dotykový LCD displej. Předmětem měření a zkoumání byly vlastnosti ultrazvukového senzoru proti vodní hladině především závislost jeho přesnosti na teplotě vzduchu, kterým se vlny šíří.

Klíčová slova: hladinoměr, mikropočítač, čerpadlo

Summary

The aim of this work was to create a device controlled by a microprocessor for controlling peripheral zones of the water supply from pumpwell. Part of the analysis of available components for the system. The first section provides an overview of the technologies used to measure the water level. Analysis of the majority of level used for continuous and point level measurement. Part of creating the project was the selection of the sensor and the computer using a multi-criteria decision. The project is then solved with the help of those elements. The display and control was selected the LCD touchscreen. The object of measuring and examining the properties of the ultrasonic sensor to the water is mainly dependent on the accuracy of the air temperature to which the wave propagates.

Keywords: level indicator, microcomputer, pump

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíle práce a metodika	2
2.1	Cíle práce.....	2
2.2	Metodika práce.....	2
3	Měření výšky hladiny.....	3
3.1	Mechanické hladinoměry.....	3
3.1.1	Průhledítka a stavoznaky.....	3
3.1.2	Ponorná tyč	3
3.1.3	Otevřené nádrže	4
3.1.4	Hermetické nádrže.....	5
3.1.5	Hladinoměry s ponorným tělesem	6
3.2	Hydrostatické hladinoměry	7
3.3	Elektrické hladinoměry	7
3.3.1	Potenciometrické	7
3.3.2	Odporové pásky.....	8
3.3.3	Kapacitní.....	9
3.4	Optické hladinoměry.....	10
3.4.1	Transmisní.....	10
3.4.2	Měření doby letu	10
3.4.3	Reflexní snímače	11
3.5	Ultrazvuková hladinoměry	12
3.5.1	Vlastnosti ultrazvuku.....	12
3.5.2	Generátory ultrazvuku	13
3.5.3	Rychlost šíření zvuku.....	15
3.5.4	Spojité měření hladiny	16
3.5.5	Zpracování signálu	17
3.5.6	Radarové hladinoměry.....	19
3.5.7	Odraz elektromagnetických vln.....	21
3.5.8	FM-CW radar	21
4	Analýza typů studní.....	24
4.1	Vrtané studny	24
4.2	Kopané studny	24
4.3	Studny s volnou hladinou	25

4.4	Studny s napjatou hladinou	25
5	Realizace projektu.....	26
5.1	Návrh projektu.....	27
5.2	Výběr řídicího systému.....	28
5.2.1	PIC32 PINGUINO	28
5.2.2	BeagleBone	29
5.2.3	Raspberry Pi 2 Model B.....	30
5.2.4	Arduino MEGA.....	31
5.2.5	Výběr počítače podle kritérií	32
5.3	Výběr senzoru	33
5.3.1	Micro Detectors SU-3/A0-0V	34
5.3.2	Micro Detectors TU3/C3-0E.....	35
5.3.3	Micro Detectors QU6/D1-0E	36
5.3.4	DI-SORIC USC 30 M 6000 I0/10PSK-BSL.....	37
5.3.5	Výběr senzoru podle kritérií	38
5.4	Dotykový LCD TFT displej.....	39
	TFT LCD	40
5.4.1	TFT LCD technologie.....	40
5.4.2	Dotyková vrstva	41
5.4.3	Ostatní použité elementy	42
5.5	Kompletní zapojení.....	44
5.6	Programování mikrokontroléru ATMEL	45
5.6.1	Speciální funkce	48
6	Měření	50
6.1	Lineární charakteristika UZ senzoru.....	50
6.2	Závislost naměřené vzdálenosti na teplotě vzduchu	51
7	Závěr.....	53
8	Použité zdroje literatury.....	55
9	Seznam obrázků	56
10	Seznam tabulek.....	58
11	Seznam příloh	59

1 Úvod

Potřeba měřit výšku hladiny kapalin je pro lidstvo věčnou nutností. Od historicky nejstarších aplikací, kdy byly budovány zavlažovací systémy na řekách Eufrat a Tigris, až po zjištění nejnižší hladiny v říčním korytě pro budování brodu.

Dnešní využití hladinoměrů je neodmyslitelně spjaté s řízením technologických procesů v různých odvětvích průmyslu. Hladinoměr dává takřka neomylně odpověď na základní otázku „Kolik?“, určuje kolik materiálu je k dispozici, kolik se ho zpracuje na jeden cyklus a mnoho dalších aplikací. Hladinoměr je také neodmyslitelnou součástí každého motorového vozidla, detekce hladiny paliva, motorového oleje, brzdové kapaliny, kapaliny do ostřikovačů, chladícího média.

Každý, kdo má studnu, se potýká s problémem, že nedokáže určit množství vody uvnitř. Běžně se používají nejjednodušší technologie pro detekci hladiny. Proto se pokusíme navrhnout ekonomicky dostupný systém, který nejen že bude spojitě měřit výšku vodní hladiny a její hodnotu přepočítávat na objem vody, ale dokáže i ovládat periferní čerpadla a ventily. To vše s omezením, aby nedošlo k situaci, kdy bude ve studni nedostatek vody pro využívání jako zdroje pitné vody.

Vybranou studnou je kopaná studna rodinného domu, kde si uživatel sám určí parametry studny a práce bude cílená.

2 Cíle práce a metodika

2.1 Cíle práce

Cílem této diplomové práce je poskytnout čtenáři přehled o možnostech technologie měření hladiny kapalin.

Nedílnou součástí je vytvoření projektu pro řízení běžné studny, detekci její hladiny a ovládání periferních zařízení. Projekt takřka nemá vytyčená pravidla, ale jeho myšlenkou je jednoduchost a ekonomická dostupnost pro podobné využití.

Samozřejmostí je zkoumání chování elementů systému, i jeho samotného. Další částí je pak měření charakteristik, řešení možných vylepšení v rámci zjištěných dat.

2.2 Metodika práce

Využijte informace z dostupných zdrojů odborné literatury, pro zachování aktuálnosti je možno čerpat z odborných časopisů a stránek firem, zabývajících se touto problematikou.

Zrealizujte a vytvořte systém pro řízení periferních součástí vodního vedení ze studně, který bude řízen programem a ovlivněn výškou hladiny. Hlavním důvodem je eliminace situace, kdy klesne voda ve studni pod krajní mez a nebude moci sloužit ani jako zdroj pitné vody.

3 Měření výšky hladiny

Potřeba měřit výšku (polohu) hladiny bývá spojena s optimalizací zařízení nádrže. Především jde o ochranu proti přetečení nebo určení množství produktu v nádrži. Ve většině případů není měření výšky hladiny konečný proces, obsluha většinou potřebuje získat objem média. U nádrží o tvaru vertikálního válce je přepočítání jednoduché, ovšem pokud má nádoba jiný (složitý) tvar, pak objem není lineární funkcí výšky hladiny měřené látky, přepočítání je dáno parametry nádrže. Nádrže automobilů nebo letadel mají všeobecně nádrže na paliva ve tvarech, které určuje design karoserie, výpočet objemu v těchto nádržích tak bývá z těch náročnějších. [1,3]

3.1 Mechanické hladinoměry

Jedná se o hladinoměry s pohyblivými mechanickými částmi. Jde o hojně využívanou technologii, v současném trendu jsou tyto metody nahrazovány alternativními bezkontaktními snímači. [1,5]

3.1.1 Průhledítka a stavoznaky

Jedním z nejjednodušších indikátorů hladiny jsou prosklené průzory ve stěnách nádob, přes které lze pozorovat výšku hladiny. [1]

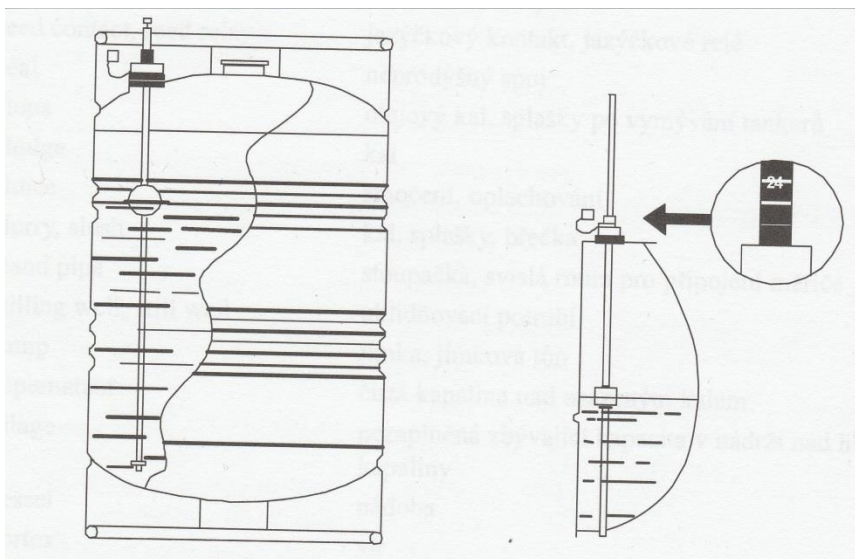
3.1.2 Ponorná tyč

Snad nejdéle používaným nástrojem pro zjištění výšky hladiny je ponorná tyč. Asi nejnámější aplikací jsou stupnice na březích řek pro určování jak výšky hladiny, tak i povodňového nebezpečí.

Ještě jednodušší formou ponorné tyče je svislá tyč ponořená do nádoby až k jejímu dnu, na které se po vyjmutí zkoumá délka smočené části. Nejsou vhodné především při manipulaci s chemickými, nebo toxickými látkami. [1,5,6]

Mnohem vhodnější je realizace ponorné tyče s měřítkem (obr. 1) nebo stupnicí v uzavřené nádobě v délce celé výšky nádrže. Tyč je shora zajištěna víčkem a uvnitř nádrže je na ni navlečen prstencový plovák obsahující permanentní

magnet. Pro zjištění výšky hladiny obsluha otevře víčko, vytahuje měrnou tyč až dokud konec tyče (taktéž vybavený permanentním magnetem) nedosáhne výšky plováku, který je na hladině. Obsluha zjistí změnu hmotnosti tyče, tj. zda vzájemným silovým působením došlo k zachycení plováku k tyči. Ze stupnice odečte výšku hladiny a tyč opět ponoří. Dle Archimedova zákona musí být vztlaková síla větší než silové působení magnetů, aby po ponoření došlo k oddělení plováku od konce měrné tyče. [1,5]



Obrázek 1 - Ponorná tyč [1]

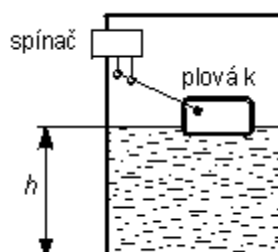
3.1.3 Otevřené nádrže

V otevřených nádržích můžeme pro detekci dosažení předem stanovené výšky hladiny použít plovákové hladinoměry. Základem jejich konstrukce je plovák, který plove po měřené hladině kapaliny. Plovák je pomocí lana, lanka nebo lehkého řetízku vyveden přes kladku ven z nádrže, obvykle se používá protizávaží, především jako ochrana proti rozkývání plováku při neklidné hladině. Výška hladiny je pak odečítána přímo polohou protizávaží, například na přiložené stupnici, nebo se signál pomocí převodníku převádí na elektrický signál, který může být dále zpracováván. [1]

Převodníkem na elektrický signál může být například vhodný potenciometr, který bude speciálně mechanicky spojen s lanem a při změně polohy plováku na hladině se změní velikost jmenovitého odporu prostřednictvím změny polohy

jezdce po odporové dráze. Takto konstruované snímače jsou velice jednoduché avšak vysoce spolehlivé. Ovšem vyžadují precizní mechanické provedení, především z důvodu minimalizace třecích momentů a dlouhé životnosti. [7]

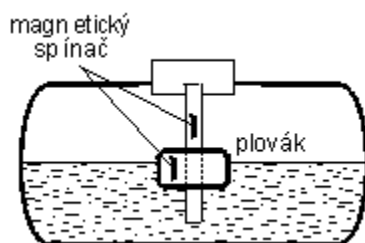
Další aplikací elektrického převodníku může být spínač ovládaný táhlem pevně spojeným s plovákem. Aplikace na obrázku 2 naznačuje provedení takového typu snímače. Při dosažení kritické hladiny dojde prostřednictvím táhla k sepnutí snímače. Nelze tedy sledovat hladinu kontinuálně, avšak pouze v jednom bodě.



Obrázek 2 - Plovákový hladinoměr (spínač) [1]

3.1.4 Hermetické nádrže

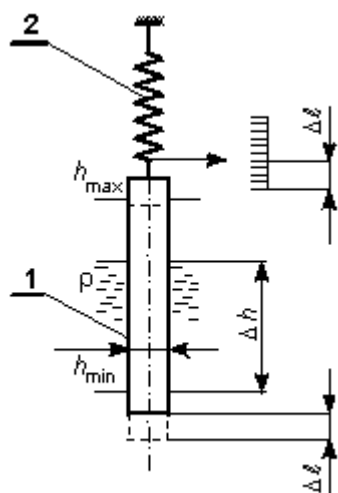
Pro měření výšky hladiny v uzavřených nádržích se používají plováky ve tvaru prstence, které se pohybují po vodicích tyčích. Poloha plováku je pak snímána pomocí magnetického kontaktu (obr. 3), pouze dvoustavově. Tento snímač lze realizovat i pro více snímacích bodů a to pomocí smyček s rozdílným odporem, na kterých budou jednotlivé magnetické kontakty v rozdílných výškách. Vyhodnocením odporu sepnuté smyčky lze pak jednoznačně určit aktuální výšku hladiny kapaliny. [1]



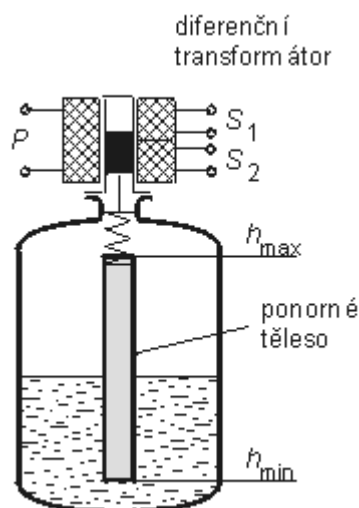
Obrázek 3 - Plovákový hladinoměr (magnetické kontakty) [1]

3.1.5 Hladinoměry s ponorným tělesem

Jsou principiálně založeny na platnosti Archimedova zákona a na principu nivelace sil (obr. 4). Změnou výšky hladiny se ponoří ponorné těleso (1) a síla působící na pružinu (2) je pak dána vlastní tíhou ponorného tělesa, zmenšenou o vztlakovou sílu, která se mění s výškou hladiny. Jelikož vždy dojde k rovnováze sil, lze z polohy pružiny odečíst výšku hladiny, například pomocí přiložené stupnice nebo pomocí elektrického převodníku, obdobně jako u hladinoměřů pro otevřené nádrže. Alternativní elektrický převodník je znázorněn na obr. 5, jde o aplikaci s diferenčním transformátorem (indukčností snímač). [5,6]



Obrázek 5 - Hladinoměr s ponorným tělesem [1]

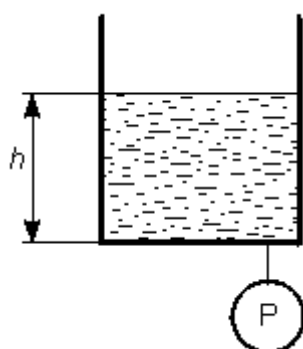


Obrázek 4 - Hladinoměr s diferenčním transformátorem [1]

3.2 Hydrostatické hladinoměry

Tento typ snímačů vyhodnocuje výšku hladiny na základě měření hydrostatického tlaku kapaliny uvnitř nádře. Jelikož je výsledná hodnota závislá na měřeném tlaku, ale i na hustotě kapaliny (takže i na její teplotě) je třeba měřit i teplotu média, protože ovlivňuje jeho objem. [1,2]

Hydrostatický tlak lze měřit pomocí polovodičových tenzometrů, kapalinových nebo deformačních tlakoměrů. Na obr. 6 je znázorněno měření v otevřené



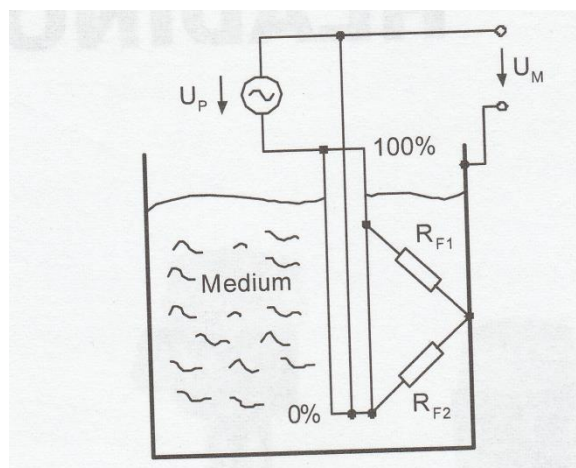
Obrázek 6- Hydrostatický hladinoměr v otevřené nádobě [1]

nádobě, pokud by nádoba byla naopak uzavřená, tak bychom kromě tlaku na dně nádoby měřili i tlak u víka (v nejvyšším bodě), protože v otevřené nádobě pro výpočet považujeme atmosférický tlak jako tlak působící na hladinu. V uzavřené nádobě je tlak působící na hladinu variabilní. [1]

