

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroniky a informačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Inteligentní závlahový systém

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel MÜHLBACHER**
Osobní číslo: **E19N0066P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Téma práce: **Inteligentní závlahový systém**
Zadávající katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

Zásady pro vypracování

Navrhněte a realizujte HW včetně firmware pro systém inteligentního závlahového systému.

1. Analyzujte současná řešení inteligentních závlahových systémů.
2. Navrhněte koncepci inteligentního závlahového systému.
3. Navrhněte hardware a firmware alespoň mimimalistického řešení.
4. Navržené řešení realizujte.


Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. DĀDO, Stanislav a Marcel KREIDL. Senzory a měřicí obvody. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01500-9

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Kamil Kosturik, Ph.D.**
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 9. října 2020

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na návrh závlahového systému. Jsou zde popsány principy měření půdní vlhkosti u vybraných senzorů. Dále jsou zde popsány možnosti bezdrátového přenosu dat mezi mikrokontroléry. Je zde popsáno možné řešení závlahového systému, včetně grafického rozhraní pro snadné ovládání uživatelem.

Klíčová slova

Měření půdní vlhkosti, NRF24L01+, Bluetooth, Wi-Fi, FreeRTOS, STM32, řízení krokového motoru, STM32CubeIDE, TouchGFX

Abstrakt

This work is focused on the design of an irrigation systém. The Principles of soil moisture measurement for selected sensors are described here. Futhermore, the possibilities of wireless data transfer between microcontrollers are described here. A possible solution of the irrigation systém is described here, including a graphical interface fo easy user control.

Key words

Soil moisture measurement, NRF24L01+, Bluetooth, Wi-Fi FreeRTOS, STM32, stepper motor control, STM32CubeIDE, TouchGFX

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 27.5.2021

Pavel Mühlbacher

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Kamilu Kosturikovi, Ph.D. za věnovaný čas, trpělivost a cenné rady při psaní této diplomové práce.

Obsah

Úvod.....	10
Seznam symbolů a zkratk.....	11
1. Dostupná řešení závlahového systému	12
2. Senzory pro měření vlhkostí půdy	13
2.1 Gravimetrická metoda	13
2.2 Odporové senzory.....	14
2.3 Kapacitní senzory	15
3. Možnosti bezdrátového přenosu dat	16
3.1 Bluetooth	16
3.2 Wi-Fi.....	17
3.3 Moduly pro přenos dat NRF24L01+	18
4. Metody pro měření stavu hladiny	19
4.1 Spojité měření hladiny pomocí ultrazvukového snímače.....	20
4.2 Limitní měření hladiny pomocí ultrazvukového snímače	21
5. Popis řízení krokového motoru.....	21
5.1 Čtyřtaktní řízení s magnetizací jedné fáze.....	22
5.2 Čtyřtaktní řízení s magnetizací dvou fází	22
5.3 Osmitaktní řízení	23
5.4 Mikrokrokování	23
5.5 Unipolární řízení.....	24
5.6 Bipolární řízení	24
5.7 Integrovaný obvod ULN2003.....	25
5.8 Integrovaný obvod L293D.....	25
6. Software	26
6.1 STM32CubeIDE.....	26
6.2 TouchGFX	27

6.3	Operační systém FreeRTOS	29
7.	Navržená koncepce	32
7.1	Řešení snímací jednotky	34
7.1.1	Porovnání odporového a kapacitního senzoru	37
7.2	Řešení řídicí jednotky	38
7.2.1	Měření pomocí ultrazvukového měřiče stavu hladiny vody	42
7.3	Konfigurace modulů pro přenos dat NRF24L01+	43
7.4	Řešení navrženého ventilu	44
7.5	Cenová rozvaha navržené koncepce	46
	Závěr	47
	Seznam obrázků	48
	Seznam tabulek	49
	Bibliografie	49
	Přílohy	51
A.	Popis registrů NRF24L01+	51
B.	Fotodokumentace z realizace	52

Úvod

Cílem této práce je navrhnout možné řešení inteligentního závlahového systému. Tento systém je navržen tak, aby došlo k maximální úspoře vody a bere v úvahu potřebu vody jednotlivých druhů zeleniny. Koncepce je navržena na dvě části, a to řídicí jednotku a několik snímacích jednotek. Pro řídicí jednotku je zvolena vývojová deska od firmy STMicroelectronics typ F469 a pro snímací jednotky typ L432KC od stejné firmy. Jsou zde popsány vybrané možnosti měření půdní vlhkosti a jejich porovnání. Dále jsou popsány možnosti bezdrátového přenosu dat, zaměřené především na moduly NRF24L01+. Jsou zde navrženy dva druhy ventilů pro kapkovou závlahu se vstupem a výstupem pro 6mm hadici. Uzavírání ventilů je realizováno otáčením krokového motoru. Jedna kapitola je věnována popisu řízení krokových motorů. Dále je zde popsán využitý software.

Seznam symbolů a zkratk

ϵRelativní permitivita

FSK..... Klíčování frekvenčním posunem

GFSK.....Klíčování frekvenčním posunem s Gaussovo dolní propustí

cRychlost zvuku

IIC.....Inter-Integrated Circuit

SPI.....Serial Peripheral Interface

RTC.....Real time clock

1. Dostupná řešení závlahového systému

Nezákladnější závlahový systém je zalévání pomocí konve. Tento systém je starý několik stovek let a je velmi fyzicky a časově náročný. Mezi komerčně dostupné závlahové systémy patří zavlažování pomocí časovače. U těchto systémů lze nastavit interval zalévání. Výhody jsou jednoduchost a cenová dostupnost. Tyto systémy nemají běžně zpětnou vazbu o stavu vlhkosti půdy, a proto zalévají i když rostlina nepotřebuje. Například když pršelo nebo bylo celý den zataženo a rostlina nepotřebuje tolik vody. Tyto systémy jsou v domácnostech nejčastěji napojeny na vodovodní řad a pro zalévání používají pitnou vodu, což není úplně nezbytné, jelikož pro zalévání postačí dešťová voda.

Nejmodernější a nejvíce úsporný systém z hlediska úspory vody je kapková závlaha. Základem tohoto systému je rozvod tenkých hadiček po záhonu. Malé díry jsou pak udělány buď přímo do hadice v místě kořenového systému rostliny nebo umístěním odkapávače. Výhoda odkapávačů je, že nejčastěji mají závit pro nastavení množství odkapávané vody, příklad takového odkapávače, lze vidět na obrázku číslo 1. Voda tak kape přímo k jednotlivým kořenovým systémům rostlin a zabraňuje se tak zbytečnému vypařování vody. Technologie kapkové závlahy byla vyvinuta v Izraeli. První experimentální systémy zde byly vyzkoušeny v roce 1959. Tento systém se projevil jako velmi účinný a dále se odtud rozšířil do celého světa.

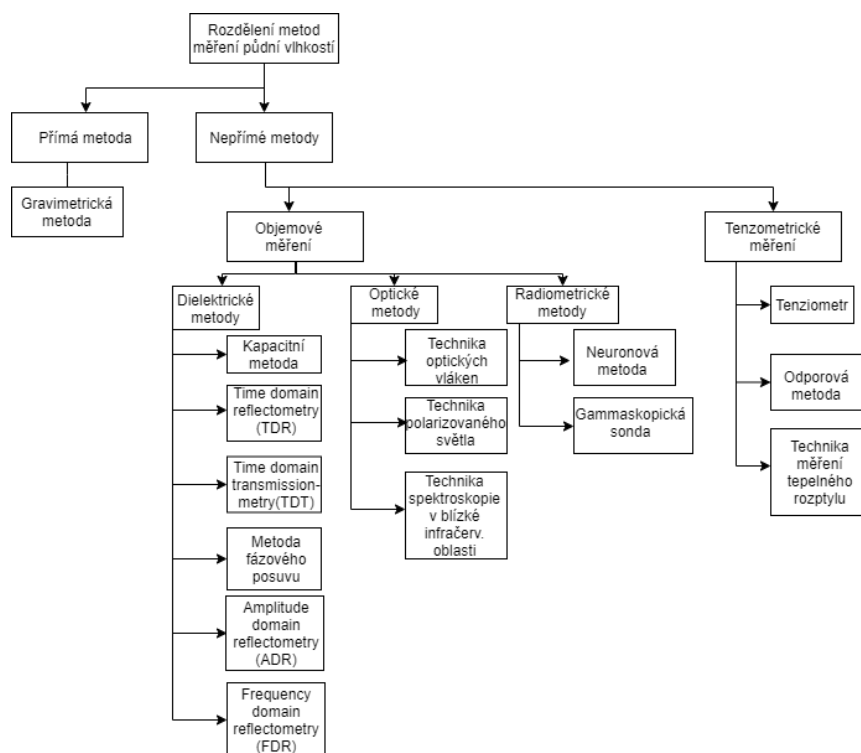
(1)



Obrázek 1 - Odkapávač u kapkové závlahy (2)

2. Senzory pro měření vlhkosti půdy

Metody měření půdní vlhkosti lze rozdělit do několika kategorií. Jsou rozděleny na destruktivní a nedestruktivní to záleží na odběru půdního vzorku. Další rozdělení je na metody přímé a nepřímé. Pomocí přímé metody se měří přesný obsah vody v půdě. Nepřímé měření vychází z měření jiné veličiny, která je závislá na vlhkosti půdy např. elektrický odpor nebo permitivita. (3) Rozdělení metod je vidět na obrázku číslo 2.



Obrázek 2 - Rozdělení metod pro měření půdní vlhkosti

2.1 Gravimetrická metoda

Gravimetrická metoda se řadí mezi přímé metody měření půdní vlhkosti. Tato metoda slouží ke kalibraci pro jiné metody a je destruktivní. Vychází z odebrání části půdního vzorku za pomoci kovového válce. Válec je poté zvážen a půda je postupně vysušována při teplotě 100-110 °C. Doba záleží na vlhkosti a složení půdy. Sušení probíhá do ustálení hmotnosti s přesností 0,01 gramu. Výhodou této metody je, že je velice přesná. Tato metoda je destruktivní a to znamená, že dochází k narušování půdního profilu a celkovému narušení vlastností půdy. Nevýhodou je dlouhá doba měření. (4) Výpočet probíhá dle vzorce 1

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m} * 100 [\%, g, g, g, g] \quad (1)$$

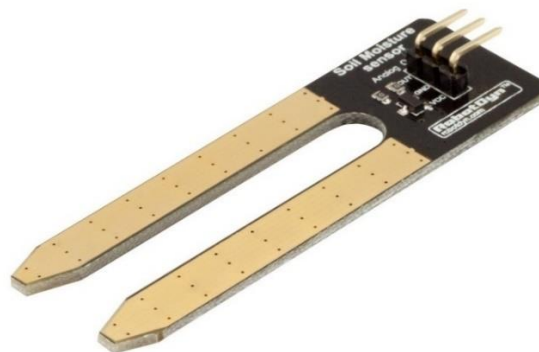
kde m_1 je hmotnost nádoby se vzorkem před vysoušením

m_2 je hmotnost nádoby se vzorkem po vysušení

m je hmotnost válce

2.2 Odporové senzory

Odporové senzory vychází z Ohmova zákona. Jsou levným a jednoduchým nástrojem pro měření vlhkosti půdy. Kovové elektrody jsou zality do sádrových případně skelných, nylonových či keramických bločků, přičemž se měří velikost odporu mezi dvěma kovovými elektrodami uvnitř bloku. Elektrický odpor se mění mezi elektrodami v závislosti na obsahu vlhkosti bloku, který se mění v závislosti na sacím tlaku v okolní půdě. Tato metoda je citlivá na změny teploty. Změna teploty přibližně o 1°C znamená změnu vlhkosti přibližně o 1%. Další nevýhodou je vysoká citlivost na koncentraci rozpuštěných látek, a to především solí, které způsobují korozi elektrod. Mezi představitele odporových senzorů patří senzor od firmy Robot Dyn. Senzor má 3 vstupy: napájecí napětí, uzemnění a výstupní napětí, které odpovídá napětí na odporu v rozmezí 0 až 3,3V. Senzor se skládá ze 3 součástí, a to tranzistoru a dvou odporů pro omezení maximálního proudu. (4) (5) Senzor lze vidět na obrázku číslo 3.



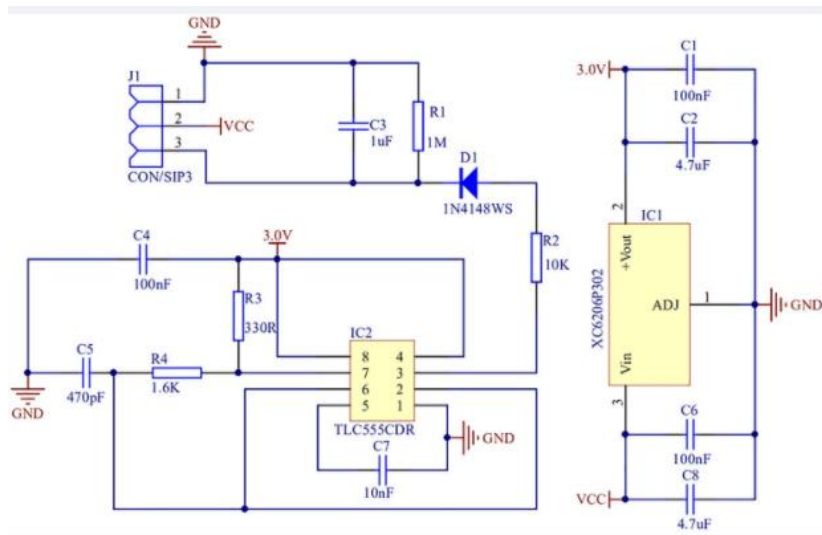
Obrázek 3 - Odporový senzor vlhkosti půdy (6)

2.3 Kapacitní senzory

Kapacitní senzory vychází z principu kondenzátoru. Kondenzátor se skládá ze 3 částí, a to pozitivní desky, negativní desky a dielektrika. Princip spočívá v porovnání doby nabíjení neznámého kondenzátoru, jehož dielektrikum je tvořeno půdou s dobou nabíjení kondenzátoru o známé kapacitě. Neměří se vlhkost přímo ale měří se ionty, které jsou rozpuštěny ve vlhkosti. Tyto ionty a jejich koncentrace mohou být ovlivněny řadou faktorů, ale především vlhkostí půdy, jelikož existuje velký rozdíl mezi hodnotou relativní permitivity vzduchu, kde $\epsilon=1$ a vody je $\epsilon=80$ při teplotě 20°C. Hodnota relativní permitivity pevné fáze horniny se pohybuje v závislosti na mineralogickém složení v rozmezí 2 až 9. Hlavní výhodou oproti odporovým sensorům patří, že nedochází ke korozi elektrod. Nevýhodou je také vysoká citlivost na teplotu (4). Mezi představitele kapacitních sensorů patří senzor s označením SEN0193 od výrobce DFRobot. Tento kapacitní senzor je založen na integrovaném obvodu časovače 555. Časovač a další součástky tvoří oscilátor, který pracuje na určité frekvenci. Měřicí část je vyrobena ze dvou elektrod umístěných ve spodní části desky, které fungují jako kondenzátor, který je připojen k oscilačnímu obvodu. Poté co je snímač umístěn do půdy, vlhkost v půdě změní kapacitu kondenzátoru a tím se změní frekvence oscilace na časovači 555. Tato změna frekvence je poté převedena na analogové napětí. Tento senzor má 3 vstupní piny: napájecí napětí, uzemnění a výstupní napětí. Napájecí napětí může být od 3,3 V do 5 V. (7) Na obrázku číslo 4 je vidět náhled na kapacitní senzor vlhkosti půdy a na obrázku číslo 5 lze vidět jeho vnitřní schéma.



Obrázek 4 - Kapacitní senzor vlhkosti půdy (8)



Obrázek 5 - Vnitřní schéma kapacitního senzoru pro měření půdní vlhkosti (8)

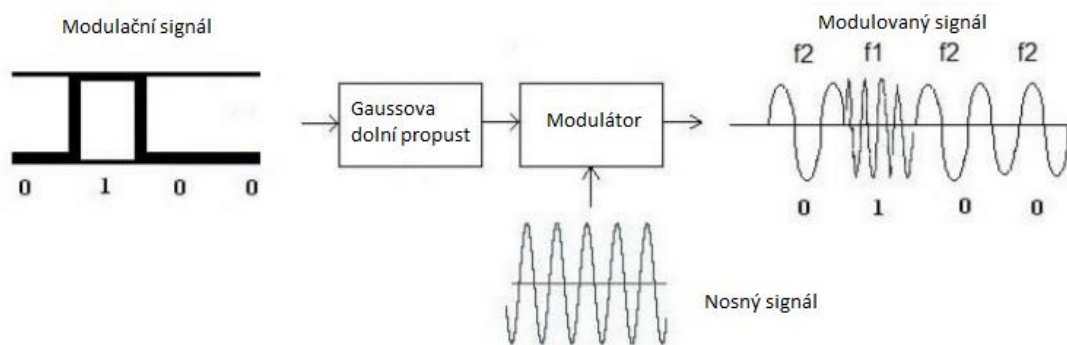
3. Možnosti bezdrátového přenosu dat

Mezi nejznámější možnosti bezdrátového přenosu dat patří infraport, Bluetooth a Wi-Fi. Infraport vysílá a přijímá modulované infračervené světlo o vlnové délce 875 nm. Jako vysílač se využívají infračervené led diody nebo laserové diody. Přijímač je realizován pomocí fotodiod. Infraport není tolik využíván z důvodu nutné přímé viditelnosti obou zařízení. Mezi další méně známé možnosti bezdrátového přenosu dat patří například ZigBee, který vznikl jako náhrada drátového rozhraní RS485, další standardy bezdrátového přenosu jsou EnOcean, případně WirelessHart. (9)

3.1 Bluetooth

Bluetooth slouží pro bezdrátovou komunikaci dvou a více zařízení, byl vyvinut jako náhrada za kabelové rozhraní RS-232 a je definován standardem IEEE 802.15.1. Pracuje v nelicencovaném pásmu 2,4000 GHz až 2,4835 GHz. Není nutné žádat o přidělení frekvenčního pásma a případně platit poplatky za jeho využívání. Hlavním účelem Bluetooth je bezdrátový přenos dat. Přenos dat využívá modulaci, která má dva vstupní signály, a to nosný signál a modulační signál. Výstupem je pak modulovaný signál. Modulace, které využívá technologie Bluetooth jsou GFSK, $\pi/4$ DQPSK a 8DPSK. V Evropě se využívá šířka 80MHz. Celkem je

tedy v pásmu definováno 79 kmitočtů s šířkou 1MHz. Modulace GFSK neboli *Graussin Frequency Shift Keying* se řadí mezi digitální modulace. Nosný signál je signál s harmonickým průběhem a modulačním signálem je digitální signál, jak je vidět na obrázku číslo 6. V modulaci GFSK na rozdíl od frekvenční modulace FSK jsou impulzy základního pásma obsahující 0 a 1 před vstupem do modulátoru procházeny Gaussovo dolní propustí. Původní pravouhlé změny impulzů jsou tak omezením vysokých kmitočtů zaobleny. Filtrace způsobí potlačení nežádoucích postranních složek spektra modulovaného GFSK signálu. (10)



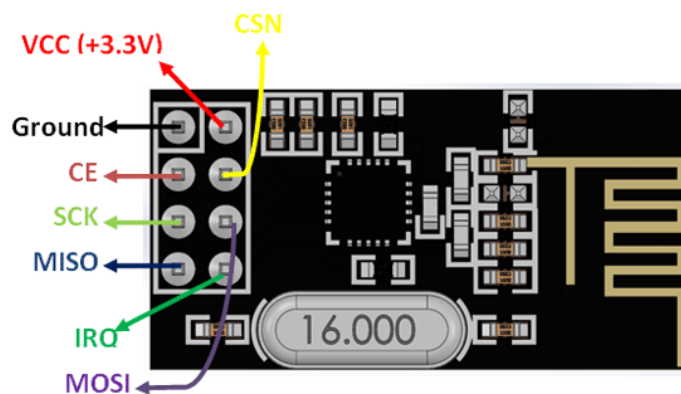
Obrázek 6 - Modulace signálu GFSK

3.2 Wi-Fi

Jedná se o soubor standardů IEEE 802.11, které popisují bezdrátovou komunikaci především v počítačových sítích. Komunikace probíhá také v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz ale navíc i na frekvenci 5 GHz. Nejnovějším standardem je IEEE.802.11ax, tento standart je také označován jako Wi-Fi 6. Oproti předcházejícím standardům, které byly zaměřeny na zvyšování přenosové rychlosti je Wi-Fi 6 zaměřena na zvýšení spolehlivosti a celkovou propustnost sítě v prostředí s velkým počtem zařízení, a to až čtyřnásobně oproti předchozí verzi Wi-Fi 5. Přenosová rychlost dosahuje u Wi-Fi 6 až 9,6Gb/s. a je zpětně kompatibilní s předchozími verzemi. (11)