3.3 Elektrické hladinoměry

3.3.1 Potenciometrické

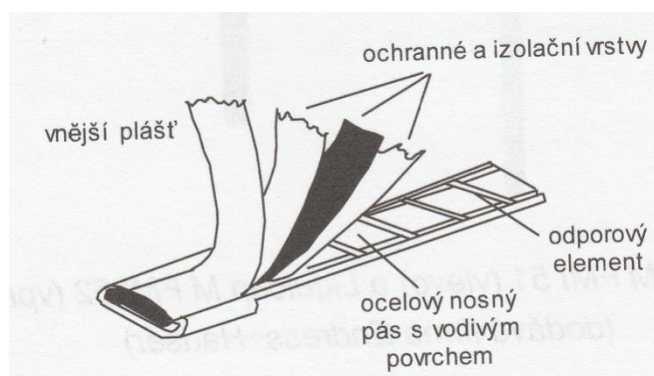
Pokud je měřeným médiem vodivá kapalina a nádoba kovová, pak můžeme její výšku měřit potenciometricky. Do kapaliny je ponořena sonda, která tvoří odporovou dráhu s variabilním odporem a nízkou rezistivitou (obr. 7). Vodivá kapalina pak tvoří jakéhosi jezdce potenciometru, takže ve výšce hladiny je z potenciometrické dráhy snímáno adekvátní napětí. [1,10]



Obrázek 7 - Hladinoměr – Potenciometrický [1]

3.3.2 Odporové pásky

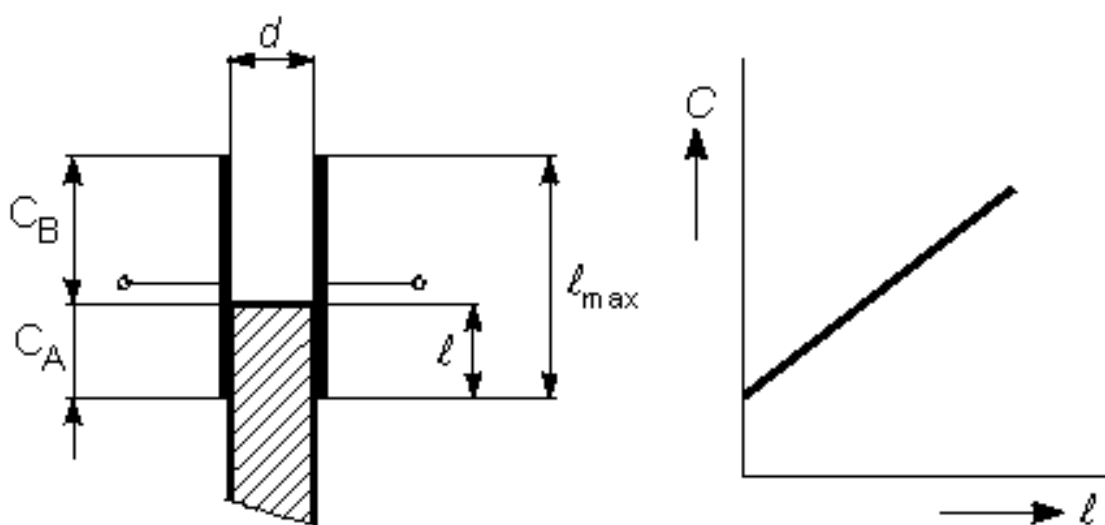
Princip funkce odporové pásky vychází především z její konstrukce (obr. 8). Nosným elementem je ocelový pás s vodivým povrchem, na kterém je přes izolační vrstvu uložen odporový element, který je spirálově navinut po celé délce pásky. Neprodyšné plastové pouzdro (vnější plášť) celou konstrukci uzavře. Pokud je tato pásky ponořena do kapaliny je vlivem hydrostatického tlaku deformována a spirálový vodič zkratuje odporovou dráhu v odpovídající délce. Pokud je pásek v klidovém stavu, pak je odpor maximální. Odpor se tedy se zvyšující se hladinou snižuje. [1,10]



Obrázek 8- Konstrukce odporového pásky [1]

3.3.3 Kapacitní

Většina elektrických hladinoměů převádí výšku hladiny na měrnou elektrickou veličinu. Kapacitní snímače lze využít především ke kontinuálnímu měření, ale i k signalizaci extrémních stavů hladiny. Snímače jsou realizovány v různých konstrukčních variacích, ty jsou závislé především na vlastnostech měřené kapaliny nebo na tvaru nádoby.[5,6,7]



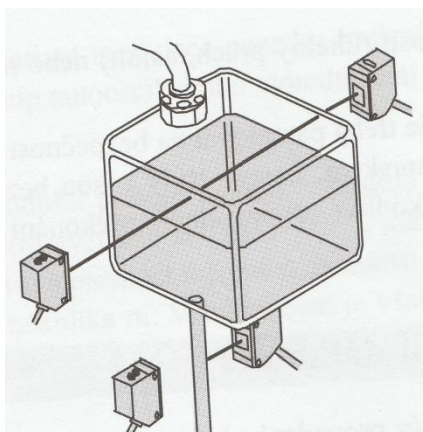
Obrázek 9 - Kapacitní snímač [1]

Ke změně jmenovité kapacity dochází změnou dielektrika v prostoru mezi elektrodami kondenzátoru, za předpokladu, že měřená kapalina má jinou permeabilitu než látka ve zbytku nádoby. Jak je znázorněno na obrázku 6 – dochází pak k paralelní kombinaci dvou kondenzátorů C_B a C_A , jejichž výsledná hodnota C je přímo úměrná výšce hladiny. [1]

3.4 Optické hladinoměry

3.4.1 Transmisní

Transmisní, nebo také absorpční, snímače vysílají paprsek světla ve viditelném spektru skrz průsvitnou část nádoby (viz kapitola 3.1.1). Ve chvíli kdy hladina dosáhne výšky optického paprsku, je paprsek pohlcen. Přijímač jej pak nezachytí. Jde o metodu, kterou lze měřit pouze kritickou výšku hladiny, nelze ji využít pro spojité měření. Snímání v nádobě s kapalinou je znázorněno na obr. 10. [5,6]



Obrázek 10 - Transmisní senzor hladiny [1]

3.4.2 Měření doby letu

Nejčastěji používaná metoda v hladinoměrech je založena na vyslání světelného paprsku (Laser) a měření doby jeho návratu do přijímače, který je v jedné ose s vysílačem. Geometrie snímače je velmi jednoduchá, nezáleží na vzdálenosti snímače od hladiny jako u jiných optických snímačů. [1]

3.4.2.1 Pulsní laser

Principiálně nejjednodušším principem měření doby letu, vyžaduje však vysokou rychlost výpočtu, tzn. rychlé obvody pro zpracování signálu. Rychlost světla je přibližně $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, při vzdálenostech v řádech metrů je čas letu paprsku v desítkách pikosekund. Z důvodu těchto extrémních časových nároků je přesnost měření hladiny v řádech metrů dosahována okolo 10 mm, jedná se tedy o vcelku přesné měření. [1,10]

3.4.2.2 Amplitudová modulace

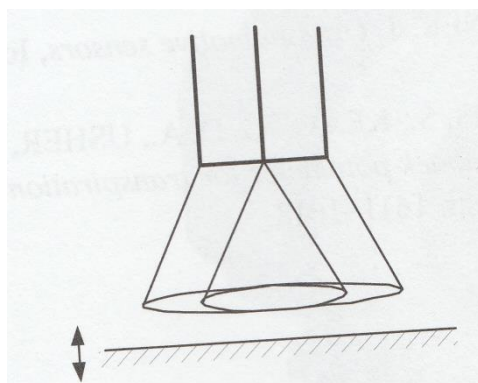
Intenzita paprsku těchto je pomocí AM modulována sinusovým signálem o vysoké frekvenci. Přijímač pak vyhodnocuje dobu letu prostřednictvím fázového posunu mezi vysílaným a přijímaným paprskem.

Maximální rozsah měření, kdy lze jednoznačně určit vzdálenost, je omezen na polovinu vlnové délky $\lambda/2$, vlnovou délku určuje frekvence AM. [1]

Jelikož rychlost vyhodnocení není u hladinoměru kritickým parametrem, lze využít možnosti průměrování, tj. použít pro vyhodnocení více frekvencí AM (tím vyloučit nejednoznačnost) a výsledek měření dále zpracovat. [1,3]

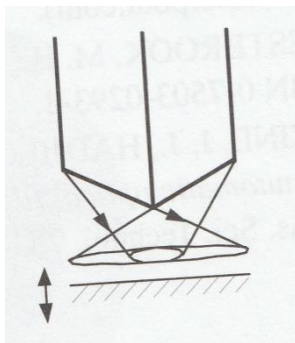
3.4.3 Reflexní snímače

Stejně jako u měření doby letu i tato metoda využívá odrazu optického paprsku od hladiny kapaliny. Ovšem v tomto případě není vysílač a přijímač v jedné ose. Vysílaný paprsek je optickým vláknem přiveden k vysílači, který ho vyzáří k cíli,



Obrázek 11 - Reflexní senzor s rovnou čelní plochou [1]

paprsek se odrazí od hladiny a je snímán přijímačem, směrem k druhému optickému vláknu. Vysílací a přijímací zařízení senzoru má čelní plochu (obr. 11). Číslicová aparatura použitých optických vláken přesně definuje maximální úhel paprsku jak na vstupním, tak výstupním zařízení a tím i maximální překryv osvětlené sběrné plochy. Pokud dochází ke změně polohy hladiny, pak se tento překryv mění se vzdáleností cíle. [1]



Obrázek 12 Reflexní senzor se zkosenou čelní plochou [1]

Řádově lepší využití optického vlákna s ohledem na jeho kritický úhel je dosaženo použitím zkosených čelních sběrných ploch (obr. 12).

Pro oba případy platí, že velikost překryvu (množství světla) na čelních plochách bude poměrné s polohou hladiny. Převodní charakteristika tohoto snímače je vysoce nelineární. [1,7]

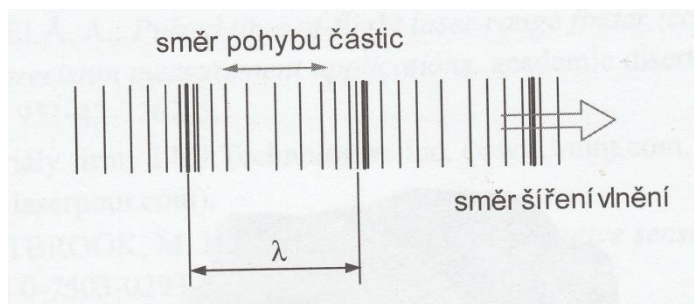
3.5 Ultrazvuková hladinoměry

Senzory pracující s technologií vysílání a přijímání zvukových vln mimo pásmo slyšitelnosti člověka. [6]

3.5.1 Vlastnosti ultrazvuku

O ultrazvuku hovoříme, pokud zvuk, šířící se okolím, má pracovní frekvenci ležící nad pásmem slyšitelnosti člověka (20 kHz). Principy ultrazvukových senzorů lze využít i ve zbytku zvukového pásma, tj. ve frekvencích nižších než 20 kHz, pak ovšem hovoříme o senzorech sonických.

Podstatou šíření zvuku ve vzduchu (o všech frekvencích) je charakteristické vlnění, při kterém dochází k zhušťování a zředňování vzduchu (obr. 13), dochází tedy ke změně tlaku vzduchu a vytváří se akustický tlak. Z toho vyplývá, že zvuk



Obrázek 13 - Akustické vlnění [1]

se nemůže šířit ve vakuu, pro takové aplikace je ultrazvukový snímač nepoužitelný. To je velký rozdíl např. od vlnění magnetického, kde se vlny šíří podélně. [1,6]

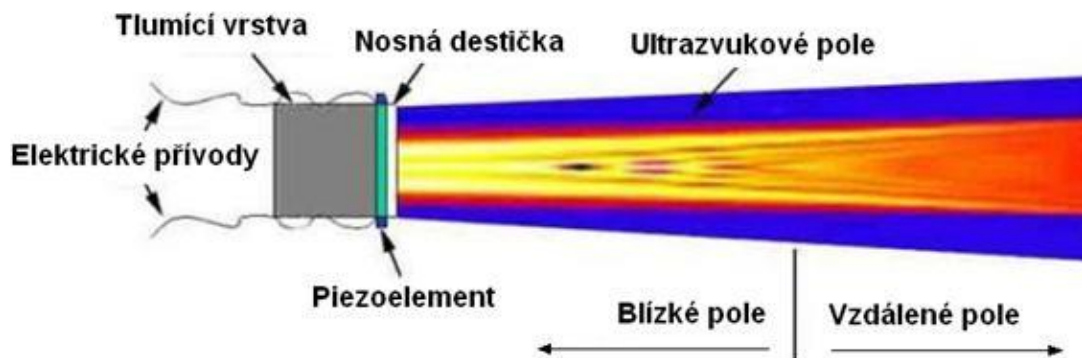
Intenzita zvuku v prostoru klesá. Přijímač odrazivších se vln, který vyhodnocuje vzdálenost, obvykle využívá kompenzační nástroje pro rostoucí útlum signálu. Použito může být např. časově proměnlivé zesílení (vlny, které se k přijímači odrazí později, budou zesíleny více, než ty první).

Velkou výhodou ultrazvuku je bezkontaktnost, snímač se materiálu vůbec nedotýká, pokud je měření prováděno shora. Hlavní nevýhodou je pak silná závislost na atmosférických vlastnostech. Rychlost šíření zvuku je silně závislá na teplotě. Velký útlum způsobuje i napětí hladiny, v těchto případech bývá útlum tak velký, že odrazy neposkytují použitelné echo a měření není možné. [1]

3.5.2 Generátory ultrazvuku

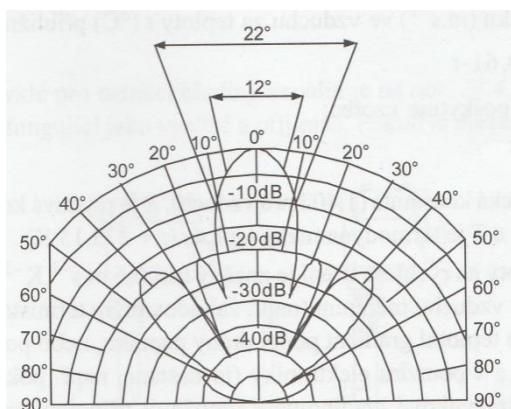
Pro generování a stejně tak zachycení ultrazvuku se využívají převodníky elektrického signálu na signál ultrazvukový. Nejčastěji to jsou piezoelektrické převodníky, využívající krystal. Další převodníky (méně zastoupené) mohou být elektrostatické nebo magnetostrikční. [1]

Piezoelektrické převodníky využívají mechanické deformace piezokrystalu po přivedení napětí. Po přivedení napětí o vysoké frekvenci se krystal rozkmitá a pohybem své vnější roviny (vnější ze snímače) rozkmitá i okolní vzduch ve směru šíření. V opačném směru pak musí být tlumící vrstva, aby se ultrazvuk nešířil i opačným směrem, protože krystal mění svůj tvar v celém objemu. Celý piezoelektrický převodník je znázorněn na obr. 14. [1,7]



Obrázek 14 - Konstrukce piezoelektrického převodníku [10]

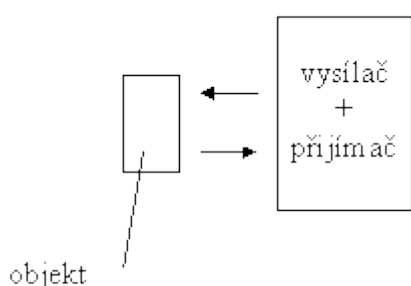
Převodníky elektrostatické využívají pohybu pružné membrány z plastu a tenké vrstvy kovu, která má funkci pohyblivé elektrody, ta je vlivem elektrostatických sil přitahována k elektrodě pevné (uvnitř generátoru), dochází k pohybu membrány, která šíří vzduchem vlnění. [1]



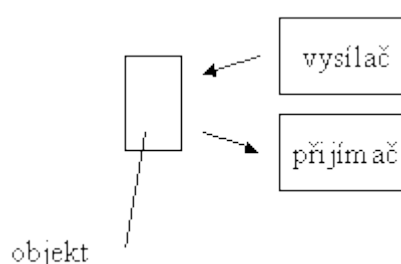
Obrázek 15 - Vyzářovací charakteristika ultrazvukového převodníku [1]

Mezi nejdůležitější vlastnosti převodníků patří vyzářovací charakteristika směrovost. Úhel primárního vyzářeného laloku je nepřímo úměrný průměru membrány převodníku a frekvenci, je definovaný poklesem o -3 dB. Znamená to, že čím vyšší bude frekvence signálu a průměr membrány, tím bude paprsek užší. Přijímací charakteristika má shodný tvar s vyzářovací charakteristikou, ta je znázorněna na obrázku 15. Standardní šířka hlavního laloku je cca 15°. Pokud je paprsek užší, jeho odraz má vyšší kolísavost při zvlněné hladině, naopak u širších paprsků je celková energie rozptýlena do většího objemu a odražený paprsek bude zákonitě slabší. [1,7]

Jednoduchá konstrukce jednohlavňových ultrazvukových snímačů (obr. 16) podporuje, aby byl vysílač využit zároveň jako přijímač. To ovšem definuje konečně krátkou dobu doznívání, do uplynutí tohoto času není vysílač po generování ultrazvukových vln schopen je přijímat. Znamená to, že malé vzdálenosti (0,2 - 0,8 m) jsou pro takto konstrukčně řešené snímače tzv. mrtvou zónou a tyto vzdálenosti nedokáže určit. Nápravným opatřením může být změna pozice snímače směrem od hladiny do bezpečné vzdálenosti. V případech, kde není tento postup možný, lze použít snímač s odděleným přijímačem a vysílačem (dvouhlavové systémy – obr. 17) a tím odstranit mrtvé zóny. [1,5,6]



Obrázek 16 - Jednohlavový ultrazvukový snímač [6]



Obrázek 17 - Dvouhlavový ultrazvukový snímač [6]

3.5.3 Rychlost šíření zvuku

Jak už bylo zmíněno výše, největší slabinou ultrazvukové sensoriky je proměnlivá rychlost šíření zvuku v atmosféře. Nejvlivnější vliv má teplota vzduchu, tu je nezbytné kompenzovat pro dosažení přijatelné přesnosti. Atmosférický tlak nebo vlhkost vzduchu jsou vlivy, které jsou často ignorovány. [1]

Pro rychlost zvuku c ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) ve vzduchu při teplotě t ($^{\circ}\text{C}$) platí (1):

$$c = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T} \quad (1)$$

kde adiabatická konstanta κ je pro vzduch rovna 1,402, plynová konstanta R je pro vzduch rovna $287,05 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a termodynamická teplota T je $t + 273,15 \text{ K}$.