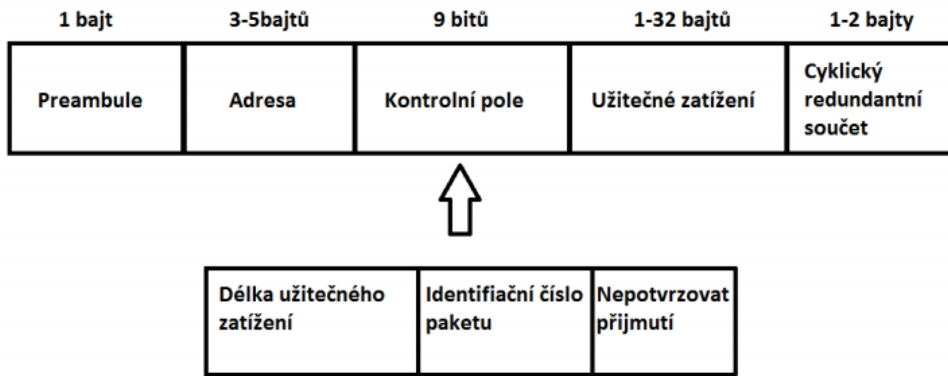
3.3 Moduly pro přenos dat NRF24L01+

Moduly pracují na frekvenci 2400-2525 MHz, to záleží na zvoleném kanálu. Každý kanál zabírá šířku menší než 1 MHz, a to umožňuje komunikovat na až 125 různých kanálech. Na každém kanále je možné komunikovat až na šesti různých datových pipelinech v režimu jeden přijímač a 6 vysílačů. Pro každý pipeline lze nastavit potvrzování přijmutí paketu či nikoliv. Moduly využívají modulaci GFSK a umožňují rychlost přenosu 250 kbps, 1 Mbps a 2 Mbps. S mikrokontrolérem komunikují pomocí SPI sběrnice. Mezi přední vlastnosti těchto modulů patří velmi malá spotřeba, která je 11,3 mA při vysílacím výkonu 0 dBm, 26 μ A ve standby režimu a 0,9 μ A ve vypnutém stavu. Při neúspěšném přenosu umožňují moduly opakované odeslání, a to až 15krát. V příloze A jsou popsány důležité konfigurační registry. Na obrázku číslo 7 je vidět popis pinů NRF24L01+



Obrázek 7 - Popis pinů NRF24L01+ (12)

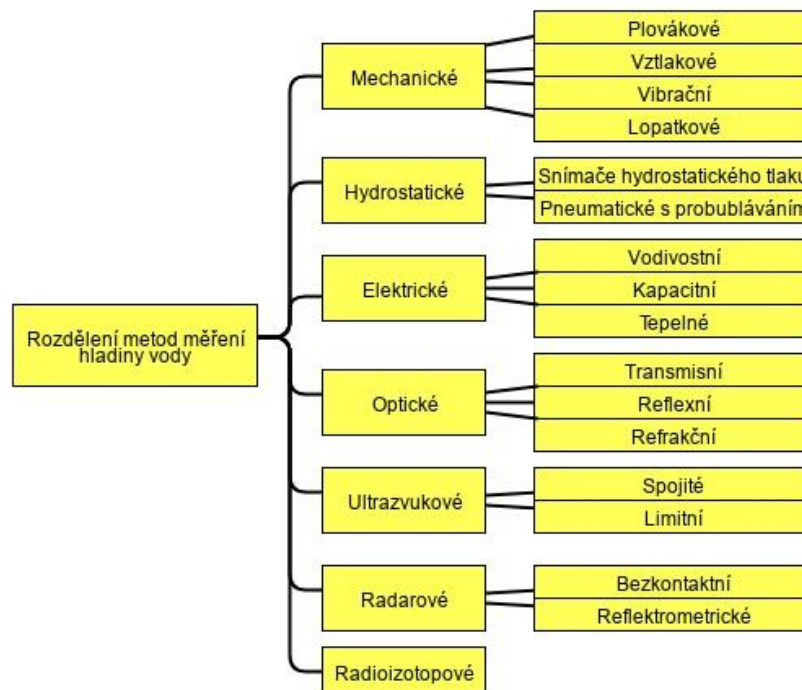
Moduly vysílají po paketech, jak je vidět na obrázku číslo 8. Preambule slouží k synchronizaci přijímače na příchozí datový tok. Adresa konkretizuje zařízení určené pro příjem odesílaného paketu. V kontrolním poli paketu je obsažen počet datových bajtů, identifikace paketu a příznak pro automatické potvrzení přijetí paketu. Následuje užitečné zatížení, které může být v rozsahu 1 až 32 bajtů. Na konci je kontrolní součet CRC.



Obrázek 8 - Složení paketu NRF24L01+

4. Metody pro měření stavu hladiny

Měření stavu hladiny může být prováděno v různých nádobách s různými médii. Měření se rozděluje na spojitě měření hladiny, které měří výšku v určitém rozmezí, nebo nespojitě měření, kde se měří limitní nebo bodové hodnoty polohy měřeného média. Snímače hladiny fungují na různých principech, jejich rozdělení lze vidět na obrázku číslo 9. (13)

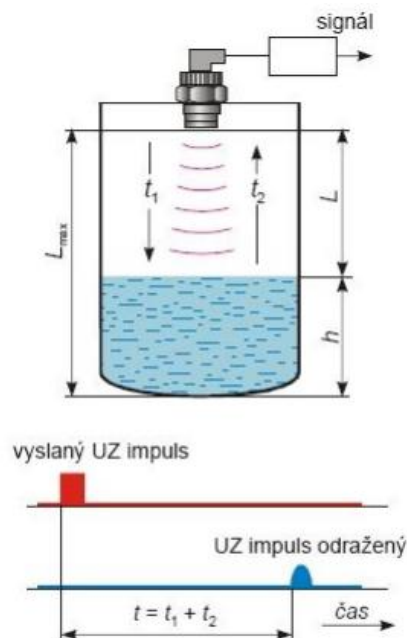


Obrázek 9 - Rozdělení metod pro měření hladiny vody

4.1 Spojité měření hladiny pomocí ultrazvukového snímače

Ultrazvuk pracuje na frekvenci vyšší než 20 kHz. Snímač se skládá z generátoru, vysílače, přijímače a zesilovače ultrazvukového vlnění. Ultrazvukový impuls vytvořený v generátoru je vyslán z vysílače. Impuls je odražen od hladiny měřeného média a poté je detekován odraz v přijímači. Doba t je součtem doby šíření od vysílače k hladině a doby šíření od hladiny k přijímači, jak je znázorněno na obrázku číslo 10. Výpočet pak probíhá dle vzorce číslo 2. Kde c je rychlost zvuku tedy 343 m/s, L_{max} je výška nádoby, t je součet časů t_1 a t_2 a h je poté výsledná výška hladiny. (14)

$$h = L_{max} - c * \frac{t}{2} \quad (2)$$

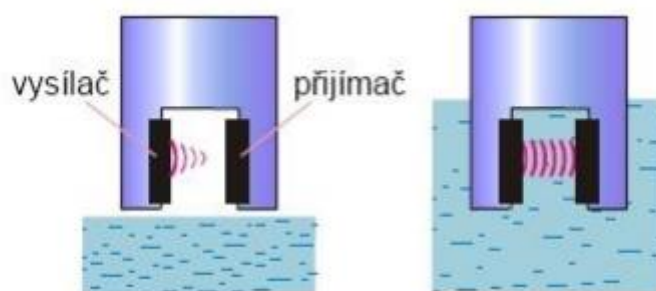


Obrázek 10 - Princip ultrazvukového měření hladiny vody (13)

Mezi představitele ultrazvukových senzorů patří například senzor s označením HC-SR05. Tento senzor je relativně levný a má následujících 5 pinů sloužících pro přivedení napájecího napětí, uzemnění, trig, echo a out. Trig pin slouží k vyslání ultrazvukového impulsu a echo pin bude hodnota logická jedna po přijmutí odraženého ultrazvukového impulsu. (15)

4.2 Limitní měření hladiny pomocí ultrazvukového snímače

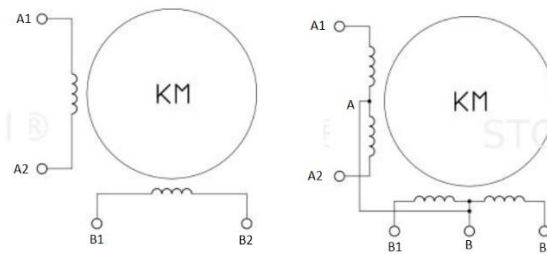
Pro limitní měření využívají ultrazvukové hladinoměry útlumu šíření vlnění v médiu. Pokud v hlavici není detekováno žádné médium, tak je útlum vlnění poměrně vysoký a detektor nic nezaznamená. Po naplnění hlavice médiem se útlum sníží a vlnění se dostane až k detektoru. Tím je zaznamenán limitní stav, jak je znázorněno na obrázku číslo 11. (14)



Obrázek 11 - Limitní měření hladiny pomocí ultrazvukového snímače (13)

5. Popis řízení krokového motoru

Krokové motory se skládají z rotoru a statoru. Statorové vnutí je buzeno tak, aby vytvářelo magnetické póly opačně, než jsou póly rotoru a tím docházelo k jeho otáčení. Počet magnetických obvodů statoru krokového motoru s příslušnými vnutími se označuje jako počet fází motoru. Většina krokových motorů je dvoufázová, přesto existují i tři a pětifázové motory. Motory lze rozdělit do dvou kategorií, a to bipolární a unipolární. Bipolární motor má vždy jedno vnutí na fázi a vedou z něj tedy 4 vodiče, jak je znázorněno na obrázku číslo 12 vlevo. Unipolární motor má dvě vnutí s vyvedeným středem, jak je znázorněno na obrázku číslo 12 vpravo. Vést z něj může buď 5 nebo 6 vodičů. Mezi představitele krokových motorů lze zařadit krokový motor s označením od výrobce 28BYJ-48 od firmy Kiatronics, který má krokový úhel 5,625 stupňů. To znamená, že při otočení o 360 stupňů by bylo zapotřebí 64 kroků, jelikož má motor převodovku v poměru 1:32 je zapotřebí 2048 kroků při otočení o 360 stupňů. Tento krokový motor je unipolární a má 5 vodičů. Krokový motor může být řízen postupným spínáním fází v různých režimech. (16)



Obrázek 12 - Rozdělení krokových motorů (16)

5.1 Čtyřtaktní řízení s magnetizací jedné fáze

Jedná se o nejjednodušší variantu řízení krokového motoru. Řízení spočívá v tom, že v jednom okamžiku je buzena pouze jedna fáze a rotor se natočí tak, aby jeho pólové nástavce byly naproti pólovým nástavcům právě buzené fáze a vzájemně tak zaujaly co nejmenší magnetický odpor. (17)

Krok	Fáze A	Fáze B	Fáze A	Fáze B
1				
2				
3				
4				

Tabulka 1 - Čtyřtaktní řízení s magnetizací jedné fáze

5.2 Čtyřtaktní řízení s magnetizací dvou fází

V tomto režimu jsou v každém kroku současně buzeny dvě sousední fáze. Klidová poloha rotoru se nachází přesně v polovině mezi dvěma buzenými fázemi. Statický vazební moment je v tomto případě asi 1,9krát větší, než při magnetizaci jedné fáze. (17)