Vliv teploty na šíření vzduchu je asi $0,6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, proto se běžně teplota kompenzuje. Měření teploty vzduchu se provádí například zabudovaným termistorem. Pak nastává problém, pokud existuje teplotní gradient uvnitř nádoby,

nebo pokud je odlišná teplota uvnitř pouzdra snímače a vzduchu uvnitř nádrže, kterým se paprsek šíří. To může nastat například při svitu slunce na snímač. Řešení těchto problémů je možné připojením externího teploměru, který umožní přesnější kompenzaci. [1]

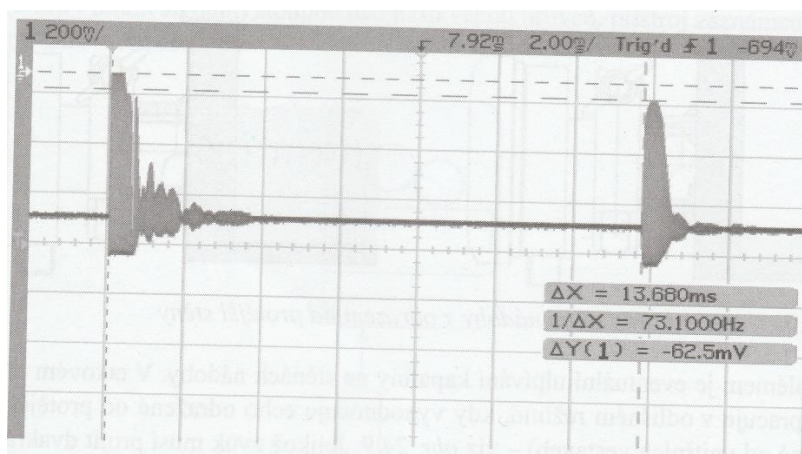
Pro nejpřesnější měření se pro kompenzaci změn rychlosti všemi různými vlivy používá referenční odražeč ve známé vzdálenosti od snímače. Od něj se odráží paprsky zpět a snímač kalibruje a kompenzuje okolní vlivy. Pomocí těchto odražečů lze přesně určit rychlost šíření v proměnlivém prostředí. [1,3]

3.5.4 Spojité měření hladiny

Spojité ultrazvukové hladinoměry vysílají krátké klíčované ultrazvukové impulsy o délce cca 1ms a o frekvenci několik desítek kHz. Generátor vyšle tento paprsek směrem k detekované hladině, po uplynutí času t je snímačem zachyceno odražené echo. Vzdálenost je pak určena z doby návratu echa dle vzorce: (2)

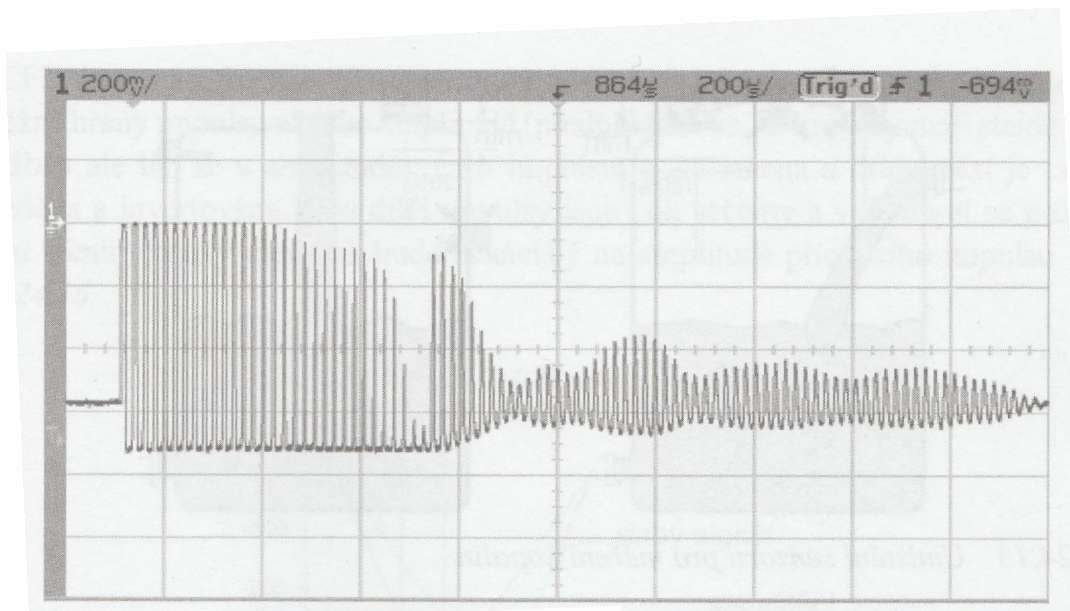
$$L = c \cdot \frac{t}{2} \quad (2)$$

kde c je rychlost zvuku ve vzduchu a t je čas od vyslání paprsku do jeho přijmutí. Jelikož paprsek urazí vzdálenost mezi snímačem a hladinou $2x$, ve výpočtu je jeho polovina. [1,4]

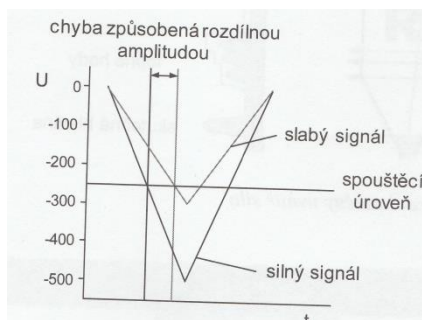


Obrázek 18 - Záznam signálu ultrazvukového převodníku z osciloskopu [1]

Standardní průběh vysílaného signálu a zachycení jeho odrazu je zobrazen pomocí osciloskopu na obr. 18, znázorněno je i dozívání kmitání vysílače (obr. 19). [1]



Obrázek 19 - Detail dozívání kmitů vysílače [1]

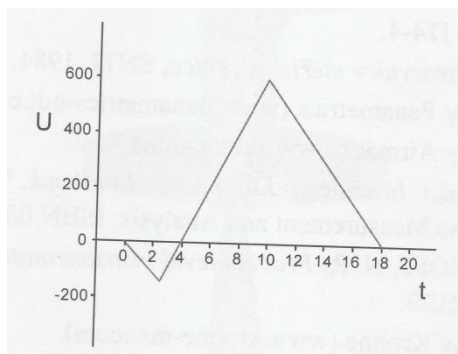


Obrázek 20 - Chyba vznikající rozdílnou amplitudou impulsů [1]

3.5.5 Zpracování signálu

Snímač po provedení svých základních úkonů zjistí dobu od vyslání impulsu do doby zachycení jeho odrazu. Odražený signál je vlivem překonané vzdálenosti a jiných vlivů poměrně slabý a jeho amplituda se v závislosti na okolních vlivech může velmi měnit. [1,7]

Pokud definujeme okamžik příchodu odrazu úrovně (tj. určením minimálního napětí na výstupu z přijímače), vzniká pak chyba, která je závislá na amplitudě, při snižující se amplitudě bude minimální úroveň dosažena později než u silného signálu (obr. 20). Pro eliminaci této chyby se využívají techniky CFD. [1,7]



Obrázek 21 - Systém CFD [1]

CFD eliminuje závislosti velikosti amplitudy na pozorované náběžné hraně impulsu. Předpokládá se, že vysílaný i přijímaný impuls mají stejný sklon náběžné hrany, liší se pouze v amplitudě tohoto impulsu. Poměrná část impulsu je ztlumena a zbylá část je zpozděna proměnlivým časem a invertována (obr. 21). Obě části impulsu jsou pak sečteny a vyhodnocovanou informací je průchod nulou. Takto upravený impuls je pak nezávislý na amplitudě přichozího impulsu.

Součástí systému snímače jsou elementy pro zpracování a vyhodnocení signálu jako potlačení rušení (komplikovaný algoritmus), fuzzy metody pro interpretace signálu, průměrování výsledků a mnoho dalších. Systémy jsou také odolné proti vytváření ozvěn uvnitř nádob, takové impulsy by měly do snímače přijít s velmi malou amplitudou a neměly by tak mít vliv na výsledek. Avšak se složitostí snímače roste i možnost zavedení této chyby. Pro její potlačení se používá mapa prázdné nádoby (skenování prázdné nádoby snímačem) a následný záznam echa. [7]

3.5.6 Radarové hladinoměry

Fyzika přesně definuje šíření elektromagnetického vlnění vakuem na $299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pro praktické a zkušební účely je vhodné použít přibližnou hodnotu $3\cdot 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Elektromagnetické vlnění se ve vakuu šíří obdobně jako světlo, proto platí (3)

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} \quad (3)$$

ale v odlišných prostředích, např. ve vzduchu platí (4)

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \epsilon}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \quad (4)$$

V obou vzorcích (3,4) platí:

c_r – rychlost světla ve vakuu

ϵ_0 – permitivita vakua

μ_0 – permeabilita vakua

ϵ_r – relativní permitivita

μ_r – relativní permeabilita materiálu, v kterém se světlo šíří

V naprosté většině aplikací, kdy se vlnění šíří plynem nebo kapalinou, lze předpokládat, že relativní permitivita prostředí (dielektrické konstanta) je jednotková, tzn. že nemá žádný vliv na šíření světla (elektromagnetického vlnění) v tomto prostředí. Výrazně odlišnou, resp. extrémně vysokou permitivitu má voda, za běžných podmínek přibližně 80. Příkladem plynu s téměř jednotkovou permitivitou je vzduch s 1,0005. [1]

Všechny zmíněné permitivity byly uvažovány za běžných podmínek. Ale jak se mění rychlost vzduchu se změnou teploty a tlaku? Změna teploty nemá na relativní permitivitu značný vliv, při teplotě plynu 2000°C je změna permitivity asi 0,25%. Řádově závažnější chybu pak způsobuje změna tlaku, relativní permitivita

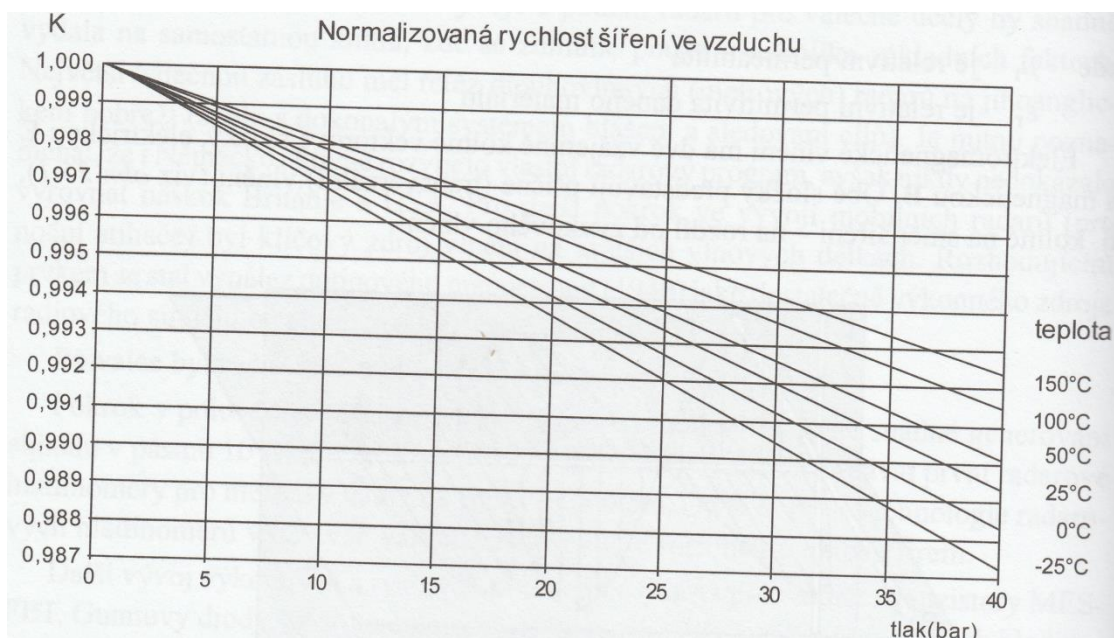
prostředí roste lineárně s tlakem plynu a při změně tlaku o 10MPa dosahuje rozdíl cca 3%, ovšem pro přesnější odhad se využívá vzorec (5)

$$\varepsilon_r = 1 + (\varepsilon_{rN} - 1) \cdot \frac{T_N}{T} \cdot \frac{P}{P_N} \quad (5)$$

kde platí:

- ε_r – relativní permitivita (výsledná vlastnost určující rychlost)
- ε_{rN} – inicializační permitivita za normálních podmínek
- T – absolutní teplota
- P – tlak plynu
- T_N a P_N – normální teplota a tlak (273 K, 1 Bar)

Znáznorněný graf na obrázku 22 ilustruje závislost teploty vzduchu v rozsahu -25°C až 150°C a tlaku vzduchu 0 – 40 Bar na rychlost šíření světla. [1,5]



Obrázek 22 - Graf závislosti teploty a tlaku vzduchu na rychlost šíření [1]

3.5.7 Odraz elektromagnetických vln

Ač je výše zmíněno, že se elektromagnetické vlny šíří velmi podobně jako světlo, jejich odraz je naprosto odlišný od odrazu světla. Radar se ve většině svých aplikací používá k detekci kovových objektů (letadel, ponorek, lodí atd.). Velmi podobně, když dopadnou elektromagnetické mikrovlny na hladinu vodivé kapaliny, dochází ke zkratu a vlnění je velice účinně odraženo. Vlivem tohoto účinného odrazu vzniká silný detekovaný signál. Nevodivé kapaliny jako uhlovodíky (etanol, benzin, nafta a ostatní ropné látky) nebo destilovaná voda, lze měřit radarem, ovšem záleží na hodnotě relativní permitivity měřeného média. [1]

3.5.8 FM-CW radar

Pro detekci a měření hladiny jsou používány pouze dva typy radarů, jedním z nich je pulzní radar a tím druhým FM-CW. Pro oba typy radarů platí, že v jedné sekundě radar zpracovává velké množství signálů (vysílaných, přijímaných, rušivých). Výsledná výška hladiny je pak dílem vysoce složitého algoritmu, který zahrnuje zpracování signálu, průměrování, filtrování, použití fuzzy logiky a mnoho dalších úkonů vedoucích k co nejpřesnějšímu výsledku. Obě aplikace radarů jsou si schopny poradit s kolísáním hladiny u míchaných, nebo jinak se pohybujících kapalin. [1]

V případě FM-CW radaru je na straně vysílače generována frekvenčně modulovaná vlna (frequency modulated – continuous wave = FM-CW). Obvykle je použit pilový tvar signálu a jeho frekvence je lineárně měněna v rozsahu 9 GHz – 10 GHz. [1,5]

Mikrovlna se odrazí od hladiny a je zachycena anténou radaru. Pokud bude hladina velmi blízko anténě, pak se vlny do antény vrátí s minimálním zpožděním oproti jejich vysílání. Frekvence přijatých vln bude téměř stejná jako frekvence právě vysílaných vln. [1,5]

Pokud bude hladina ve větší vzdálenosti, odražené vlny se do antény vrátí s časovým zpožděním, které je dáno vzdáleností hladiny od antény a také rychlostí šíření, které budeme považovat za známé. Jelikož vysílač neustále mění frekvenci vysílaných vln, bude frekvence odrazů odlišná od právě vysílaných vln.