Krok	Fáze A	Fáze B	Fáze A	Fáze B
1				
2				
3				
4				

Tabulka 2 - Čtyřtaktní řízení s magnetizací dvou fází

5.3 Osmitaktní řízení

Tento režim kombinuje dva předchozí způsoby. Výhodou je, že takzvaně půlí krok, čili počet kroků na jednu otáčku je při tomto způsobu řízení dvojnásobný. Nevýhodou je proměnný moment motoru. (17)

Krok	Fáze A	Fáze B	Fáze A	Fáze B
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Tabulka 3 - Osmitaktní řízení

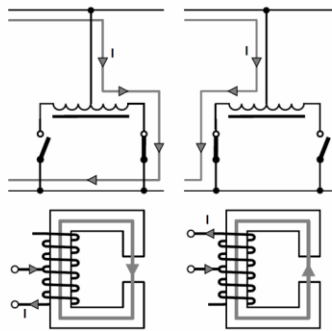
5.4 Mikrokrokování

Při využití mikrokrokování se proudy ve vinutích mění po malých krocích. V jednom vinutí proud roste a v druhém vinutí proud klesá, a tím se jeden krok rozdělí na mnoho menších, tzv. mikrokroků. Čím více je mikrokroků, tím se průběh proudu, protékajícího jednotlivými fázovými vynutími, více přibližuje ideálnímu sinusovému průběhu. Při tomto způsobu řízení se využívají všechna vynutí zároveň, i když nikoli s plným výkonem. Na trhu lze najít řídicí integrované jednotky, které umožňují rozdělit jeden celý krok až na 128 mikrokroků. Mikrokrokování umožňuje dosáhnout vysokých otáček při dobrém průběhu točivého momentu, ale nezvyšuje přesnost polohování. (17)

Řídicí obvod krokového motoru má dva hlavní úkoly. Prvním úkolem je měnit směr magnetického toku obvodem motoru změnou směru toku proudu vinutím. Za druhé omezit velikost proudu vinutím na bezpečnou velikost a zároveň zajistit co nejrychlejší nárůst proudu ve vinutí, aby bylo dosaženo co nejvyššího výkonu. Změny směru toku proudu je možno realizovat dvěma způsoby, a to unipolárním a bipolárním řízením. (17)

5.5 Unipolární řízení

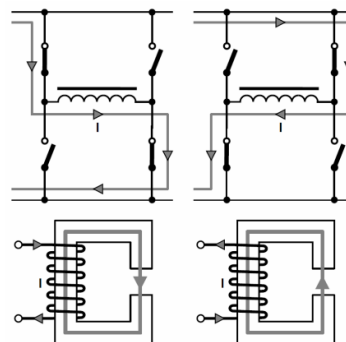
Pro tento způsob řízení je nutné každé fázové vinutí statoru krokového motoru rozdělit na dva segmenty a změny směru magnetického toku dosahovat střídavým spínáním. Protože poloviny vinutí jsou navinuty protisměrně, protéká proud každou polovinou opačným směrem, jak je vidět na obrázku číslo 13. Jak je z obrázku patrné je potřebné pro každou fázi mít dva spínací prvky zapojené na jednom konci vinutí. (17)



Obrázek 13 - Unipolární řízení krokových motorů (16)

5.6 Bipolární řízení

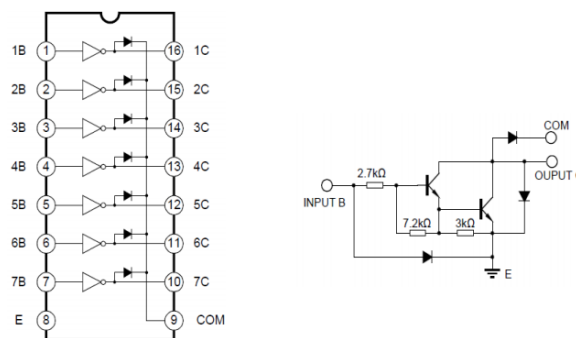
Každé fázové vinutí krokového motoru je zapojeno do úhlopříčky H-můstku. Podle toho, jaké jsou právě sepnuté spínače, dojde k přepólování a tím se mění směr toku elektrického proudu a následně směr magnetického toku ve statoru. Pro každou fázi je potřeba čtyři spínací prvky zapojené na obou koncích vinutí, jak je znázorněno na obrázku číslo 14. (17)



Obrázek 14 - Bipolární řízení krokových motorů (16)

5.7 Integrovaný obvod ULN2003

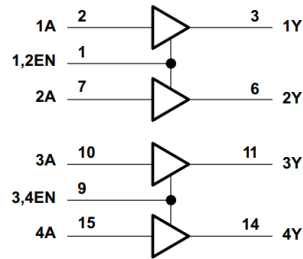
Tento integrovaný obvod je tvořen monolitickým vysoko napěťovým a proudovým darlingtonovým tranzistorovým polem, jak je vidět na obrázku číslo 15 vlevo. Obvod tvoří 7 NPN darlingtonových párů v provedení s otevřeným kolektorem. Pro činnost s TTL nebo 5V CMOS zařízením se používá odpor o velikosti $2,7\text{ k}\Omega$, který je připojený sériově do báze pro každý darlingtonový pár viz. obrázek číslo 15 vpravo. Každý kanál má jmenovitý proud 500mA , ve špičce může dosahovat až 600mA . Tento obvod lze využít například pro řízení krokových motorů případně osvětlení LED displeje. (18)



Obrázek 15 - Schéma zapojení ULN2003 (18)

5.8 Integrovaný obvod L293D

Obvod je tvořen dvěma H-můstky a je navržen pro obousměrné řízení motorů při proudu až 600mA při rozsahu napětí od $4,5\text{V}$ do 36V . Tento integrovaný obvod je navržen pro řízení zátěže induktivního charakteru, takže například relé, solenoid, stejnosměrný případně krokový motor. Na obrázku číslo 16 je vidět logický diagram L293D, z kterého je patrné, že vstupy 1A a 2A jsou povoleny pomocí vstupu 1,2EN. Vstupy 3A a 4A jsou povolené pomocí 3,4EN. Pokud bude na vstupech 1,2EN a 3,4EN logická jedna, tak jsou přidružené vstupy povoleny. Když je na vstupech 1,2EN a 3,4EN logická nula, tak jsou výstupy ve stavu vysoké impedance. (19)



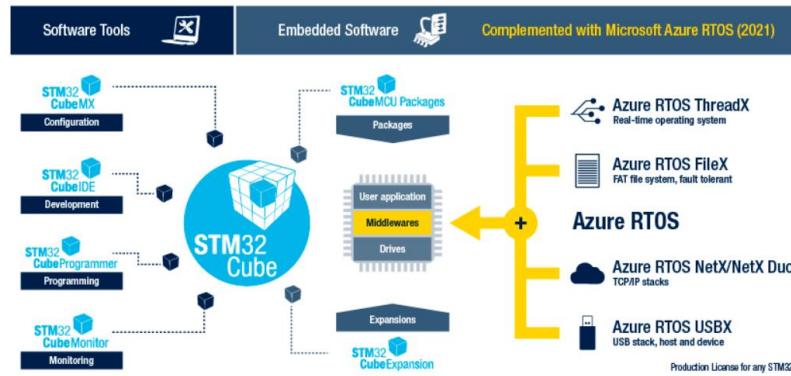
Obrázek 16 - Schéma zapojení L293D (19)

6. Software

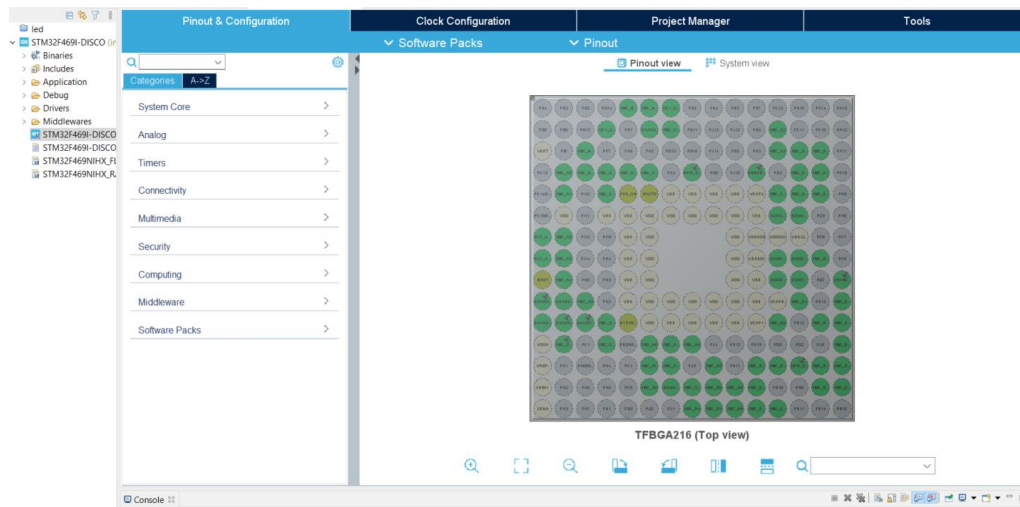
V následujících podkapitolách je popsán využitý software a to STM32CubeIDE, TouchGFX a operační systém FreeRTOS. Pro programování mikrokontrolérů řady STM32, lze využít také Atollic TrueStudio.

6.1 STM32CubeIDE

STM32CubeIDE je vývojové prostředí pro různé operační systémy. Jedná se o vývojovou platformu, která umožňuje programovat v jazycích C a C++. Mezi funkce patří generování kódu, kompilaci kódu a ladění pro mikrokontroléry a mikroprocesory STM32. Je založené na Eclipse/ CDT frameworku a umožňuje integraci stovek existujících pluginů. Je součástí tzv. softwarového ekosystému STM32Cube. Tento ekosystém se skládá ze 4 softwarových nástrojů, jak je znázorněno na obrázku číslo 17. STM32CubeIDE integruje funkce STM32 pro konfiguraci a vytváření projektů ze STM32CubeMX. Náhled na konfiguraci GPIO je vidět na obrázku číslo 18. Po vygenerování kódu, lze najít v kódu například *USER CODE BEGIN 0* a *USER CODE END 0* apod. je důležité psát mezi tyto vymezené prostory pro uživatelský kód, jelikož při opětovném generování kódu by došlo ke smazání. (20) (21)



Obrázek 17 - Rozdělení tzv. ekosystému STM32Cube (20)

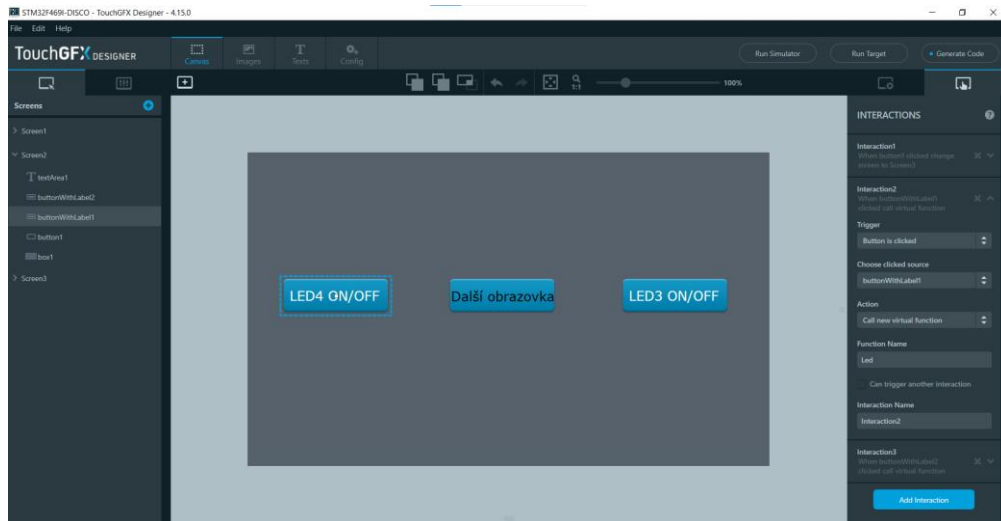


Obrázek 18 - Náhled na prostředí STM32CubeIDE

6.2 TouchGFX

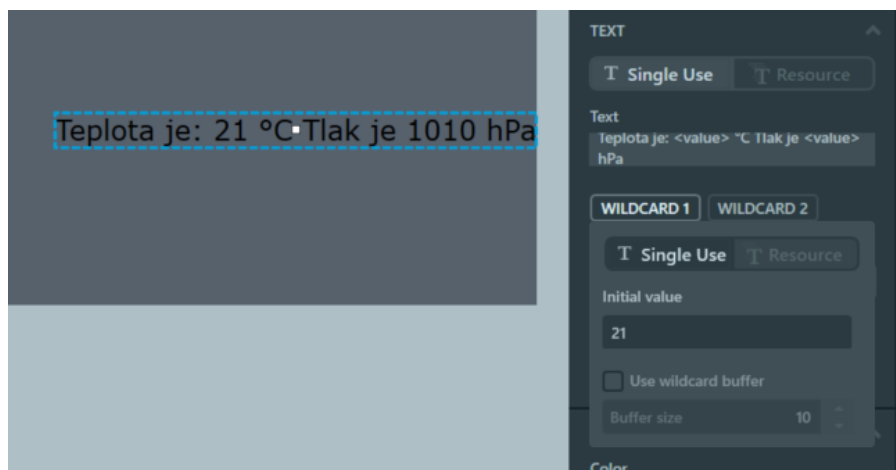
TouchGFX Designer je pokročilé grafické vývojové prostředí optimalizované pro mikrokontroléry STM32. Jedná se o rozšiřující plug-in pro vývojové prostředí STM32CubeIDE, který umožňuje vytvářet pokročilá grafická uživatelská rozhraní. Jeho základem je grafický designer, který na základě grafického návrhu generuje kód. Jednoduchý příklad je znázorněn na obrázku číslo 19. Jedná se o příklad, kde jsou pomocí tlačítek ovládány integrované led diody na vývojové desce od STMicroelectronics a změna obrazovky. Změna obrazovky je realizována přímo v prostředí TouchGFX, kde v interakcích se v akcích zvolí změna obrazovky a poté se vybere název obrazovky na kterou se má změnit náhled. Změna stavu led je realizována také v interakcích, kde v akcích je zvoleno zavolat novou virtuální

funkci, v další kolonce je zvolen název funkce, jak je vidět na obrázku číslo 19 v pravém sloupci. Samotná funkce je poté realizována již v prostředí STM32CubeIDE. (22)

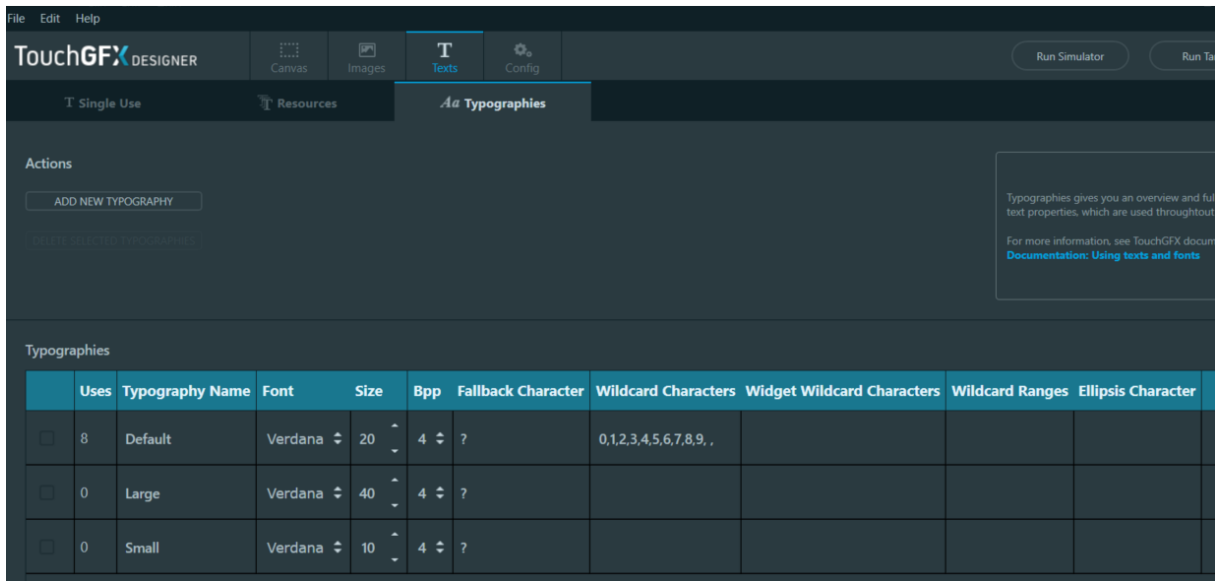


Obrázek 19 - Náhled na prostředí TouchGFX

Pro vypisování proměnných z STM32CubeIDE na obrazovku mikrokontroléru slouží v TouchGFX tzv. wildcards. Wildcards jsou součástí textarea, kde každá textarea může mít až 2 wildcards, jak je vidět na obrázku číslo 20. Lze také zvolit počáteční hodnotu. Důležité je také nastavit velikost bufferu a v nastavení vyplnit očekávané znaky, případně lze nastavit rozsah hodnot, jak je vidět na obrázku číslo 21.

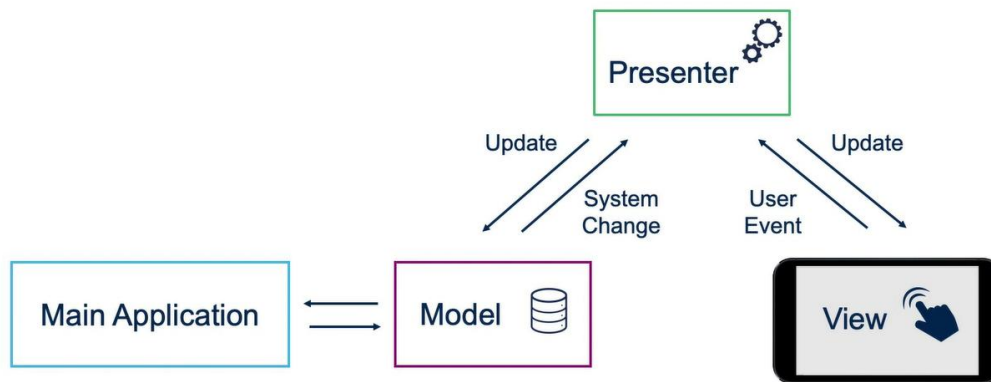


Obrázek 20 - Realizace tzv. wildcard v prostředí TouchGFX



Obrázek 21 - Definice očekávaných znaků v tzv. wildcard

Na následujícím obrázku číslo 22 je vidět architektura TouchGFX aplikace. Kde například při dotyku tlačítka chceme realizovat funkci, která je definována v hlavním programu je důležité dodržet následující strukturu. (22)



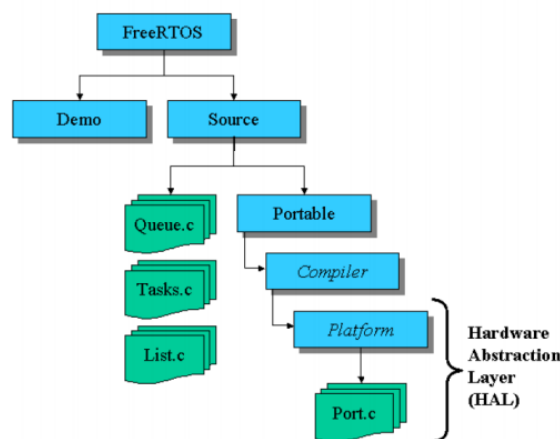
Obrázek 22 - Architektura TouchGFX (22)

6.3 Operační systém FreeRTOS

FreeRTOS je volně šiřitelný, otevřený operační systém reálného času, určený pro použití v embeded zařízeních. Projekt FreeRTOS založil Richard Barry. Cílem bylo poskytnout kvalitní, volně šiřitelný operační systém reálného času, který je snadno použitelný. Mezi hlavní cíle vývoje systému patří snadná použitelnost, robustnost a nízká paměťová náročnost.