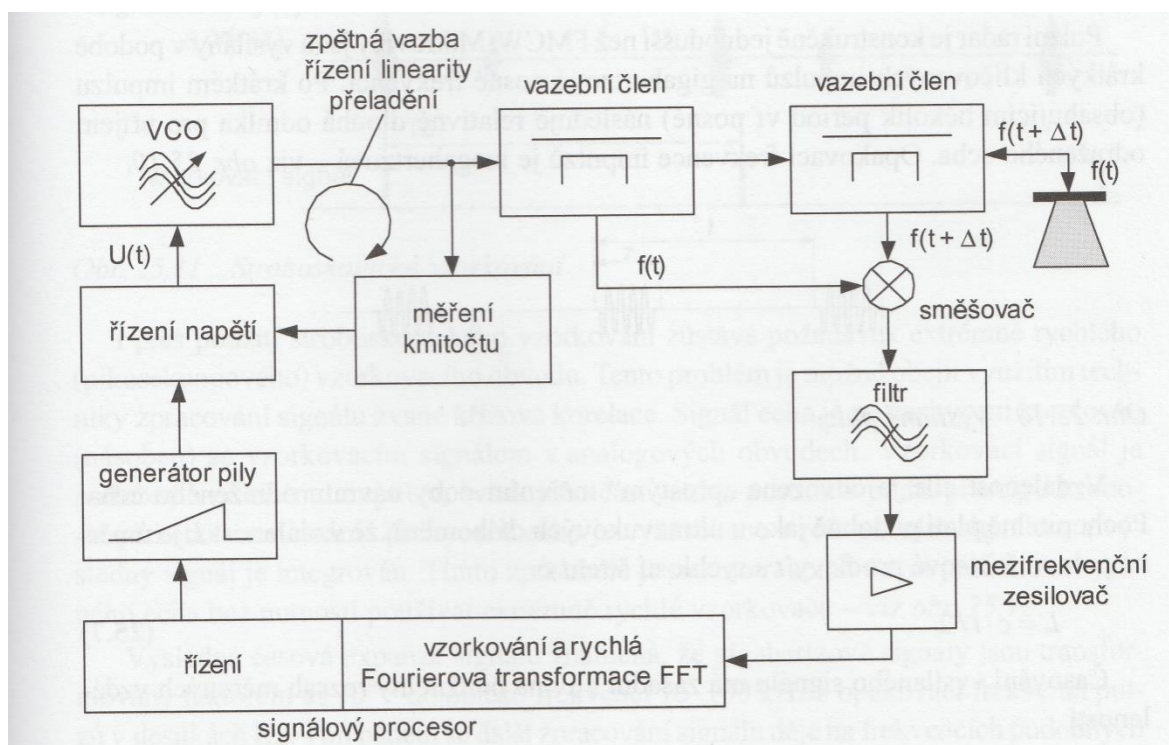
V obvodech pro zpracování signálu proto bude vznikat diferenční frekvence, jejíž velikost se bude lineárně zvyšovat se zpožděním odrazů oproti aktuální frekvenci. Diferenční frekvence bude konstantní (úměrná vzdálenosti hladiny), ovšem s výjimkou přechodových cyklů $10 \text{ GHz} \gg 9 \text{ GHz}$. Diferenční frekvenci lze odvodit (6):

$$\Delta f = \frac{F}{T} \cdot \Delta t = \frac{F}{T} \cdot \frac{2 \cdot L}{c} \quad (6)$$

kde F/T – rychlost přeladění o jeden frekvenční zdvih F od 9 GHz do 10 GHz za periodu T

Δt – doba šíření odraženého vlnění od radaru k hladině a zpět

L – vzdálenost hladiny od radaru



Obrázek 23 - Blokové schéma FM-CM radarového hladinoměru [1]

Generátor pilového signálu je řízen napětím řízeným oscilátorem (VCO). Naprosto klíčovým prvkem pro přesnou funkci radaru je linearita přeladování vysílané frekvence, proto můžeme na blokovém schématu na obr. 23 vidět, že okamžitá výstupní frekvence je ve zpětnovazební smyčce měřena a regulována. Výsledný

vysokofrekvenční signál je pak veden do vysílací antény a zároveň do obvodů pro zpracování signálu, kde je použit jako referenční. [1,6]

Odražená vlna je zachycena anténou (používá se jediná vysílací a zároveň přijímací anténa) a poté přiveden do směšovače, ten pak tvoří signály na kombinačních kmitočtech. Na jeho výstupu jsou signály na součtové a diferenční frekvenci. Signály na součtové frekvenci jsou potlačeny pomocí dolní propusti. Pro zpracování je potřebný jen signál na diferenční frekvenci (ta je úměrná vzdálenosti hladiny). Výsledná frekvence je relativně nízká (pro kratší vzdálenosti), signál je proto zesílen mezifrekvenčním zesilovačem a následně digitalizován. Následující zpracování probíhá v signálovém procesoru DSP. [1,6]

Tato aplikace radaru (FM-CW) je nejpřesnější pro měření hladiny. Je velmi složitá a náročná na spotřebu, především kvůli nutnosti digitalizace a následného zpracování digitálního signálu pomocí FFT. Takřka nepoužitelná je při použití antény ve vertikální ose nádoby se zakřiveným víkem, dochází k vícenásobným odrazům a extrémnímu zkreslení výsledných hodnot. [1,6]

4 Analýza typů studní

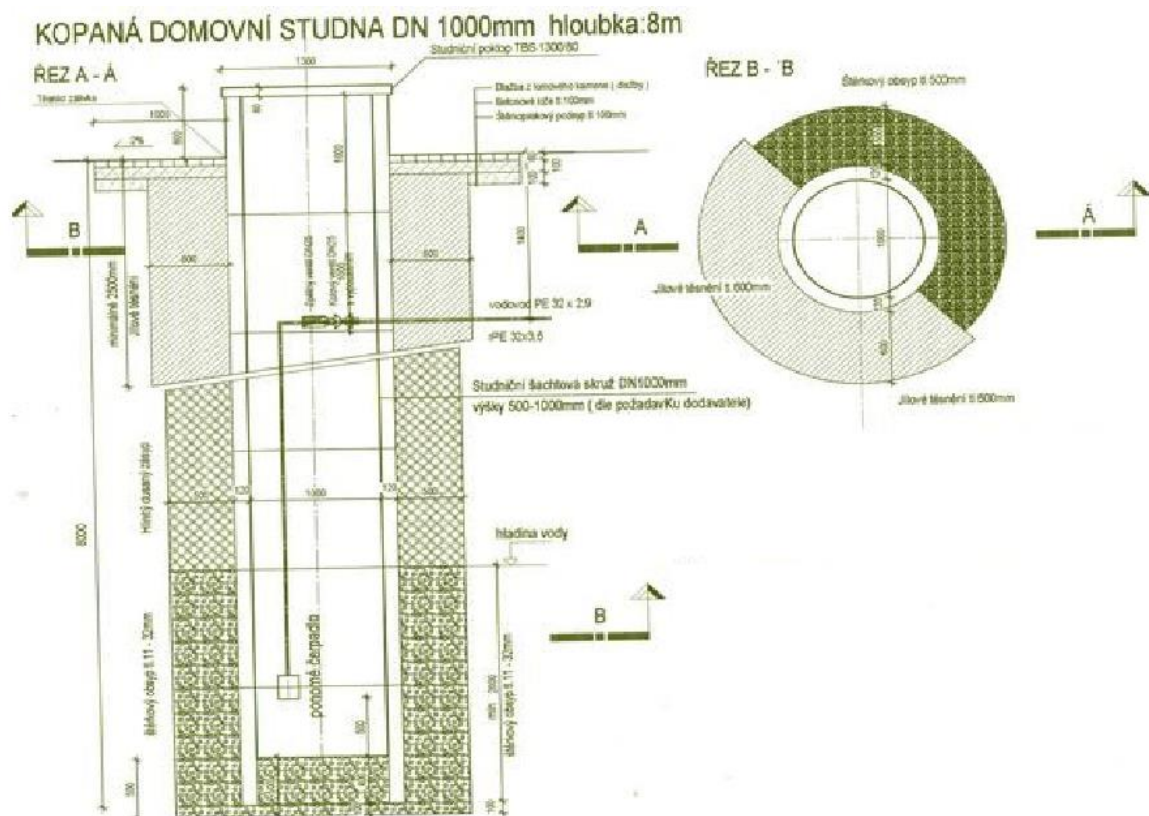
Studnou se rozumí speciální podzemní stavba (ve smyslu Vodního a Stavebního zákona), která slouží jako zdroj podzemní vody. Tato zařízení se dále rozdělují podle technologie jejich hloubení, a to na vrtané nebo kopané, ale rozdělujeme je také podle hladiny podzemní vody, která je jejich zdrojem a to na studny s volnou hladinou nebo napjatou hladinou. [11]

4.1 Vrtané studny

Obecně se vrty používají v případech, kdy je zdroj podzemní vody v hloubce přes 8 metrů. Vrt se hloubí do hloubky cca 3 metry pod hladinu podzemní vody, aby bezpečně pokryl eventuální pokles hladiny. V příloze 1 je řez vrtané studně. [11]

4.2 Kopané studny

Studny kopané, ať už ručně nebo pomocí strojního zařízení, mají po celé délce stejný průměr (obr 28). Jsou vhodné především pro mělkou podzemní vodu, ta je ovšem velmi náchylná ke znečištění, dochází ke kolísání hladiny vody během roku, kolísání hladiny mělké podzemní vody ovlivňují deště, sucha, teplota vzduchu, roční období a další faktory, jako například počet studen v okolí. U tohoto typu studní je velmi pravděpodobné, že její vydatnost bude ovlivněna odběrem vody jinými zařízeními a stavbami na stejném pramenu.[11]



Obrázek 24- Řez kopianou studnou [11]

4.3 Studny s volnou hladinou

Lze předpokládat, že charakteristiky různých zdrojů podzemních vod a zvodní budou mít velmi různé hodnoty. Tlak podzemní vody se pak projeví na funkci studny a především na chování její hladiny. Pokud je tlak pramenu roven atmosférickému tlaku (1083,8 hPa na hladinu moře za standardních podmínek), pak můžeme hovořit o tzv. volné hladině, kdy je její výška omezoována shora, hladina vody ve studni tedy nemůže být vyšší než je hladina podzemní vody. [11]

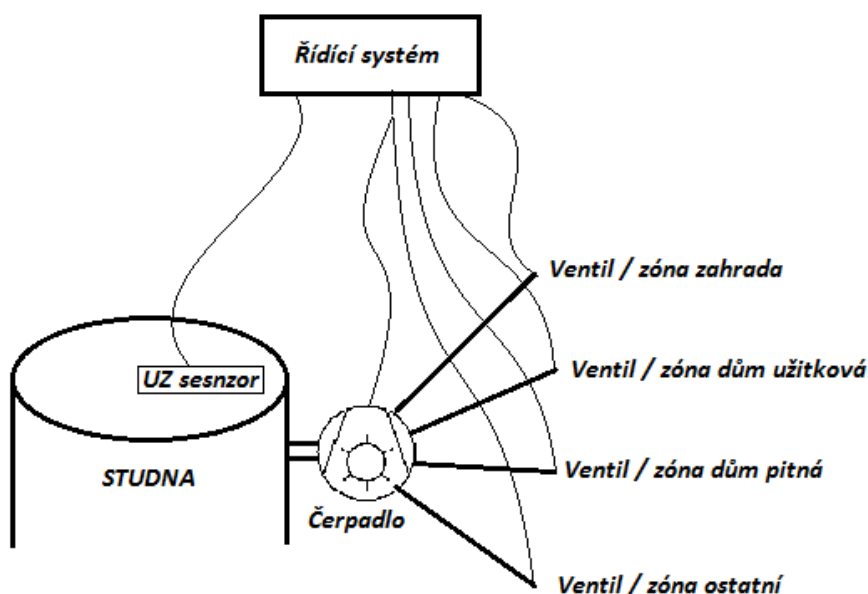
4.4 Studny s napjatou hladinou

V případě, že je tlak podzemní vody vyšší než atmosférický, pak dochází k vytlačení sloupce vody nad hladinu podzemní vody a hovoříme o tzv. napjaté hladině. Tato hladina je horně omezoována. [11]

5 Realizace projektu

Dle zadání je hlavním účelem této práce vytvořit systém, který bude detekovat kritické hladiny vody v kopané studni, bude ovládat periferie studny jako čerpadlo, ventily, filtry a podobné zařízení, které je třeba pro funkci studny řídit a podávat průběžné informace o aktuálním stavu vody ve studni.

Vybraným objektem pro realizaci je studna u rodinného domu, voda ze studně je používána jako užitková a to na zahradě (závlaha), v domě (pračka, toaleta), v garáži, a jeden volný přívod do kohoutku. Dále se pomocí filtrování a dalšího ošetřování vody využívá i jako pitná voda v domě. Ač je dům připojen i k vodovodnímu řadu je naprosto žádoucí, aby nedošlo k situaci, že vlivem využívání vodního zdroje jako zdroje užitkové vody bude nedostatek vody pitné pro zásobování domu. To je jeden ze základních předpokladů systému. Kontinuální kontrola hladiny v časových intervalech a podmíněčné otevírání ventilů užitkové vody je jeho majoritní funkcí. Na obrázku 29 je velmi obecně znázorněna struktura systému. Řídicí systém získává data o množství vody z ultrazvukového senzoru (UZ senzor) a tato data vyhodnocuje. Program řídí ovládání ventilů dle potřeby uživatele, to je ovšem podmíněno množstvím vody ve studni, aby nedošlo k nedostatku pitné vody.



Obrázek 25 - Schéma řízení čerpadla a ventilů [autor práce]

5.1 Návrh projektu

Pro splnění funkcí, které jsou zadány, je třeba vybrat vhodný řídicí systém, který bude disponovat především velkým množstvím digitálních výstupů. Pomocí digitálních výstupů budou ovládány periferie, alespoň 20 digitálních vstupů, větší počet digitálních výstupů bude jen kladným parametrem, protože systém bude vhodný pro další rozšiřování, bez nutnosti výměny některého z jeho elementů.

Požadavky, které jsou kladeny na senzor, jsou z těch nejvyšších, přestože se nejedná o ryze průmyslové prostředí. Celý senzor, včetně části přívodního vedení bude celoročně ve vlhkém prostředí kopané studny. Teploty uvnitř podobných podzemních prostor se mezi ročními období liší maximálně v řádech stupňů a pohybují se okolo 12°C, což je velmi přijatelná hodnota. Nepředpokládá se extrém, kdy by hladina vody ve studni vystoupala až do výšky čidla. Havárie, která by se tím způsobila, by pravděpodobně měla katastrofální účinky jak pro čidlo, tak i pro řídicí systém.

Na základě výšky hladiny, kterou systém získá prostřednictvím ultrazvukového senzoru, provede přepočítání na objem vody ve studni. Klíčovým parametrem, se kterým bude systém pracovat, je právě objem vody. Některé zóny nebudou moci být otevřeny, pokud bude vody ve studni kriticky málo, aby nedošlo k riziku, že ve studni nebude voda ani na okruh pitné vody, detailněji je popsáno výše.

Jádro centralizovaného systému by mělo být uloženo v ochranné krabičce, nejlépe v kovovém provedení. Vhodně konstruovaná krabička je pak uložena v prostoru nebo místnosti v krytém objektu, aby se eliminovala možnost, že dojde ke kontaktu počítače s vodou. Vedení kabeláže ke snímači a ovládání pak budou pravděpodobně mít omezenou maximální délku. Omezení délky bude předmětem zkoumání po vytvoření systému.

Spínání zón (čerpadla, ventilů...) bude prováděno pomocí spínacího prvku relé. To je velmi vhodné pro ovládání prvků digitálním výstupem. Celé zařízení by mělo pracovat s napětím menším než 20 V (malé napětí), není proto žádoucí aby hrozila možnost galvanického spojení řídicí části s napájecí částí aktivních prvků na okruzích s napětím 230 V (nízké napětí). Je třeba se této možnosti vyvarovat.

5.2 Výběr řídicího systému

Srdcem celé struktury je mikroprocesor (počítač), který vyhodnocuje a zpracovává informace získané ze vstupů (UZ senzor), z programu, od uživatele a ovládá tím výstupy (ventily, čerpadlo). Jedním z velmi důležitých požadavků je potřeba využívání reálného času pro řízení. Na trhu je mnoho počítačů, které by mohly být pro tento projekt vhodné, pro výběr toho nejvhodnějšího byla použita statistická metoda vícekriteriálního rozhodování.

5.2.1 PIC32 PINGUINO

Tento počítač (na obr. 30) je následovník 16 bitových mikrokontrolérů PIC, není hojně využíván. Pro jeho programování je třeba využívat dodatečné kity od výrobce. Mezi jeho výhody patří integrovaný modul reálného času a velmi široké spektrum napájecího napětí (eliminuje se chyba lidského faktoru při změně adaptéru apod.). Největší nevýhodou je pak celkem malý počet ovladatelných vstupů/výstupů při potřebě získávat data z UZ senzoru a ovládat minimálně 5 výstupních zón se dostáváme na hranu využitelnosti tohoto počítače.



Obrázek 26 - PINGUINO celý kit

[https://www.olimex.com/Products/Duino/PIC32/PIC32-PINGUINO-OTG/resources/PIC32-PINGUINO_AND_OTG.pdf]

Tabulka 1 - Vlastnosti kituPinguino

Vlastnost	Hodnota	Hodnocení kritérií
Frekvence	80 MHz	3
Paměť RAM	256 kb	3

Vlastnost	Hodnota	Hodnocení kritérií
Paměť FLASH	32 kb	1
Teplotní rozsah	-25 až 85°C	8
Reálný čas	ANO	10
Napájecí napětí	9 až 30 V	9
I/O	12	2
Cena	10 €	10

5.2.2 BeagleBone

Jeden z nejvíce vyvíjených mini počítačů je právě BeagleBone (na obr. 31), jeho využití je především v přehrávání videí, jeho systém založený na Linuxu podporuje dokonce i přehrávání 3D videa.



Obrázek 27 - BeagleBone - celý kit
[\[http://beagleboard.org/static/beaglebone/latest/Docs/Hardware/BONE_SRM.pdf\]](http://beagleboard.org/static/beaglebone/latest/Docs/Hardware/BONE_SRM.pdf)

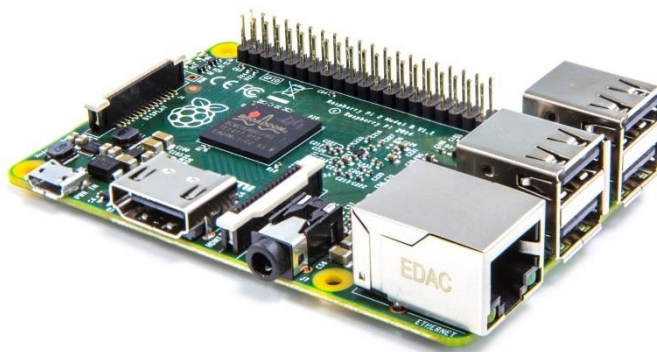
Tabulka 2 - vlastnosti kitu BeagleBone

Vlastnost	Hodnota	Hodnocení kritérií
Frekvence	720 MHz	10
Paměť RAM	256 MB	6
Paměť FLASH	nemá	0
Teplotní rozsah	0 až 40°C	2

Vlastnost	Hodnota	Hodnocení kritérií
Reálný čas	NE	0
Napájecí napětí	6 až 12 V	2
I/O	24	3
Cena	89\$	1

5.2.3 RaspberryPi2 Model B

Tento počítač má podobně jako BeagleBone svůj vlastní grafický procesor, což není pro řízení periférií studny klíčový prvek, spíše naopak nebude valně využíván. RaspberryPi (na obr. 32) je mnohem více využíván než např. PINGUINO a jsou na něj vytvářeny různé doplňkové moduly pro různorodé aplikace.



Obrázek 28 - RaspberryPi - celý kit [<http://www.adafruit.com/pdfs/raspberrypi2modelb.pdf>]

Tabulka 3 - vlastnosti kitu Raspberry PI

Vlastnost	Hodnota	Hodnocení kritérií
Frekvence	700 MHz	9
Paměť RAM	1024 MB	10
Paměť FLASH	nemá	0
Teplotní rozsah	0 až 35°C	1
Reálný čas	NE	0
Napájecí napětí	6 až 12 V	2
I/O	24	3
Cena	1 449 Kč	2

5.2.4 Arduino MEGA

Arduino je počítač s mikroprocesorem ATMEL, programovatelný pomocí kitu v jazyku C++. Výhodou tohoto počítače je velké množství vstupů/výstupů, což je pro tuto aplikaci klíčový prvek. Rozměry jsou takřka srovnatelně stejné jako u předchozích kitů. Celkem 54 digitálních i/o, dále PWM výstupy, analogové i/o, sériové výstupy. Arduino je zkrátka určeno pro ovládání velkých prvků periferních zařízení. Navíc je to jeden z nejvíce používaných vývojových kitů. Obdobně jako u RapsberryPi je proto velmi podporován a jsou na něj vytvářeny různé moduly (tzv. shieldy) například pro připojení do sítě (Ethernetshield), pro připojení dotykových LCD (TFT shield), několik dalších shieldů pro řízení motorů a různé aplikace. Reálný čas Arduino nemá, ovšem dá se použít právě jeden z aditivních modulů.



Obrázek 29 - Arduino MEGA - celý kit [<http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>]

Tabulka 4 - vlastnosti kitu Arduino MEGA

Vlastnost	Hodnota	Hodnocení kritérií
Frekvence	16 MHz	3
Paměť RAM	8 kB	2
Paměť FLASH	256 kb	3
Teplotní rozsah	-20 až 45°C	6
Reálný čas	přídavný	7
Napájecí napětí	7 až 15 V	5
I/O	102	10
Cena	569 Kč	8

5.2.5 Výběr počítače podle kritérií

Určení vah jednotlivým kritériím bylo provedeno dle metody Metfesselovy alokace. Nejprve byly určeny body k jednotlivým kritériím dle jejich důležitosti a následně proveden výpočet vah. Požaduje se, aby suma kritérií byla rovna 1.

Tabulka 5 - určení vah VKR

	Frekvence	Paměť RAM	Paměť FLASH	Teplotní rozsah	Reálný čas	Napájecí napětí	I/O	Cena
Body	10	15	20	25	30	15	50	25
Váhy	0,05	0,08	0,11	0,13	0,16	0,08	0,26	0,13

5.2.5.1 Agregáční funkce

Pro výpočet agregáční funkce (7) bude použita metoda váženého součtu kritérií.

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^p v_k f_k(\mathbf{x}) \quad (7)$$

Agregáční funkce PIC32 PINGUINO (8)

$$F_1 = 0,05 \cdot 3 + 0,08 \cdot 3 + 0,11 \cdot 1 + 0,13 \cdot 8 + 0,16 \cdot 10 + 0,08 \cdot 9 + 0,26 \cdot 2 + 0,13 \cdot 10 = 5,68(8)$$

Agregáční funkce BeagleBone (9)

$$F_2 = 0,05 \cdot 10 + 0,08 \cdot 6 + 0,11 \cdot 0 + 0,13 \cdot 2 + 0,16 \cdot 0 + 0,08 \cdot 2 + 0,26 \cdot 3 + 0,13 \cdot 1 = 2,31(9)$$

Agregáční funkce RaspberryPi(10)

$$F_3 = 0,05 \cdot 9 + 0,08 \cdot 10 + 0,11 \cdot 0 + 0,13 \cdot 1 + 0,16 \cdot 0 + 0,08 \cdot 2 + 0,26 \cdot 3 + 0,13 \cdot 2 = 2,58(10)$$

Agregační funkce Arduino MEGA(11)

$$F_1 = 0,05 \cdot 3 + 0,08 \cdot 2 + 0,11 \cdot 3 + 0,13 \cdot 6 + 0,16 \cdot 7 + 0,08 \cdot 5 + 0,26 \cdot 10 + 0,13 \cdot 8 = 6,58(11)$$

Dle vědecké statistické metody vícekriteriálního rozhodování byl jako nejvhodnější zvolen počítač Arduino MEGA. Jeho největší předností je už zmíněný počet vstupů a výstupů, který je pro co nejširší ovládací spektrum periférií naprosto klíčový. Prakticky je mnohem méně výkonný než většina konkurentů, ale program pro řízení periférií studny rozhodně nebude výpočetně náročný a též průběžné sledování výšky hladiny nebude klást nároky na extrémní rychlost zpracování. Jsem přesvědčen, že Arduino MEGA bude vhodným zařízením. Pro interní i externí komunikaci používají počítače Arduino sběrnice SPI, I²C a UART.

5.3 Výběr senzoru

Na trhu se nabízí široká škála ultrazvukových senzorů, některé z nich jsou vhodné pro aplikace měření hladiny vody ve studni. Výběr takového senzoru je ovšem ovlivněn několika parametry (požadavky), tím nejdůležitějším bude asi dostatečné krytí a teplotní odolnost, protože použití senzoru ve studni znamená pod úrovní země, kde se předpokládá vyšší vlhkost vzduchu a ač stabilní, tak nízká teplota. Jednou z dalších neméně důležitých vlastností bude také rozsah měření. Výška hladiny se mění v čase řádově o metry, proto je třeba vybrat vhodný senzor i z tohoto pohledu. Pracovní prostor senzoru bude vertikální válec o průměru cca 2 metry a měřená vzdálenost v řádech metrů. Je třeba klást důraz také na vyzařovací úhel, protože ve výše zmíněném pracovním prostoru by mohlo docházet k odrazům od stěn a ke zkreslování výsledků. Inteligentní snímače, které například používají průměrování, může velký počet těchto odrazů velmi zneřesnit. V neposlední řadě musí být kladen důraz také na pořizovací cenu.

5.3.1 MicroDetectors SU-3/A0-0V



Obrázek 30 - Snímač SU-3/A0-0V v pouzdru

Ultrazvukový snímač MD SU-3 (na obrázku 24) je model, který je vybaven jak digitálním, napěťovým, tak i proudovým výstupem. Výrobce také uvádí, že má vysokou přesnost, rozlišení a především největší provozní vzdálenost ze všech modelů s digitálním výstupem. Vysílač a přijímač nemá v jednom pouzdru, ale je rozdělený na jedné sběrnici.

Tabulka 6 - vlastnosti snímače SU-3/A0-0V

Vlastnost	Hodnota	Hodnocení kritérií
Krytí (IP)	IP67	7
Provozní teplotní rozsah	-15°C až 70°C	5
Rozsah snímací vzdálenosti	400 mm – 1500 mm	1
Vyzařovací úhel	8°	7
Cena	~ 3.000 Kč	5

5.3.2 MicroDetectors TU3/C3-0E



Obrázek 31 - Snímač TU3/C3-0E v pouzdru

Plastové pouzdro tohoto snímače (na obrázku 25) je pro použití v podmínkách ve studni vhodnější než kov. Dále má tento snímač řídicí vstup pro funkci anti-rušení, ta pravděpodobně není pro tuto specifickou aplikaci příliš nutná. Jedná se o snímač, který má přijímač i vysílač vln v jednom pouzdru, takže je jednodušší na instalaci.

Tabulka 7 - vlastnosti snímače TU3/C3-0E

Vlastnost	Hodnota	Hodnocení kritérií
Krytí (IP)	IP67	7
Provozní teplotní rozsah	-15°C až 70°C	5
Rozsah vzdálenosti snímací	350 mm – 3500 mm	4
Vyzařovací úhel	8°	7
Cena	~ 2.300 Kč	8

5.3.3 MicroDetectors QU6/D1-0E



Obrázek 32 - Snímač QU6/D1-0E v pouzdru

Model QU6 je snímač s největším rozsahem vzdálenosti od výrobce MicroDetectors. Má také plastové pouzdro (na obrázku 26). Navíc je chráněn proti elektrickým poškozením, např. přepětí napájecího okruhu nebo průrazu datových vodičů. Jeho nevýhodou je jednoznačně to, že nemá digitální výstup, ale analogové výstupy v obou variantách, tedy napěťový i proudový.

Tabulka 8 - vlastnosti snímače QU6/D1-0E

Vlastnost	Hodnota	Hodnocení kritérií
Krytí (IP)	IP65	5
Provozní teplotní rozsah	-20°C až 70°C	6
Rozsah snímací vzdálenosti	600 mm – 6000 mm	8
Vlastnost	Hodnota	Hodnocení kritérií
Vyzařovací úhel	8°	7
Cena	~ 3.600 Kč	2

5.3.4 DI-SORIC USC 30 M 6000 I0/10PSK-BSL



Obrázek 33 - Snímač USC 30 M 6000 I0/10PSK-BSL v pouzdru, dodatečné informace

Jelikož teplota vzduchu, ve kterém se zvuk šíří nejvíce ovlivňuje jeho rychlost, tak je třeba tuto chybu eliminovat. Tento snímač (na obr 27) má již integrovanou teplotní kompenzaci. Ve studni se ovšem teplota příliš nemění a to jak intra denně, tak mezi ročními období, jelikož se jedná o prostor pod zemským povrchem, tak je

v letních i zimních měsících teplota odlišná maximálně o jednotky stupňů. Režim NO (normally open) šetří energii.

Tabulka 9 - vlastnosti snímače USC 30 M 6000 IO/10PSK-BSL

Vlastnost	Hodnota	Hodnocení kritérií
Krytí (IP)	IP65	5
Vlastnost	Hodnota	Hodnocení kritérií
Provozní teplotní rozsah	-25°C až 70°C	8
Rozsah snímací vzdálenosti	600 mm – 6000 mm	8
Vyzařovací úhel	10°	5
Cena	~ 3.000 Kč	5

5.3.5 Výběr senzoru podle kritérií

Určení vah probíhá obdobně jako v kapitole 5.2.5.

Tabulka 10 - Rozdělení vah VKR

	Krytí (IP)	Provozní teplotní rozsah	Rozsah snímací vzdálenosti	Vyzařovací úhel	Cena
Body	70	30	90	80	50
Váhy	0,22	0,09	0,28	0,25	0,16

Výpočet agregační funkce podle vzorce (7) v kapitole 5.2.5.1.

Agregační funkce snímače MicroDetectors SU-3/A0-0V(12)

$$F_1 = 0,22 \cdot 7 + 0,09 \cdot 5 + 0,28 \cdot 1 + 0,25 \cdot 7 + 0,16 \cdot 5 = 4,82(12)$$

Agregační funkce snímače MicroDetectors TU3/C3-0E(13)

$$F_2 = 0,22 \cdot 7 + 0,09 \cdot 5 + 0,28 \cdot 4 + 0,25 \cdot 7 + 0,16 \cdot 8 = 6,14(13)$$

Agregační funkce snímače MicroDetectorsQU6/D1-0E(14)

$$F_3 = 0,22 \cdot 5 + 0,09 \cdot 6 + 0,28 \cdot 8 + 0,25 \cdot 7 + 0,16 \cdot 2 = 5,95(14)$$

Agregační funkce snímače DI-SORIC USC 30 M 6000 I0/10PSK-BSL(15)

$$F_4 = 0,22 \cdot 5 + 0,09 \cdot 8 + 0,28 \cdot 8 + 0,25 \cdot 5 + 0,16 \cdot 5 = 6,11(15)$$

Dle tohoto vícekriteriálního hodnocení všech snímačů, které byly vybrány jako nejvhodnější pro specifické využití ve studni je nejvhodnějším snímačem MicroDetectors TU3/C3-0E. Jeho největší předností je nízká cena, ovšem při menším rozsahu měřených vzdáleností. Tento snímač není příliš přesný, ale pro sledování hladiny ve studni není přesnost klíčovou vlastností. Obecně se předpokládá, že tyto průmyslové senzory budou mít přijatelnou přesnost v řádech milimetrů.

5.4 Dotykový LCD TFT displej

Výstupem ze systému nebude jen kabeláž pro ovládání periferních prvků. V zadání bylo požadováno, aby též bylo možné sledovat průběžně výšku hladiny. Obsluha tedy musí mít možnost jednoduše zjistit kolik vody právě ve studni je.

Zobrazovacím zařízením je LCD displej (na obr. 34) o parametrech v tab. 11. [9]



Obrázek 34 - 3,2 LCD TFT displej

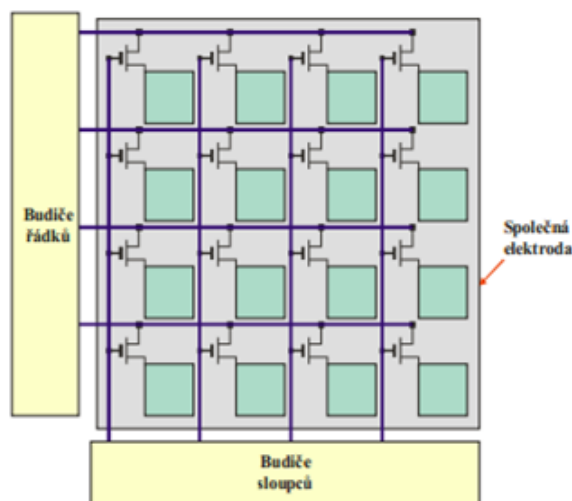
Tabulka 11 - Parametry LCD

<u>Parametr</u>	<u>Hodnota</u>
Velikost displeje	3,2 palce
Rozlišení displeje	320x240 pixelů
Počet barev	65 tisíc barev
Zobrazovací plocha	48,60 x 64,80 mm
Podsvícení	BÍLÁ LED
Pracovní napětí	3,3 V
Technologie	TFT LCD

5.4.1 TFT LCD technologie

Každý bod obrazovky je složen ze dvou částí, barevné a zdrojové, tu tvoří zdroj světla, v tomto případě jde o bílou LED diodu. Pro každou barevnou složku (červená, zelená, modrá) každého pixelu je jeden tranzistor. Pro jeden pixel jsou tedy 3 tranzistory, které ovládají tekuté krystaly. Tranzistor průběžně kontroluje napětí, které prochází vyrovnávacími vrstvami a změnou elektrického pole je pak

způsobena restrukturalizace tekutých krystalů a dochází k ovlivnění natočení částic. Tím dojde ke změně barvy krystalu. Tento způsob umožňuje regulaci krystalu pro několik desítek až stovek rozdílných stavů a tím vznikají jasové barevné odstíny, kombinací desítek stavů 3 různých složek. Jelikož je každý bod složen ze tří sub-pixelů, vznikají statisíce až miliony různých odstínů barev. Pro zobrazení barvy v jednom určitém bodu je třeba ho určit souřadnicovým systémem (výška x šířka) – matice displeje je zobrazena na obr. 34. Nejprve dochází k postupnému připojení jednotlivých řádků k napájecímu napětí. Následně dochází pomocí budiče sloupců k přivádění napětí do bodů, které mají být v příslušných řádcích zobrazeny. Tento proces je opakován neprodleně po dosažení posledního řádku. Budiče mohou být ovládány buď jednoduchým mikrokontrolérem nebo integrovanou řídicí jednotkou. [9]

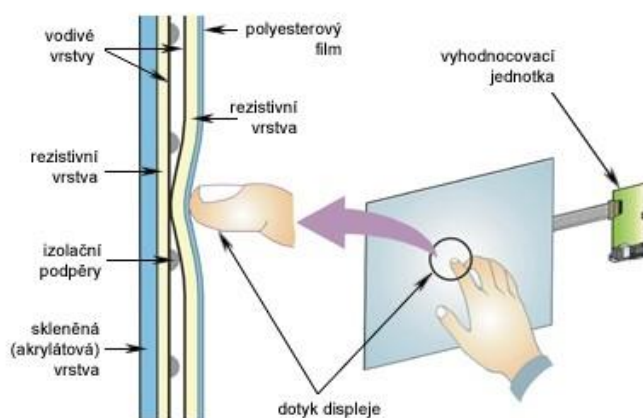


Obrázek 36 - Schéma matice dotykové vrstvy [9]

5.4.2 Dotyková vrstva

Rezistivní dotyková vrstva je nejjednodušší technologií pro dotykové obrazovky, její náskres a stručný popis je na obr 37. Jde o čtyřvodičové zapojení dvou elektricky vodivých, transparentních desek, mezi nimi jsou izolační podpěry o konstantní výšce. Nemůže se tedy docílit stavu, kdy budou desky bez působení síly na kteroukoliv z nich galvanicky spojeny. Pod vodivými vrstvami jsou vrstvy rezistivní. Vodivé desky jsou napájeny konstantním, známým napětím. Pomocí již zmíněných 4 vodičů jsou obě membrány připojeny k vyhodnocovací jednotce. Pokud dojde ke stlačení membrány a tak ke galvanickému spojení vodivé plochy

s rezistivní. Teoreticky se vytvoří dělič napětí, napětí snímané v X pozici je rovno X souřadnici polohy bodu na displeji. Po změření tohoto napětí je dále měřeno napětí v Y pozici, obdobně jako u X.[9]



Obrázek 37- Schéma rezistivní dotykové desky [9]

Použitý displej (na obr. 34) je díky doplňkovým funkcím velmi složitý na zapojení. Jde o 40 pinový konektor, pomocí jímž se připojuje LCD displej, dotyková vrstva a slot pro SD kartu. Ač je displej slotem vybaven, tak nebude v tomto projektu využíván, nemusí být tedy připojen. Schéma připojení Arduina k LCD modulu ITD802 pomocí nepájivého pole je na obrázku 38. Pro vytvoření toho schématu byl využit software Fritzing, který je určen pro simulaci a testování počítače Arduino.