Plánování úloh může být preemptivní, kooperativní, případně hybridní. Pro synchronizaci a komunikaci mezi úlohami lze použít fronty, semaforey, mutexy a rekurzivní mutexy. Další funkcí, kterou systém nabízí jsou efektivní softwarové časovače a příznaky událostí. Počet úloh a jejich možných priorit není softwarově omezen, je možné přiřadit více úlohám stejnou prioritu. V současné době je oficiálně podporováno 40 různých procesorových architektur. Od výrobce STMicroelectronics je podporována rodina mikrokontrolerů s jádru ARM Cortex-M0, Cortex-M3, Cortex-M4F, Cortex-M7, dále rodina STR7 založená na jádru ARM7 a rodina STR9 založená na jádru ARM9. Mezi další známé oficiálně podporované výrobce patří například Altera, Atmel, Microchip a Texas Instruments. (23)

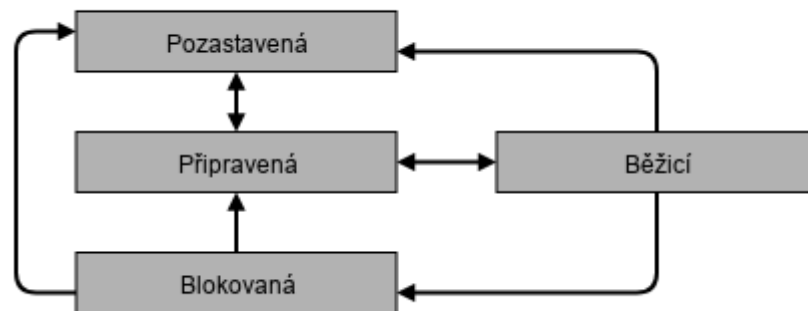
Operační systém FreeRTOS je distribuován ve formě zdrojových souborů. Součástí distribuce je kromě jádra systému a jeho volitelných součástí také velké množství demo aplikací pro podporované architektury a překladače. Adresová struktura je vidět na obrázku číslo 23. V adresáři source se nachází zdrojové soubory jádra systému včetně volitelných součástí. Jádro systému je reprezentováno pouze třemi zdrojovými soubory a to *queue.c*, *task.c* a *list.c*. Tyto soubory obsahují funkcionalitu pro správu úloh, front a seznamů. Mezi volitelné součásti systému patří *timers.c* pro funkci softwarových časovačů, *event_groups.c* pro příznaky událostí a *croutine.c* pro využití koprogramů. . (23) (24)



Obrázek 23 - Adresová struktura FreeRTOS (24)

Nejdůležitější funkcí systému FreeRTOS je správce úloh. Jednotlivé úlohy jsou spravovány pomocí řídicích bloků úloh tzv. *Task Control Block*. Tento blok obsahuje informace, které využívá jádro operačního systému. Úloha může nabývat jednoho ze čtyř stavů. Možnosti přechodů mezi jednotlivými stavy jsou zobrazeny na obrázku číslo 24. Běžící stav je stav, ve kterém se nachází aktuálně běžící úloha. V tomto stavu může být v jeden okamžik pouze jedna úloha. Nejčastěji se jedná o úlohu s největší prioritou. Běžící

stav může úloha opustit sama, anebo rozhodnutím plánovače, který také rozhoduje o spuštění úloh. Ve stavu připravená se může v jeden okamžik vyskytovat více úloh, která mají všechny požadované zdroje a pouze čekají na spuštění. Úlohy jsou seřazeny dle priority do seznamu a jsou postupně přesunuty do stavu běžící od nejvyšší priority. Stav blokována dostávají úlohy, které čekají na nějakou událost nebo zdroj. Událost může být časová nebo externí. Zdrojem mohou být fronty a semaforey. Ve stavu blokována může být úloha pouze určitou dobu. Posledním stav je stav pozastavená, do tohoto stavu se může úloha dostat pouze zavoláním příslušné funkce aplikačního rozhraní. Pro tento stav není možné určit časový limit. (23) (24)

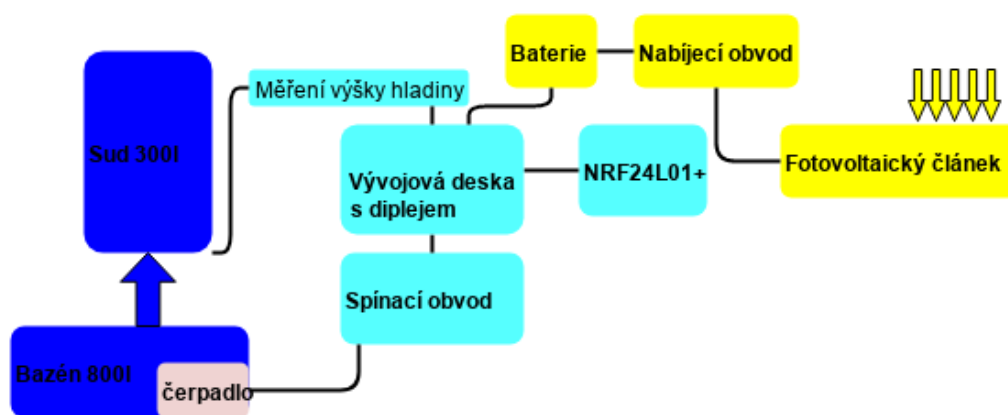


Obrázek 24 – Možné stavy úloh a přechody mezi jednotlivými stavy

Fronty jsou hlavním prostředkem komunikace mezi úlohami a jsou realizovány paměť typu FIFO tedy First-in-First out. Fronta je charakterizována dvěma parametry. Jedním parametrem je velikost dat a druhým je délka fronty. Prvním způsobem synchronizace jsou binární semaforey. Binární semafor je fronta s délkou jedna a lze do něj uložit pouze jeden prvek. Semafor je buď prázdný nebo plný. Další možností jsou čítací semaforey, kde jejich délka je větší než jedna. Čítací semaforey tedy mohou být přečteny vícekrát na rozdíl od binárních semaforů. Další možností jsou mutexy, ty lze využít k řešení vzájemného vyloučení a obvykle slouží ke hlídání přístupu k nějakému zdroji. V podstatě se jedná o binární semaforey s takovým rozdílem, že mutexy využívají mechanismus dědění priorit. Tento mechanismus zajišťuje, že úloha s největší prioritou je blokována po co nejkratší dobu. (23) (24)

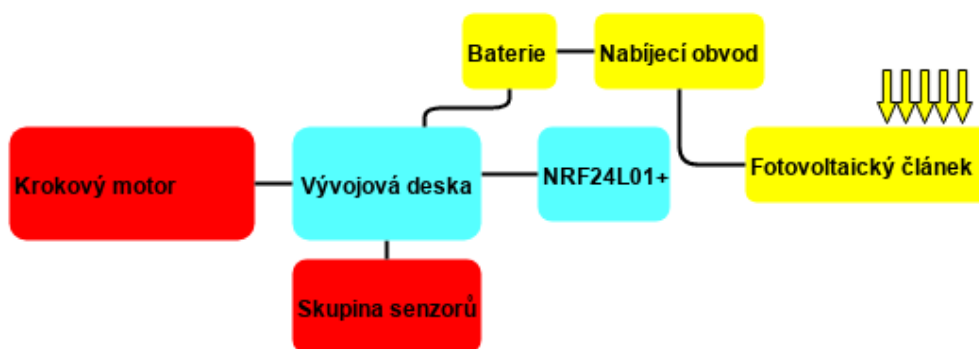
7. Navržená koncepce

Navržená koncepce je navržena tak aby splňovala nejmodernější standardy. Jedná se hlavně o maximální využití dešťové vody a její efektivní využití. Proto bylo zvoleno využití kapkové závlahy. Systém byl navržen tak aby byl schopný pracovat automaticky bez nutnosti zásahu uživatele. Při navrhování byl brán zřetel na rozložení zahrady. Záhon má plochu 25 m² a 3 metry od záhonu se nachází přístřešek o ploše 35 m². Voda z přístřešku je svedena do kovové nádoby o objemu 800 litrů. Kovová nádoba se nachází ve stejné výškové úrovni jako záhon. Proto, aby nebylo nutné při každém zalévání spínat čerpadlo, bylo navrženo umístění sudu o objemu 300 litrů ve výšce 1,5 metru nad úrovní záhonu. Ze sudu poté poteče voda samospádem bez nutnosti spínání čerpadla. Voda bude do sudu čerpána z kovové nádoby. Koncepce je rozdělena na řídicí jednotku a několik snímacích jednotek. Úkolem řídicí jednotky je hlídání stavu hladiny vody v sudu a její případné dočerpávání, dále shromažďování informací od snímacích jednotek a jejich předání uživateli pomocí displeje. Poslední funkcí je možnost spínání závlahy jednotlivých okruhů na základě rozhodnutí uživatele, případně změna mezi pro spínání automatické závlahy. Na obrázku číslo 25 je vidět blokové schéma řídicí jednotky. V budoucnosti je uvažováno o napájení ze solárního panelu. Pro přenos dat mezi řídicí jednotkou a snímacími jednotkami byly zvoleny moduly NRF24L01+. Tyto moduly byly zvoleny z důvodu nízké spotřeby oproti Bluetooth a Wi-Fi. Jako vývojová deska pro řídicí jednotku byla zvolena deska od firmy STMicroelectronics typ F469 Discovery. Důvodem této volby byl již integrovaný dotykový display a možnost připojení rozšiřujících modulů pomocí IIC a SPI sběrnice. Pro programování mikrokontrolerů je využito vývojové prostředí STM32CubeIDE a pro vývoj grafického rozhraní řídicí jednotky je využito prostředí TouchGFX.



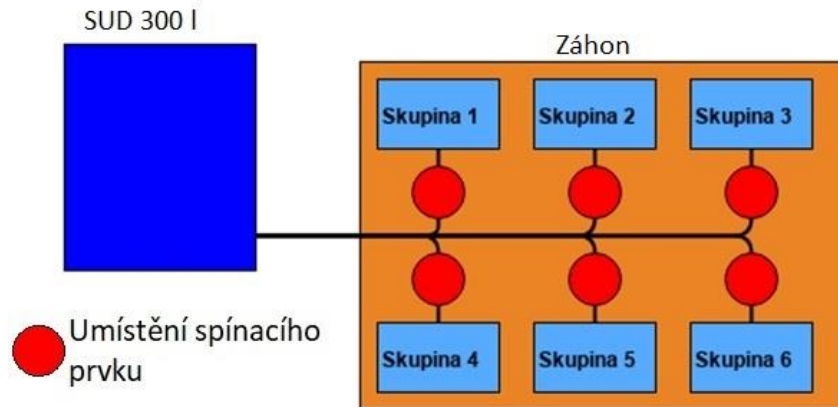
Obrázek 25 - Navržená koncepce řídicí jednotky

Cílem snímací jednotky je snímat půdní vlhkost u jednotlivých rostlin, přenášet tyto informace do řídicí jednotky, indikace vadného senzoru a spínat svůj okruh. Jako vývojová deska byla zvolena deska také od firmy STMicroelectronics typ L432KC. Důvodem této volby je velmi malá spotřeba, přítomnost IIC a SPI sběrnice a možnost připojení až 10 senzorů využívající AD převodník. Blokové schéma snímací jednotky je na obrázku číslo 26. Krokový motor slouží k otevření, respektive uzavření přítoku vody do jednotlivých okruhů.



Obrázek 26 – Navržená koncepce snímací jednotky

Záhon je rozdělen na jednotlivé skupiny, kde každý druh zeleniny je jedna skupina. Na následujícím obrázku číslo 27 je vidět rozdělení do jednotlivých okruhů. Červený kruh označuje umístění spínacího prvku pro umožnění průtoku vody. Každá skupina bude mít právě jednu snímací jednotku.

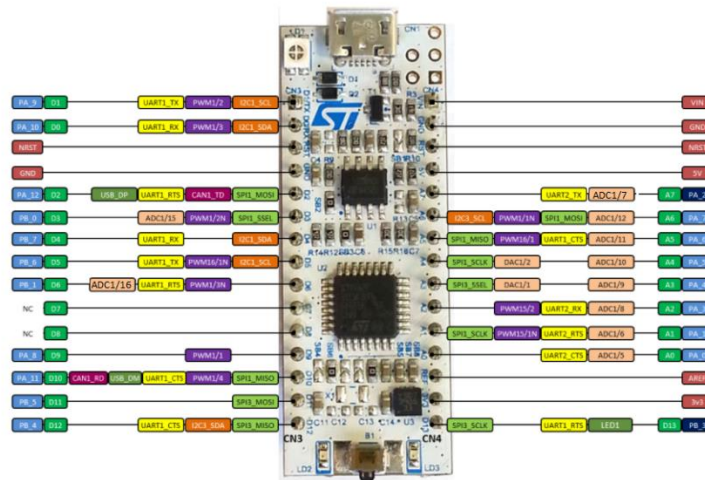


Obrázek 27 - Rozdělení do jednotlivých okruhů

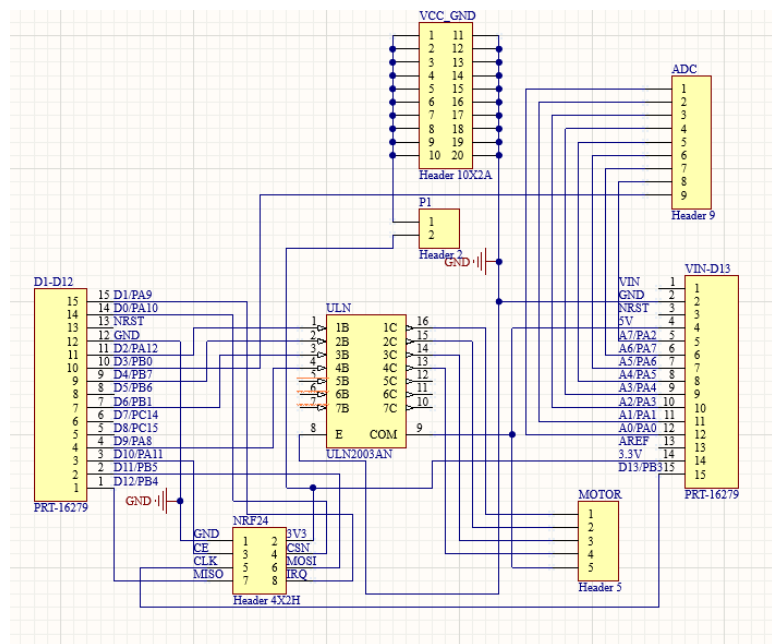
7.1 Řešení snímací jednotky

Jako snímací jednotka je využita vývojová deska od STMicroelectronics typ STM32L432KC. Výhodou této desky je velmi malá spotřeba. Byla navržena deska plošného spoje, jejíž schéma zapojení lze vidět na obrázku číslo 29. Pro návrh desky plošného spoje byl využit software Altium verze 2020. Vývojová deska umožňuje připojení až 10 kanálů na AD převodník. Reálně je využito 9 kanálů, z důvodu že pin na který ve vyveden poslední kanál AD převodníku je využit k ovládání krokového motoru. Jedná se o pin PB1, který je využit pro řízení krokového motoru jako IN3. Kanály AD převodníku jsou vyvedeny na header s označením ADC. Napájení senzorů je realizováno headerem VCC_GND, tento header má 2krát 10 pinů. Dva piny jsou navíc proto, aby bylo možné případné připojení externího zdroje napájení. Pro odpojení napájení z desky slouží header P1. Napájení senzorů je 3,3 V. Pro řízení krokového motoru je využito ULN2003AN a jako krokový motor byl zvolen motor s označením 28-BYJ-48. Napájení ULN2003AN a krokového motoru je 5 V. Pro bezdrátovou komunikaci jsou využity moduly NRF24L01+, které jsou připojené k mikrokontroléru na sběrnici SPI3. Jak lze vidět na obrázku číslo 28 při využití SPI1 by byli omezené kanály číslo 6,11 a 12 u AD převodníku. Moduly NRF24L01+ mají integrovaný signálový vodič, který je aktivní v nule a je přivedený na PA9. Interrupt lze vyvolat třemi způsoby: odesláním dat, přijmutím dat a neúspěšným přenosem. V registru 0x00 lze konfigurovat interrapy, jak je uvedeno v příloze číslo A. Zde budou využity, interrupty způsobené přijmutím dat a neúspěšným přenosem. Jelikož mikrokontrolér bude v režimu sleep. Tento interrupt bude mít za následek probuzení mikrokontroléru a zpracování pokynů od řídicí jednotky. Pravidelné

buzení mikrokontroléru pro změření vlhkosti půdy bude realizováno pomocí RTC. Po změření půjde opět do sleep režimu. V příloze je vidět 3D pohled na navrženou desku plošného spoje.



Obrázek 28 - Popis pinů STM32L432KC (25)



Obrázek 29 - Schéma zapojení snímací jednotky

Na následujícím obrázku číslo 30 lze vidět kód, který realizuje čtení analogových hodnot osmého kanálu a jejich převod na číselnou hodnotu. Využit je 8bitový převodník, takže na výstupu lze očekávat číselné hodnoty v rozsahu 0 až 255. Na snímací jednotce bude z hodnot všech senzorů udělán aritmetický průměr. Pokud hodnota nějakého senzoru bude odlišná od průměru o více, jak 20% bude indikována chyba. Tato chyba může být způsobena vadným

senzorem, případně ucpaným odkapávačem u dané rostliny. Pro informaci o chybě je vynechán jeden bajt z payload modulů NRF24L01+.

```
sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_8; //nastavení kanálu 8
HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig);
HAL_ADC_Start(&hadc1); //zapnutí AD převodníku
if (HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 5) == HAL_OK) // pokud proběhlo v pořádku ulož hodnotu |
{
    datas = HAL_ADC_GetValue(&hadc1); // ulož hodnotu do proměnné
}
```

Obrázek 30 - Softwarová realizace AD převodníku

Na obrázku číslo 31 lze vidět softwarovou realizaci takzvaného *Wave drive* řízení krokového motoru. Toto řízení spočívá v tom, že v jednom okamžiku je buzena pouze jedna fáze. Pro otočení o 360 stupňů je třeba 2048 kroků. Jednotlivé GPIO jsou postupně spínány. Na konci za for cyklem je vyresetováno poslední GPIO. Pro ventil s pingpongovým míčkem je třeba otočit o 90 stupňů, takže místo hodnoty 512 ve for cyklu by bylo 128. U verze se šroubem je potřeba 4 otočení o 360 stupňů, takže ve for cyklu by byla hodnota 2048. Otočení na druhou stranu je realizováno opačným spínáním GPIO.

```
for (int i = 0; i < 512; i++)
{
    HAL_GPIO_WritePin(IN1_GPIO_Port, IN1_Pin, GPIO_PIN_SET);
    HAL_GPIO_WritePin(IN2_GPIO_Port, IN2_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(IN3_GPIO_Port, IN3_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(IN4_GPIO_Port, IN4_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_Delay(2);
    HAL_GPIO_WritePin(IN1_GPIO_Port, IN1_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(IN2_GPIO_Port, IN2_Pin, GPIO_PIN_SET);
    HAL_GPIO_WritePin(IN3_GPIO_Port, IN3_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(IN4_GPIO_Port, IN4_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_Delay(2);
    HAL_GPIO_WritePin(IN1_GPIO_Port, IN1_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(IN2_GPIO_Port, IN2_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(IN3_GPIO_Port, IN3_Pin, GPIO_PIN_SET);
    HAL_GPIO_WritePin(IN4_GPIO_Port, IN4_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_Delay(2);
    HAL_GPIO_WritePin(IN1_GPIO_Port, IN1_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(IN2_GPIO_Port, IN2_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(IN3_GPIO_Port, IN3_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(IN4_GPIO_Port, IN4_Pin, GPIO_PIN_SET);
    HAL_Delay(2);
}
HAL_GPIO_WritePin(IN4_GPIO_Port, IN4_Pin, GPIO_PIN_RESET);
```

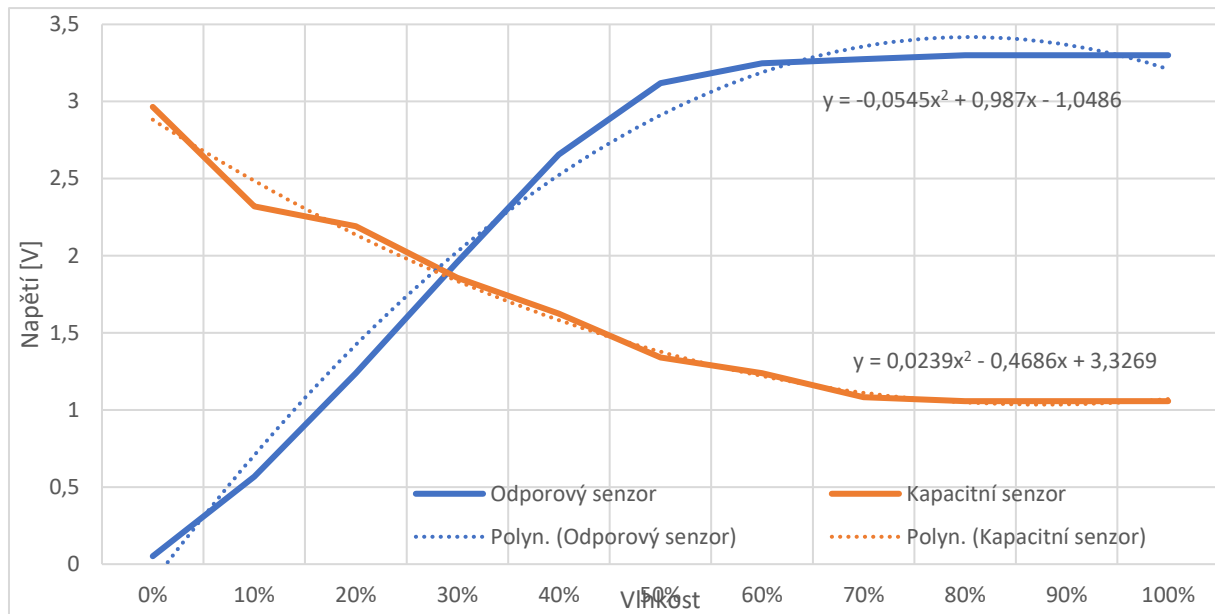
Obrázek 31 - Softwarová realizace otáčení krokového motoru o 360 stupňů

7.1.1 Porovnání odporového a kapacitního senzoru

Toto měření probíhalo v laboratorních podmínkách při teplotě 21 °C, kde byl odejmut vzorek půdy ze záhonu. Vzorek byl vysušen dle gravimetrické metody. Poté bylo odváženo 250 gramů vysušené zeminy. Pro měření byly využity senzory popsané v kapitolách 2.2 a 2.3. Byly změřeny hodnoty pomocí obou senzorů pro 0% vlhkost. Pro změření 10% vlhkosti bylo přidáno 25 gramů vody. Vzorek byl řádně promíchán a poté změřeny hodnoty pro oba typy senzorů. Takto měření pokračovalo až do vlhkosti 100% tedy celkové váhy 500g z toho 250g zeminy a 250g vody. Napájení senzorů bylo 3,3V. Využita byla deska STM32L432KC a zvolený převodník byl 8bitový. Po přepočtení výsledků měření na napětí vyšel následující obrázek číslo 32. Z grafu vyplývá, že největší citlivosti je dosaženo u vodivostního senzoru mezi 0% až 50% vlhkostí. U kapacitního senzoru je citlivost až do 70%. Přepočet probíhal dle následujícího vzorce číslo 3. Dále je patrné, že u vodivostního senzoru vlivem rostoucí vlhkosti půdy roste elektrický proud a tím pádem napětí na odporu. U druhého senzoru vlivem rostoucí vlhkosti roste permitivita a tím se mění frekvence oscilace na časovači 555, kde tato frekvence je převedena na napětí.