5.4.3 Ostatní použité elementy

Jelikož je třeba řídit procesy v reálném čase a vybraný počítač Arduino MEGA má reálný čas pouze v aditivní utilitě, museli jsme pořídit modul reálného času.

Modul reálného času – DS3231

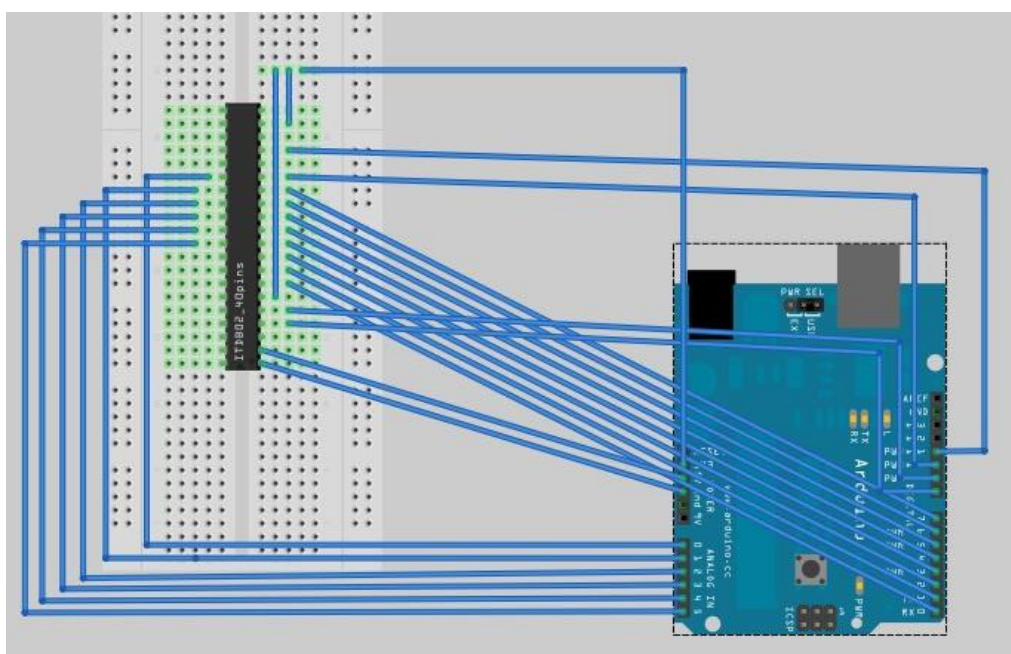
Jedná se o velice přesný modul, který ve své paměti uchovává hodnoty současného roku, měsíce, dne, hodiny, minuty a sekundy. Je vybaven vlastním záložním zdrojem energie – baterie LIR2032 (možno vidět na obr. 39), která napájí obvod v době vypnutí systému, nebo přerušení napájení. Modul má i funkci

přestupného roku, ovšem chybí funkce letního/zimního času, ten musí obsluha měnit svépomocí.

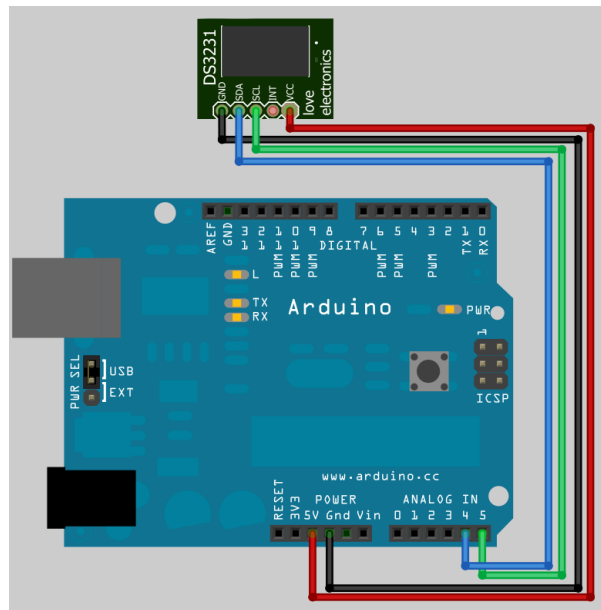


Obrázek 38 - Modul reálného času DS3231

Připojení modulu k Arduinu je velmi jednoduché, protože se jedná pouze o napájení 5V a dva datové vodiče. V našem případě jsme zvolili analogové vstupy A4 a A5. Jednoduché zapojení je znázorněno na obr. 40, opět byl použit software Frinzing.



Obrázek 39 - Schéma zapojení Arduina s LCD modulem [autor práce]



Obrázek 40 - Připojení DS3231 k Arduino [autor práce]

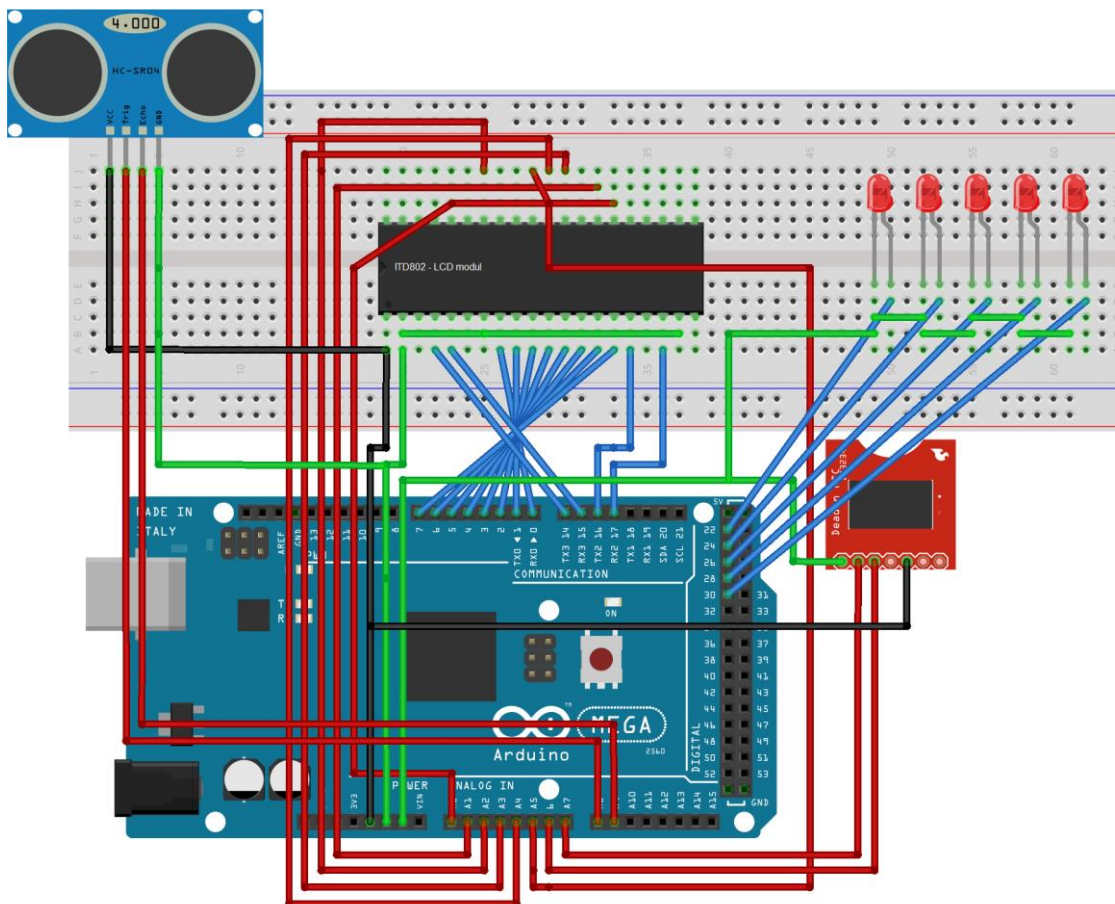
5.4.4 Spínací prvky

Ovládání periferních zařízení pomocí digitálních výstupů počítače, bude řešeno prostřednictvím spínacího prvku relé. Jelikož je naprosto žádoucí, aby nedošlo k havarijnímu stavu, kdy napájecí napětí (např. čerpadla) prorazí na vedení k počítači. Důsledek takové to nehody by měl katastrofální dopad na počítač. Proto je třeba využít relé s galvanickým oddělením spínacího a spínaného napětí. Například solid state relé, které pracují na polovodičovém principu. Jsou dražší než mechanické, dochází k úbytku napětí a z toho pramení potřeba je alespoň pasivně chladit, ale jejich neodmyslitelná výhoda je právě v galvanickém oddělení.

5.5 Kompletní zapojení

Součástí analýzy jednotlivých elementů byly i ukázky jednotlivých zapojení těchto součástek a modulů. Celé zapojení je poměrně složité (obr. 41), ale jelikož ITD802 modul je čip, který je na desce tištěných spojů společně s LCD. A ostatní elementy budou vyvedeny mimo krabičku, není třeba vytvářet desku plošných spojů pro vlastní zapojení. Modul reálného času bude připevněn ke stěně krabičky a připojen kabely. LED diody jsou jen pro znázornění ovládání zón, na jejich místě bude ovládané relé. Barvy propojovacích cest jsou rozděleny dle barev:

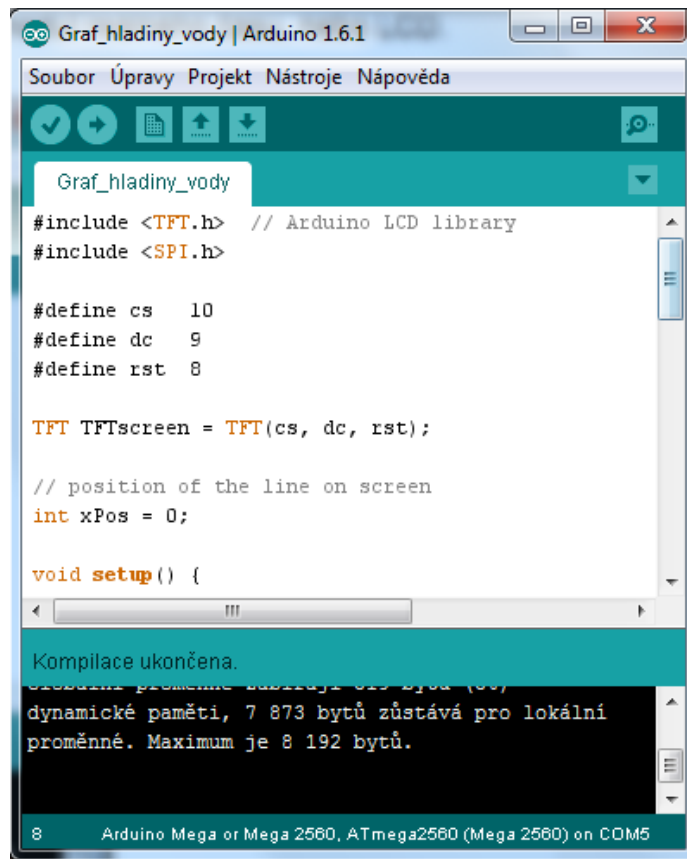
- Černé – napájení +5 V
- Zelené – zem GND
- Červené – analogové vstupy a výstupy
- Modré – digitální vstupy a výstupy



Obrázek 41 - Kompletní zapojení systému [autor práce]

5.6 Programování mikrokontroléru ATMEL

Pro programování všech počítačů Arduino se používá multiplatformní softwarové prostředí Arduino IDE (integrateddevelopmentenviroment). Jelikož se jednotlivé typy kitů liší především použitým mikroprocesorem, je třeba definovat použitou desku, v záložce Tools, položka Board. Neméně důležitou položkou v menu je záložka Sketch, její podmenu nabízí správu knihoven a to jak standardních, tak i možnost přidání nové knihovny např. pro modul reálného času nebo LCD.



Obrázek 42 - SW prostředí Arduino IDE [autor práce]

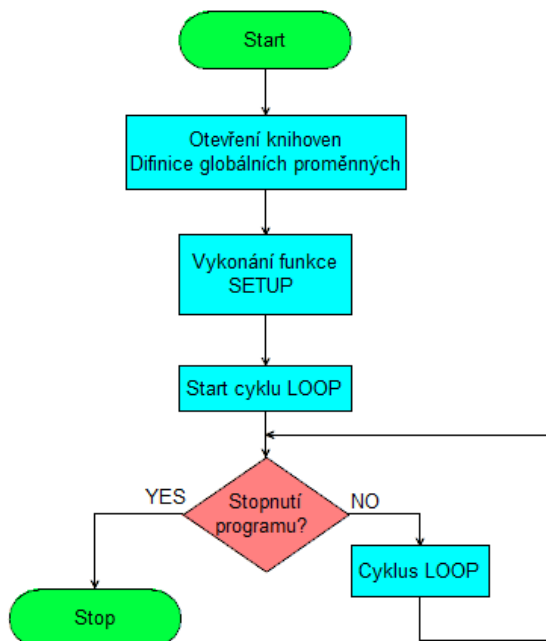
V druhém řádku je symbol „tick“, který slouží k verifikaci a kompilaci kódu, ale také k vymezení datové velikosti programu ze tří hledisek.

- Velikost projektu – určení procentuálního naplnění dostupné paměti pro program v mikroprocesoru. Celková kapacita je 253 952 bytů.
- Globální proměnné – celková maximální velikost všech použitých globálních proměnných všech datových typů. Globální proměnné jsou uloženy v dynamické paměti mikroprocesoru.
- Lokální proměnné - celková maximální velikost všech použitých lokálních proměnných všech datových typů. Uloženy jsou na Flash paměti.

Dalším symbolem je „→“, neboli „upload“. Pomocí této funkce je verifikovaný, zkompilovaný kód nahrán na příslušné paměťové prostory mikroprocesoru. Pokud je správně nadefinovaný port a typ použitého kitu je upload automatickou záležitostí. Po uploadnutí je Arduino automaticky resetován.

Symbol „lupa“, který je vpravo na tomto řádku, slouží k zapnutí funkce Serial monitor. Jde o hojně využívanou utilitu pro optimalizaci kódu přímo na mikroprocesoru, ke kterému se přistupuje pomocí sběrnice UART.

Arduino se převážně programuje pomocí jazyku C++, nebo méně častěji C. Další alternativou je jazyk Wiring, který vychází z C++ a je pro programování Arduina velmi vhodný. [8]



Obrázek 43 - Vývojový diagram - zpracování kódu [autor práce]

Základní struktura programu pro Arduino je rozdělena na dvě hlavní části. Jedna je Setup, to je část programu, která bude vykonána pouze jednou (po zapnutí, nebo resetu), využívá se tedy pro

- deklaraci proměnných,
- definici vstupních/výstupních pinů,
- inicializaci komunikace sběrnic UART, SPI, I²C,
- definici a inicializaci použitých modulů (Reálný čas, LCD),

druhou částí je Loop, tato část programu je vykonávána ve smyčce a je ukončena resetem, nebo vypnutím napájení. Celá exekuce částí programu je pro zpřehlednění znázorněna na obr. 43.

5.6.1 Speciální funkce

Měření pomocí ultrazvukového senzoru není softwarově náročná záležitost. Ovšem pro ušetření energie (UZ senzor má odběr ~ 80 mA) je měření omezeno na jedno měření za 5 minut. Program hlídá čas měření pomocí modulu reálného času. Na vývojovém diagramu, který je na obr. 44, je znázorněn celý cyklus měření. Jelikož jde o pilotní funkci celého systému, je hodnota měřena průběžně po celou dobu zapnutí.



Obrázek 44 - Vývojový diagram měření hladiny [autor práce]

Aby nedošlo k omezení uživatele a on nemohl sám ovládat jednotlivé zóny, je možno ovládat zóny i manuálně a i při ručním zapnutí zóny, pomocí počítače, je hlídána výška hladiny a zóna se automaticky vypne, pokud se docílí kritického objemu vody (výšky hladiny). Nicméně se předpokládá, že uživatel nenechá vodu vyčerpat až po minimální hranici a zónu opět sám uzavře. V příloze 2 je možno vidět vývojový diagram k této funkci. Součástí jsou podmínky pro kontrolu hladiny vody pro varování, pokud je tato hladina docílena, pak je na displeji zobrazeno varování o teoreticky blížícím se nedostatku vody pro tuto zónu. Pokud dojde k poklesu hladiny až k stavu zakázání zóny, je zóna okamžitě uzavřena a uživateli se na displeji zobrazí zpráva, že zóna byla uzavřena z důvodu nedostatku vody. Součástí přílohy 2 je i krátká legenda k použitým zkratkám.

Jednou ze základních funkcí systému je automatické řízení studny, uživatel předem definuje základní data pro řízení. Časy otevření jednotlivých zón, dobu trvání jejich otevření, kritické hladiny pro jednotlivé zóny, priority zón. Podle těchto pravidel je pak využívání studny řízeno. V příloze 3 je vývojový diagram, který naznačuje řízení jedné zóny. Součástí přílohy 3 je krátká legenda k použitým zkratkám. Funkce je obdobná jako u manuálního otevření, jen je řízená automaticky časem. Podmínky pro kontrolu stavu vody a porovnání s kritickými jsou obdobné.

Tabulka 12 - Požadavky na nastavení systému

Priorita	Ventil - zóna	Objem vody - varování [l]	Výška hladiny - varování [m]	Objem vody - zákaz zóny [l]	Výška hladiny - zákaz zóny [m]
1	Dům (pitná)	300	0,39	-	0,1
2	Dům (užitková)	400	0,52	250	0,33
3	Zahrada (užitková)	450	0,58	300	0,39
4	Ostatní (užitková)	500	0,63	350	0,45

Příklad definice kritických hladin pro jednotlivé zóny (v tab. 12). Jelikož se předpokládá inteligence řídicího systému, je pro zónu pitné vody do domu nastavena zákazová výška hladiny na 0,1 metru z důvodu eliminace chyby, kdy čerpadlo nebude moci dále čerpat vodu, aby nedošlo k suchému chodu čerpadla.

5.7 Mechanická realizace

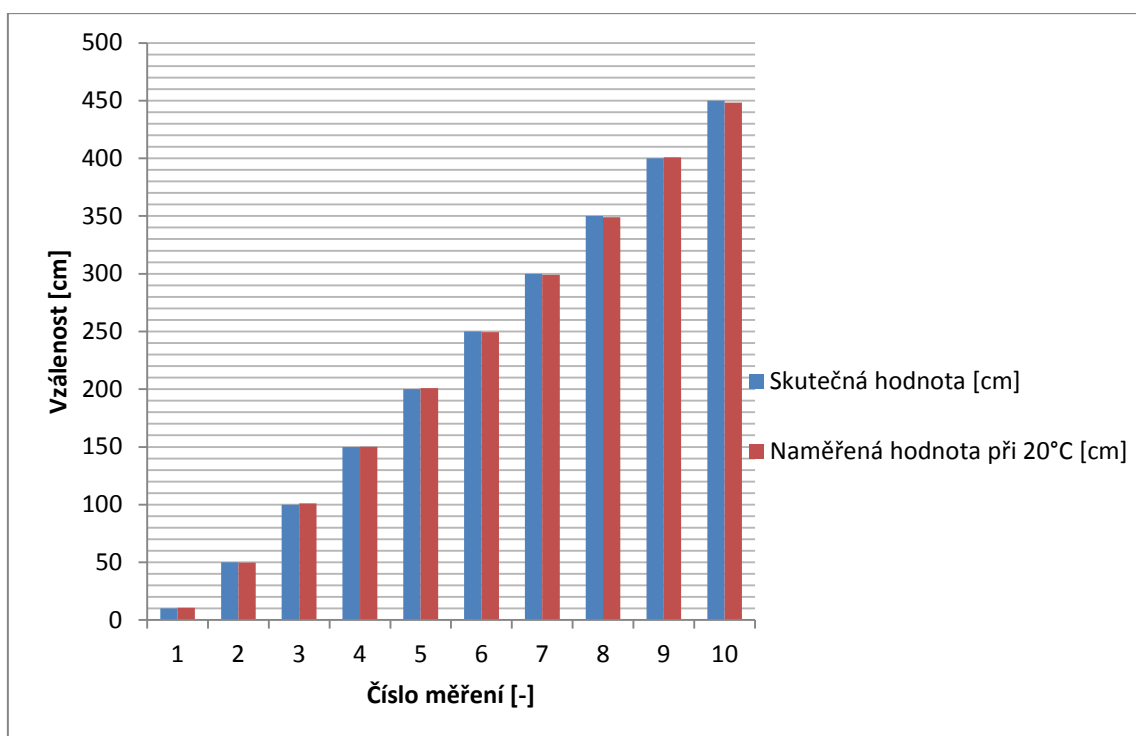
Celý systém byl umístěn do krabičky z hliníkového šasi, jak je vidět v přílohách 4 a 5. Na bočních stěnách krabičky byly rozmístěny konektory a tlačítka pro základní ovládání, jako je tlačítko pro vypínání displeje, konektory pro napájení, připojení senzoru nebo ovládaných prvků. Nad konektory pro připojení kabeláže pro ovládání relé byly umístěny LED diody v kovovém provedení pro indikaci sepnutí zóny (zpětná vazba pro obsluhu). Na fotografii v příloze 5 je vidět, že jediná připojená zóna je třetí a indikace LED diody signalizuje, že zóna je sepnuta.

6 Měření

Součástí projektu je také zkušební měření a ověření správné funkce systému. Je bezpodmínečně nutné, aby ultrazvukový senzor měřil vzdálenost přesně, tolerance maximálně 1%. Jeho funkce a přesnost proto musela být ověřena kontrolním měřením. Měření proběhlo nad vodní hladinou otevřené hasičské nádrže, protože měření v úzké studni ve vysokém rozsahu nebylo možné. Ultrazvukový senzor byl připevněn na 3 metry dlouhou tyč a vyvážen pomocí vodováhy, aby dráha ultrazvukových vln byla kolmá na hladinu vody.

6.1 Lineární charakteristika UZ senzoru

Základním měřením bylo ověření přesnosti UZ senzoru proti nezvlněné vodní hladině.



Obrázek 45 - Lineární charakteristika UZ senzoru [autor práce]

Proměřeno v rozsahu 10 cm – 450 cm. Přesnost senzoru je velmi vysoká, jak je vidět na grafu na obr. 45, nejvyšší jmenovitá odchylka 1,8 cm při měření vzdálenosti 450 cm a nejvyšší procentuální odchylka 6,8% při měření 10 cm, což bude s největší pravděpodobností způsobeno nepřesností měření.

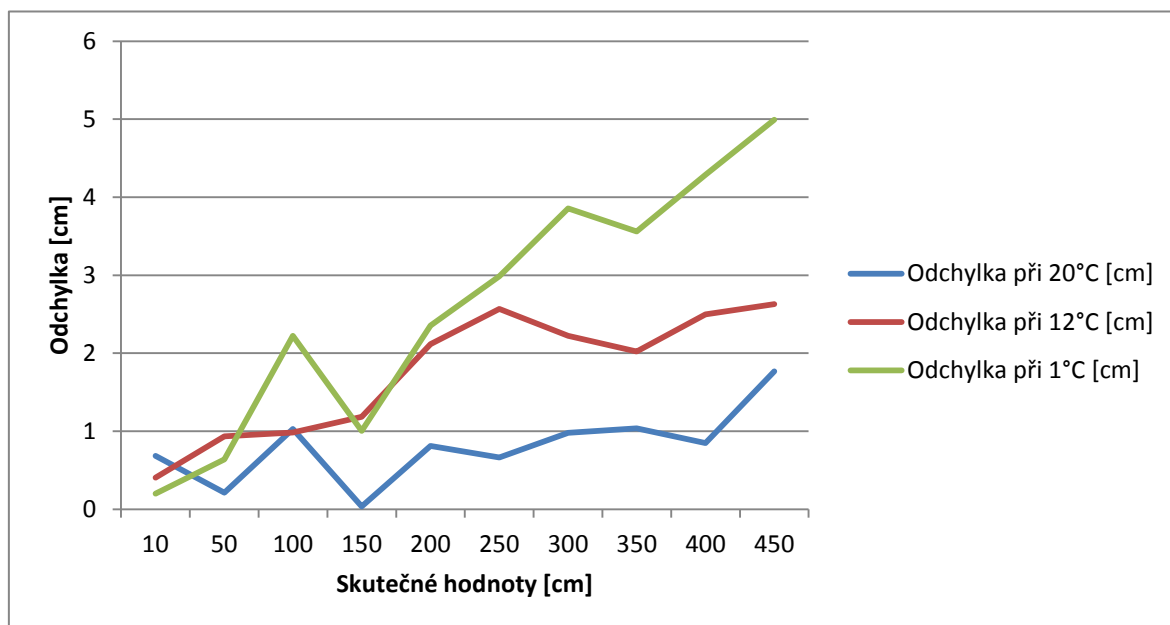
6.2 Závislost naměřené vzdálenosti na teplotě vzduchu

V kapitole 3.5.3 je popis šíření UZ vln ve vzduchu a také, že rychlost zvuku je silně ovlivněna teplotou média, ve kterém se šíří. Proto bylo ověření linearity charakteristiky opakováno i v jiných dnech, kdy byla teplota odlišná. Teplota 1°C byla zvolena, protože to je nejnižší možná teplota pro tuto aplikaci. Obvyklá teplota vzduchu v přiklopené studni je okolo 12°C, proto proběhlo měření i při této teplotě.

Tabulka 13 - Tabulka měření lin. char. při různých teplotách

Skutečná hodnota [cm]	10	50	100	150	200	250
Naměřená hodnota při 20°C [cm]	10,683	49,788	101,028	150,035	200,81	249,336
Naměřená hodnota při 12°C [cm]	10,403	50,933	100,985	151,185	202,114	252,568
Naměřená hodnota při 1°C [cm]	10,2	50,639	102,224	151,003	202,352	252,985

300	350	400	450
299,021	348,962	400,846	448,233
302,221	352,023	402,498	452,63
303,855	353,559	404,287	454,992

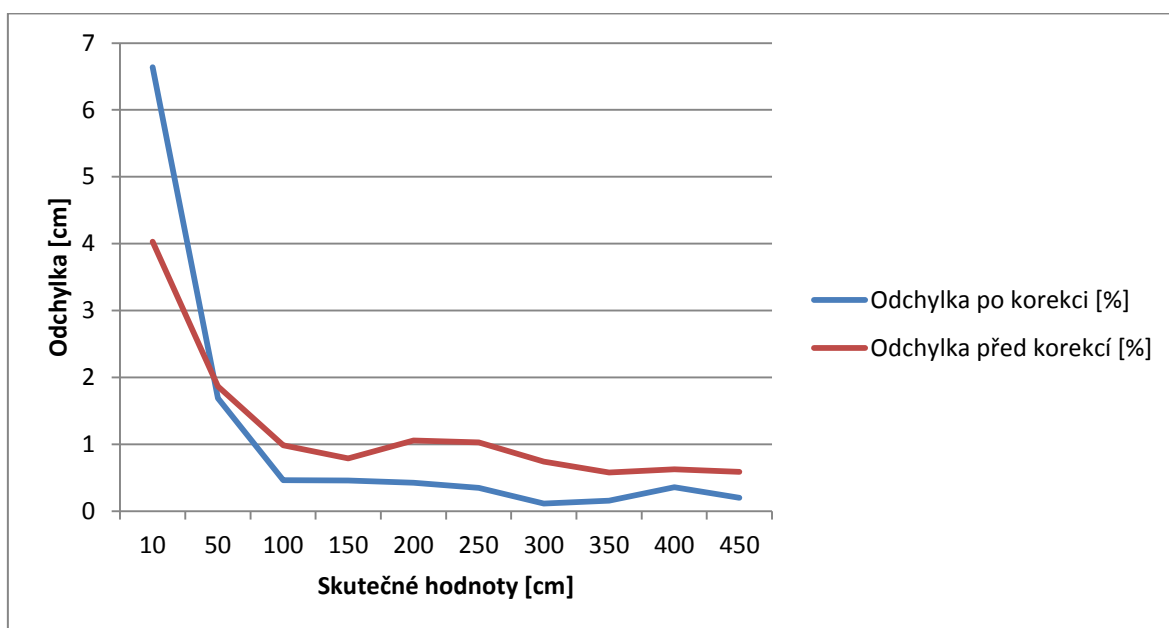


Obrázek 46 - Graf - odchylky od skutečných hodnot při různých teplotách vzduchu [autor práce]

Už v průběhu tohoto kontrolního měření, kdy byla lineární charakteristika měřena ve dnech s rozdílnou teplotou, vyplývalo, že se snižující teplotou se zvyšuje naměřená vzdálenost oproti skutečné vzdálenosti, graf odchylek na obr. 46 to velmi přehledně znázorňuje. Důvodem takřka jistě bude, že se snižující se

teplotou se snižuje i rychlost zvuku. Znamená to, že UZ vlny pak stejnou dráhu překonávají ve vyšším čase. Výsledkem přepočtu senzoru je pak vyšší naměřená vzdálenost. Námi používaný senzor nemá teplotní kompenzaci. Ale jelikož bude pracovat výhradně v prostorech studny, tak za jeho běžné podmínky můžeme prohlásit atmosférický tlak 1013,25 hPa a teplotu 12°C. Z naměřené charakteristiky byla vypočtena průměrná procentuální změna vzdálenosti při teplotě vzduchu 12°C, oproti teplotě 20°C. Nebyla použita první hodnota (při měřené vzdálenosti 10 cm), protože její velká chyba byla pravděpodobně způsobena metodikou měření. Výsledná procentuální odchylka je 0,92%.

Program řídicího systému byl tedy upraven, aby každou naměřenou vzdálenost korigoval o 0,92%. Po této korekci bylo provedeno opětovné měření lineární charakteristiky při teplotě 12°C.



Obrázek 47 - Graf odchylek od skutečné vzdálenosti [autor práce]

Po jednoduché korekci se přesnost senzoru zvýšila, na obr. 47 je graf, který znázorňuje odchylky naměřených hodnot od hodnot skutečných před a po provedení korekce. Obě měření byla provedena při teplotě vzduchu 12°C, jelikož probíhalo měření ve venkovních prostorech a teplota nebyla průběžně kontrolována, mohla se změnit maximálně o $\pm 1^\circ\text{C}$.

7 Závěr

První částí této práce je rozbor technologií měření vodní hladiny, od nejstarších a nejjednodušších možností, až po moderní spojitě měření. V současné době prochází tyto technologie velmi rychlým vývojem, protože se na trhu zvyšuje počet kapalin, které je potřeba měřit, ale také se zdokonalují metody měření.

Na trhu je díky tomu velký počet cenově dostupných a poměrně přesných měřidel, pracujících na různých principech. Vybranou technologií pro měření hladiny v prostředí studny byla ultrazvuková. Ultrazvukových senzorů je na trhu široká škála, pomocí vícekritériálního rozhodování byl nakonec vybrán senzor, který byl z ekonomických důvodů pro potřeby vytváření, vývoje a zkoušení nahrazen jiným. Nicméně platí, že pro finální aplikaci je nutné využít vybraný průmyslový senzor, protože splňuje parametry pro použití v agresivním prostředí.

Dalším výběrem v rámci realizace projektu se stala volba řídicího počítače pro systém, trh nabízí spoustu alternativ, opět pomocí vícekritériálního rozhodování byl vybrán počítač Arduino MEGA. Důležitou součástí systému je i jeho zobrazovací prostředí, pro tento případ byl použit grafický LCD displej s rezistivní dotykovou vrstvou, tzn. že tento displej je zobrazovací i ovládací jednotkou zároveň. Tento projekt je důležité řídit v reálném čase, protože časy otevírání a uzavírání zón zadává obsluha a proto není možné, aby se řídily přepočty a nepřesnými metodami. Z těchto důvodů byl použit aditivní periferní modul reálného času s vlastní záložní baterkou pro uchování času.

Pro programování celého projektu bylo využito softwarového prostředí od výrobce kitu. Po dokončení realizační části bylo třeba celý projekt odzkoušet a proměřit jeho základní charakteristiky. Po měření odběru proudu ze sítě bylo zjištěno, že ultrazvukový senzor má vysoký proudový odběr, po ověření této hodnoty v datasheetu od výrobce jsme zvolili možnost měřit výšku pouze jednou za 5 minut. Program byl tedy upraven. Další měření se týkalo přesnosti měření vzdálenosti samotného senzoru. Jeho přesnost byla na překvapivě dobré úrovni, ale velmi znatelná byla rostoucí chybovost při změně teploty vzduchu, kterým se vlny šíří. Po sérii měření ve vzduchu při teplotě, která je blízká provozní teplotě ve studni, jsme došli k závěru, že je vhodné udělat korekci vzdálenosti v závislosti na

teplotě vzduchu. Po aplikaci této korekce se měření ve vzduchu o přibližně provozní teplotě velmi zlepšilo.

Funkce systému byla ověřena, šlo o ověření spínání digitálních výstupů v závislosti na změně výstupu ultrazvukového senzoru. Funkčnost je přijatelná, bohužel šla ověřit pouze v simulovaných podmínkách, senzor neměřil přímo vodní hladinu, ale vzdálenost od plochy byla měřena horizontálně proti stěně.

Vhodným rozšířením systému by mohla být právě teplotní korekce pomocí měření teploty, navrhované řešení je určeno striktně pro teplotu 12°C. Jelikož použitý počítač má volnou kapacitu výstupů, může být vhodně rozšiřován, může tedy ovládat mnohem více periférií. Teoreticky lze propojit systém s webovým rozhraním, vytvořit www stránky a ovládat studnu i pomocí vzdáleného přístupu. To je řešení vhodné pro náročného uživatele a řešit se bude dle jeho přání a očekávání. V případě potřeby je možné systém rozšířit o repeatry na vedení, pro dosažení vyšší dosažitelné délky vedení.

Práce byla úspěšná, velice přínosná a také poměrně složitá.

8 Použité zdroje literatury

- [1] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 447 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-156-x.
- [2] JEŽEK, Jan; VÁRADIOVÁ, Blanka; ADAMEC, Josef: *Mechanika tekutin*. 3. vydání. ČVUT, Praha 2000. 150 s.
- [3] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 199 s. ISBN 80-7300-114-4.
- [4] ANONYM (OMEGA): *FLOW and LEVEL measurement*, Transactions in Measurement and Control, vol. 4. Library Reference Edition, Omega Engineering, Inc., 2003.
- [5] KADLEC, Karel: Snímače polohy hladiny – principy, vlastnosti a použití (část 1). *AUTOMA*. Praha 2005, č. 5, s. 5–10.
- [6] KADLEC, Karel: Snímače polohy hladiny – principy, vlastnosti a použití (část 2). *AUTOMA*. Praha 2005, č. 6, s. 26.
- [7] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996, 315 s. ISBN 80-01-01500-9.
- [8] ALEXANDRESCU, Andrei. *Moderní programování v C++: návrhové vzory a generické programování v praxi*. Vyd. 1. Brno: ComputerPress, 2004, 340 s. ISBN 80-251-0370-6.
- [9] MATOUŠEK, David. *Práce s inteligentními displeji LCD*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006-, ISBN 80-7300-121-7.
- [10] Dinel (firma). *Elektronické Systémy Pro Měření Výšky Hladiny* Zlín: Dinel, 2011.
- [11] ZELINKA, Zdeněk. *Studny*. 1. vyd. Praha: Grada, 2013. ISBN 8024744821.

9 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Ponorná tyč	4
Obrázek 2 - Plovákový hladinoměř (spínač)	5
Obrázek 3 - Plovákový hladinoměř (magnetické kontakty)	5
Obrázek 4 - Hladinoměř s diferenčním transformátorem	6
Obrázek 5 - Hladinoměř s ponorným tělesem	6
Obrázek 6 - Hydrostatický hladinoměř v otevřené nádobě	7
Obrázek 7 - Hladinoměř – Potenciometrický	8
Obrázek 8 - Konstrukce odporového pásku	8
Obrázek 9 - Kapacitní snímač	9
Obrázek 10 - Transmisní senzor hladiny	10
Obrázek 11 - Reflexní senzor s rovnou čelní plochou	11
Obrázek 12 Reflexní senzor se zkosenou čelní plochou	12
Obrázek 13 - Akustické vlnění	12
Obrázek 14 - Konstrukce piezoelektrického převodníku	14
Obrázek 15 - Vyzářovací charakteristika ultrazvukového převodníku	14
Obrázek 16 - Jednohlavový ultrazvukový snímač	15
Obrázek 17 - Dvouhlavový ultrazvukový snímač	15
Obrázek 18 - Záznam signálu ultrazvukového převodníku z osciloskopu	16
Obrázek 19 - Detail doznívání kmitů vysílače	17
Obrázek 20 - Chyba vznikající rozdílnou amplitudou impulsů	17
Obrázek 21 - Systém CFD	18
Obrázek 22 - Graf závislosti teplota a tlaku vzduchu na rychlost šíření	20
Obrázek 23 - Blokové schéma FM-CM radarového hladinoměřu	22
Obrázek 24- Řez kopanou studnou	25

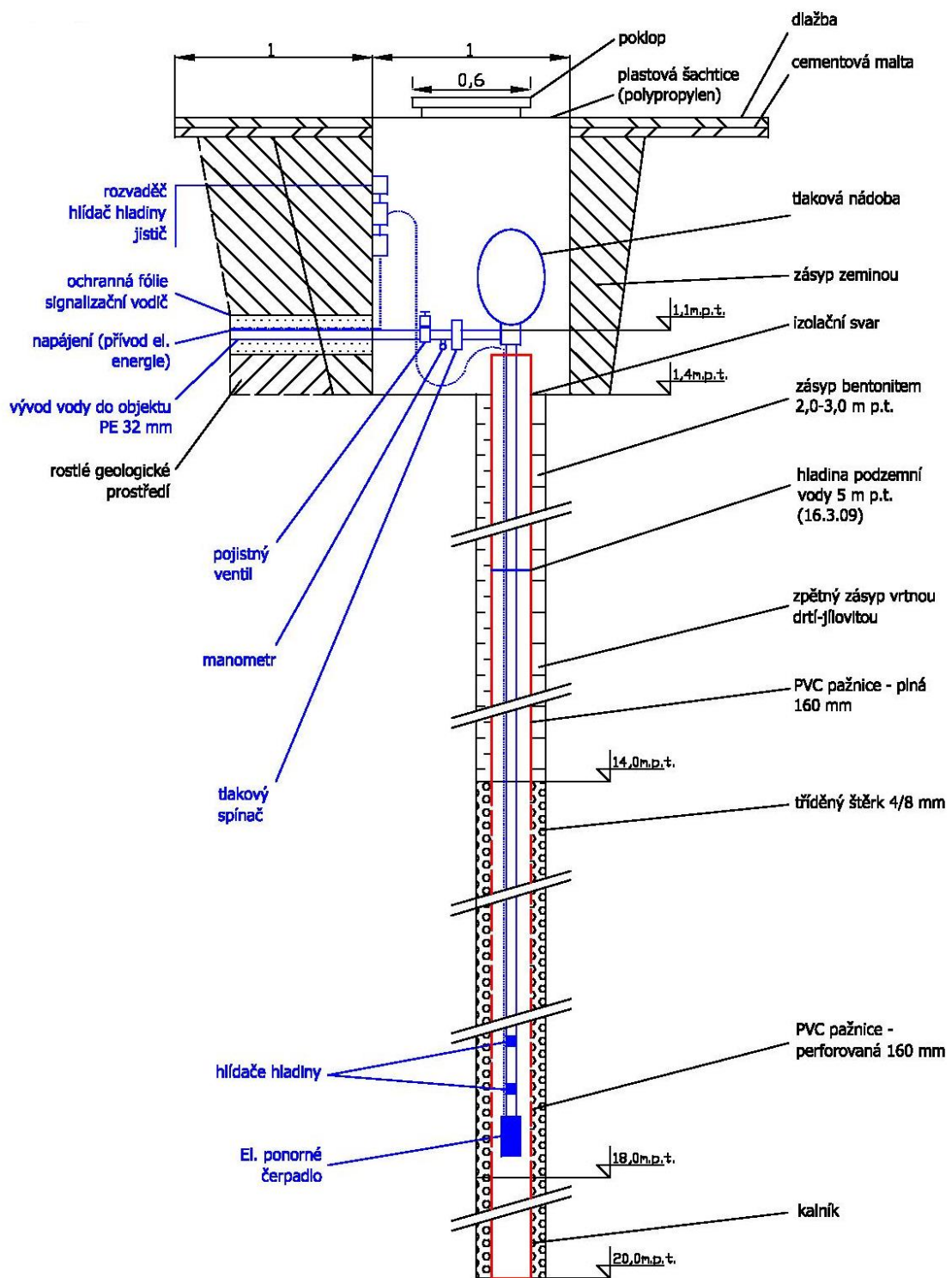
Obrázek 25 - Schéma řízení čerpadla a ventilů.....	26
Obrázek 26 - PINGUINO celý kit.....	28
Obrázek 27 - BeagleBone - celý kit.....	29
Obrázek 28 - Raspberry Pi - celý kit.....	30
Obrázek 29 - Arduino MEGA - celý kit.....	31
Obrázek 30 - Snímač SU-3/A0-0V v pouzdru.....	34
Obrázek 31 - Snímač TU3/C3-0E v pouzdru.....	35
Obrázek 32 - Snímač QU6/D1-0E v pouzdru.....	36
Obrázek 33 - Snímač USC 30 M 6000 I0/10PSK-BSL v pouzdru, dodatečné informace.....	37
Obrázek 34 - 3,2 LCD TFT displej.....	40
Obrázek 35 - Matice LCD TFT displeje.....	40
Obrázek 36 - Schéma matice dotykové vrstvy.....	41
Obrázek 37 - Schéma rezistivní dotykové desky.....	42
Obrázek 38 - Schéma zapojení Arduina s LCD modulem Chyba! Záložka není definována.	
Obrázek 39 - Modul reálného času DS3231.....	43
Obrázek 40 - Připojení DS3231 k Arduinu.....	44
Obrázek 41 - Kompletní zapojení systému.....	45
Obrázek 42 - SW prostředí Arduino IDE.....	46
Obrázek 43 - Vývojový diagram - zpracování kódu.....	47
Obrázek 44 - Vývojový diagram měření hladiny.....	48
Obrázek 45 - Lineární charakteristika UZ senzoru.....	50
Obrázek 46 - Graf - odchylky od skutečných hodnot při různých teplotách vzduchu.....	51
Obrázek 47 - Graf odchylek od skutečné vzdálenosti.....	52

10 Seznam tabulek

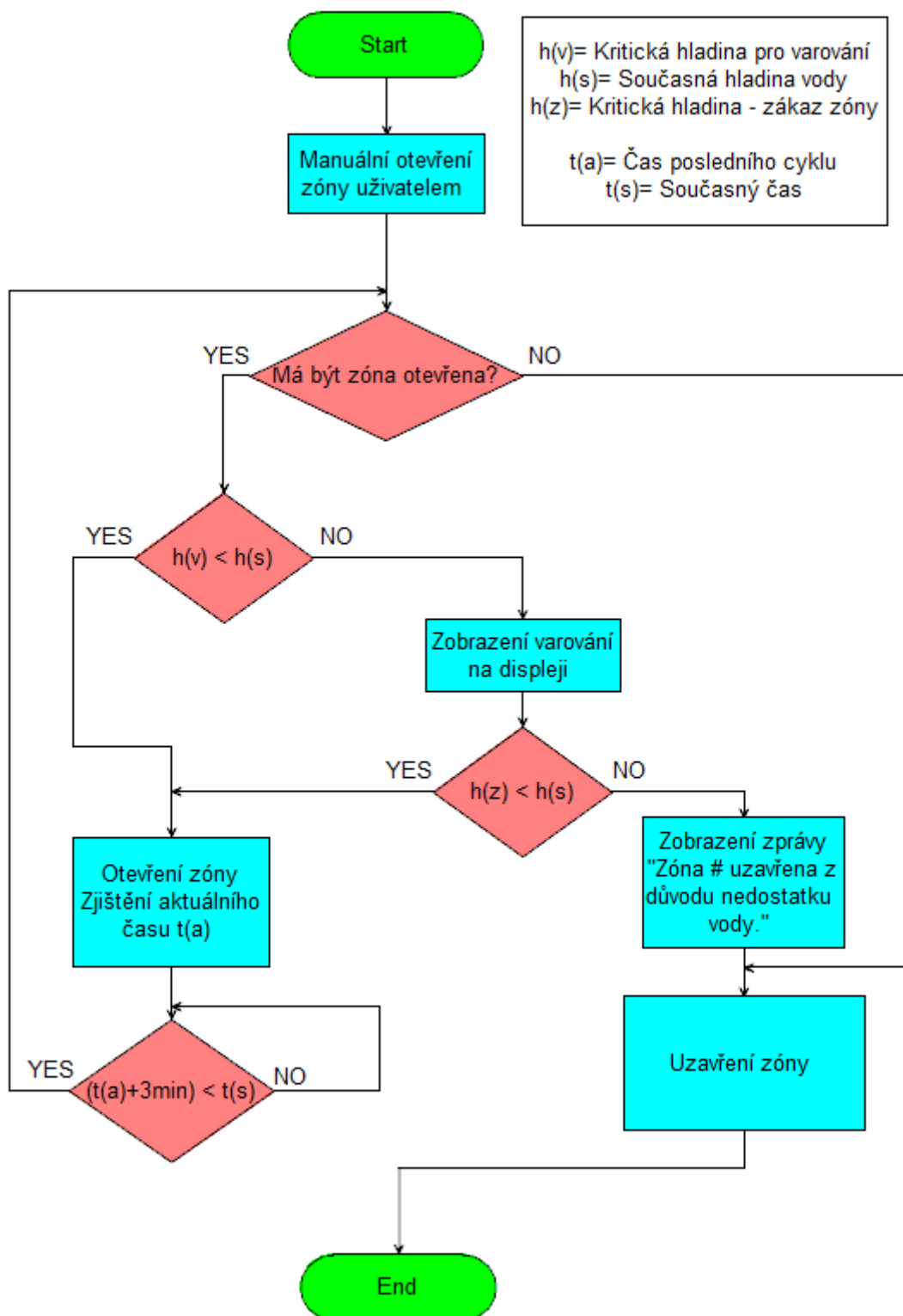
Tabulka 1 - Vlastnosti kitu Pinguino	28
Tabulka 2 - vlastnosti kitu BeagleBone	29
Tabulka 3 - vlastnosti kitu Raspberry PI	30
Tabulka 4 - vlastnosti kitu Arduino MEGA	31
Tabulka 5 - určení vah VKR	32
Tabulka 6 - vlastnosti snímače SU-3/A0-0V	34
Tabulka 7 - vlastnosti snímače TU3/C3-0E	35
Tabulka 8 - vlastnosti snímače QU6/D1-0E	37
Tabulka 9 - vlastnosti snímače USC 30 M 6000 I0/10PSK-BSL.....	38
Tabulka 10 - Rozdělení vah VKR	38
Tabulka 11 - Parametry LCD.....	40
Tabulka 12 - Požadavky na nastavení systému	49
Tabulka 13 - Tabulka měření lin. char. při různých teplotách	51

11 Seznam příloh

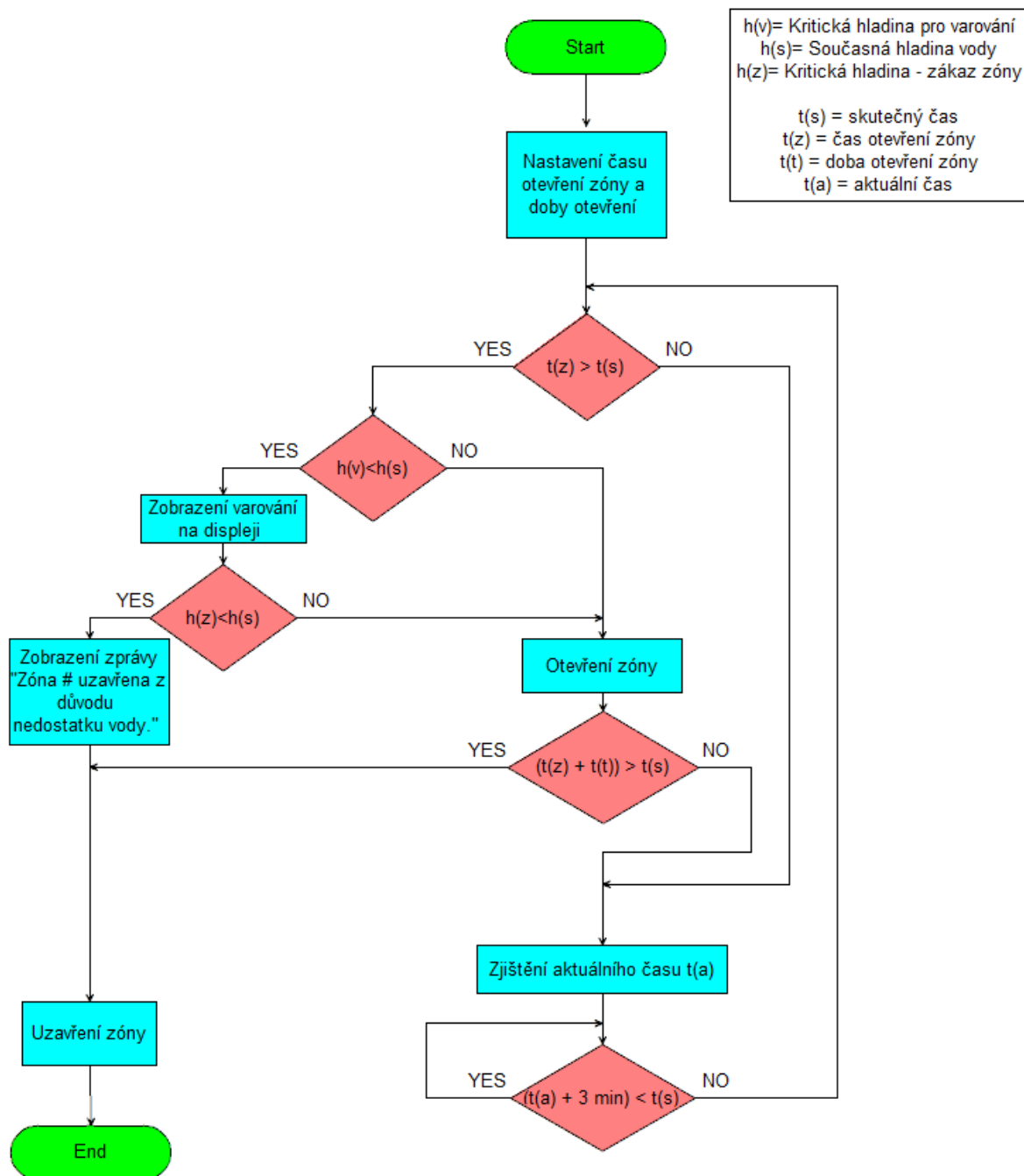
Příloha 1 - Řez vrtané studně.....	60
Příloha 2 - Vývojový diagram - Manuální otevření zóny	61
Příloha 3 - Vývojový diagram - automatické ovládání zóny	62
Příloha 4 - Pohled na kompletní krabičku	63
Příloha 5 - Pohled na konektory pro připojení periférií	64



Příloha 1 - Řez vrtané studně [11]



Příloha 2 - Vývojový diagram - Manuální otevření zóny [autor práce]



Příloha 3 - Vývojový diagram - automatické ovládání zóny [autor práce]



Příloha 4 - Pohled na kompletní krabičku [autor práce]



Příloha 5 - Pohled na konektory pro připojení periferií [autor práce]