U výsledných grafů byla vytvořena spojnice trendu pomocí polynomu druhého řádu. Pomocí polynomu bude probíhat přepočet na vlhkost. U odporového senzoru při napětí větším než 3,2 V bude indikována vlhkost 100%

$$U = \text{číselná hodnota} * \frac{\text{počet bitů převodníku}}{U_{ref}} \quad (3)$$



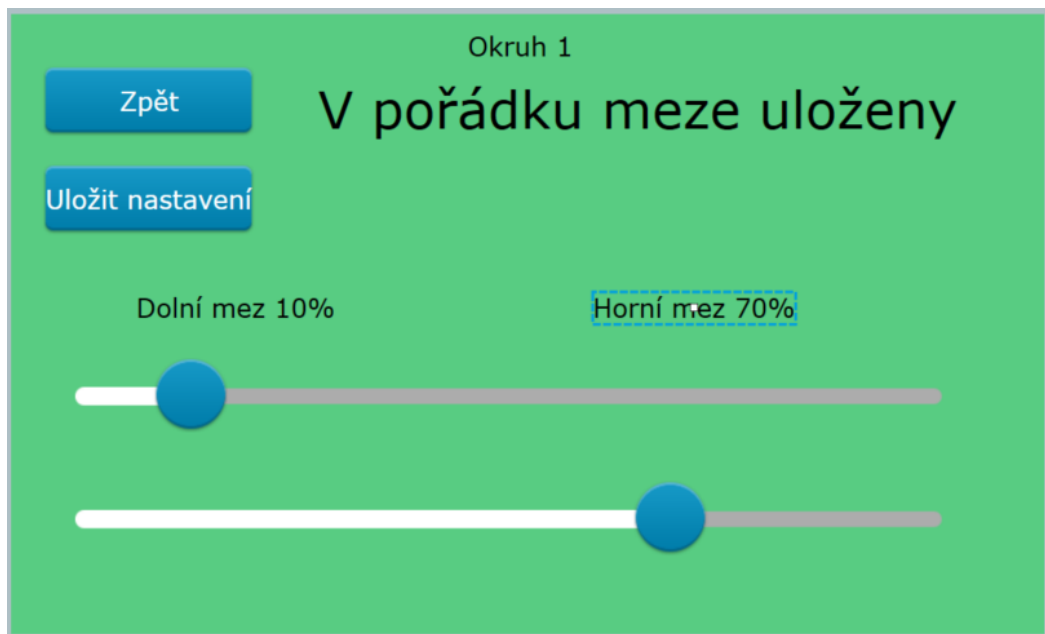
Obrázek 32 - Graf porovnání odporového a kapacitního senzoru

7.2 Řešení řídicí jednotky

Jako řídicí deska je zvolena deska od STMicroelectronics typ STM32F469. Hlavním úkolem řídicí jednotky je shromažďování informací od snímacích jednotek a jejich snadná interpretace uživateli, dále dočerpávání vody a hlídání stavu hladiny. Pro vývoj grafického rozhraní bylo využito TouchGFX. Na obrázku číslo 33 lze vidět návrh grafického rozhraní hlavního menu. V horním levém rohu je umístěná informace o aktuálním stavu hladiny vody. Další informace jsou aktuální teplota a tlak vzduchu. Červená barva pod jednotlivými okruhy signalizuje vypnutí případné zapnutí daného okruhu, takže na obrázku je vidět, že okruh 6 zrovna zavlažuje. Tlačítka ZAP/VYP umožňují zapnutí závlahy jednotlivých okruhů dle uvážení uživatele. Zmáčknutím tlačítka *změna meze* se vstoupí do podmenu daného okruhu. Zde pak lze měnit meze pro automatickou závlahu každého okruhu. Podmenu lze vidět na obrázku číslo 34. Nejdříve bylo uvažováno o využití klávesnice pro zadání číselné hodnoty. Pro jednoduchost jsou využity dva slidery v rozmezí 0 až 10 s inkrementem 1. Hodnota je později vynásobena 10 a interpretována jako vlhkost 0% až 100%. Hlavní menu obsahuje ještě podmenu chyby. Zde budou informace od snímacích jednotek o případné chybě nějakého ze senzorů a od řídicí jednotky v případě nefunkčnosti dočerpávání vody, kde chyba může být způsobena, tím že došla voda v kovové nádobě nebo rozbitím čerpadla.



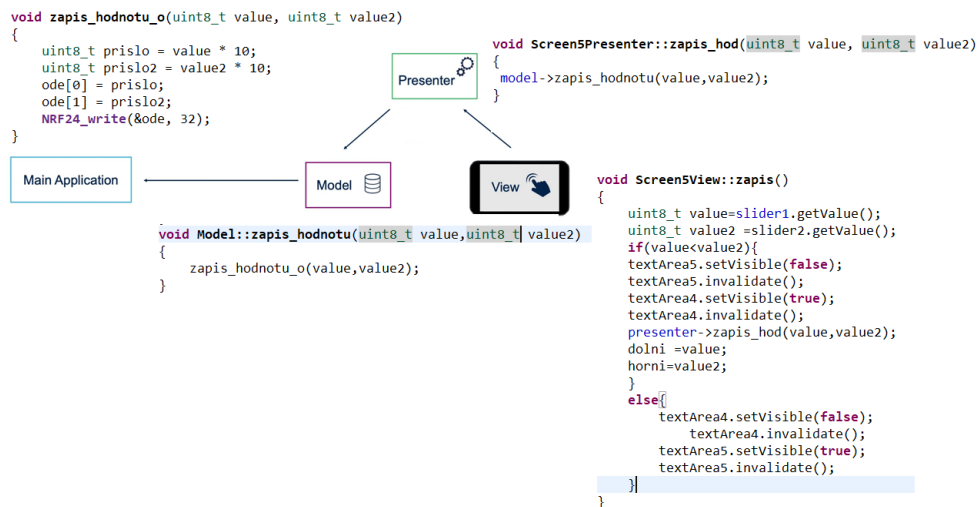
Obrázek 33 - Náhled na hlavní menu řídicí jednotky



Obrázek 34 - Náhled na podmenu okruhu 1

Tlačítko uložit nastavení vyvolá funkci `zapis()`. Tato funkce přečte hodnoty sliderů, uloží je do proměnných `value` a `value2` a dále je porovná, zda dolní mez je menší než horní mez. Tímto se zamezuje špatnému zadání mezí. Pokud jsou meze zadány špatně je vypsáno chybové hlášení, které obsahuje `textarea5`. Když jsou meze zadány správně jsou hodnoty sliderů uloženy do globálních proměnných `dolni` a `horni` v rámci `ScreenView5.cpp`. Následně je vypsáno hlášení o správném zadání mezí, které obsahuje `textarea4` a je zavolána funkce `zapis_hod(uint8_t`

value, uint8_t value2). Tato funkce je deklarována v *ScreenPresenter5.cpp* a vykoná pouze spouštění funkce *zapis_hodnotu(uint8_t value, uint8_t value2)*, která je deklarována v modelu. Funkce opět jen zavolá funkci *zapis_hodnotu_o(uint8_t value, uint8_t value2)*, která je již deklarována v hlavním programu neboli *main.c*. Hodnoty jsou ještě před odesláním vynásobeny 10 a uloženy do pole. Poté jsou odeslány do snímací jednotky. Grafické pořadí volání funkcí lze vidět na obrázku 35.



Obrázek 35 - Softwarová realizace odeslání změny mezi

Na obrázku číslo 36 lze vidět pohled na desku F469 a popis jejích pinů. Na obrázku číslo 37 lze vidět schéma zapojení. Pro komunikaci s moduly NRF24L01+ je zde využita sběrnice SPI2. Pro měření teploty a tlaku vzduchu je využit modul BMP280. Ten je připojený na sběrnici I2C1 a napájení je 3,3V. Dále je zde připojený ultrazvukový senzor vzdálenosti HC-SR05, který je napojený na napětí 5V a pin TRIG je připojený na PG13 a pin ECHO na PG14. Posledním připojeným modulem je modul pro spínání čerpadla. Pro spínání čerpadla je využito 5V relé, jako vstup má PA1. Relé má maximální napětí 250V a proud 10A. Což umožňuje spínat zvolené čerpadlo, které má výkon 800W.


```

void StartTask02(void *argument)
{
  /* USER CODE BEGIN StartTask02 */
  /* Infinite loop */
  for (;;)
  {
    HAL_GPIO_WritePin(Trig_GPIO_Port, Trig_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    usDelay(3);
    HAL_GPIO_WritePin(Trig_GPIO_Port, Trig_Pin, GPIO_PIN_SET);
    usDelay(10);
    HAL_GPIO_WritePin(Trig_GPIO_Port, Trig_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    usDelay(3);
    while(HAL_GPIO_ReadPin(Echo_GPIO_Port, Echo_Pin)==GPIO_PIN_RESET);
    numTicks=0;
    while(HAL_GPIO_ReadPin(Echo_GPIO_Port, Echo_Pin)==GPIO_PIN_SET);
    {
      numTicks++;
      usDelay(2);
    }
    vzdalenost = (numTicks + 0.0f)*2.8*rychlostzvuku;
    xQueueSend(zprava1, &vzdalenost, 0);
    while (!bmp280_read_float(&bmp280, &temperature, &pressure)) {
      HAL_Delay(10);
    }
    xQueueSend(zprava2, &temperature, 0);
    xQueueSend(zprava3, &pressure, 0);
    osDelay(10000);
  }
}

```

Obrázek 38 - Softwarová realizace měření teploty, tlaku a výšky hladiny

7.2.1 Měření pomocí ultrazvukového měřiče stavu hladiny vody

Nejdříve bylo uvažováno místo ultrazvukového měřiče vzdálenosti využití tlakového senzoru, který by byl umístěn na dno nádoby. Jelikož cena tlakových senzorů se pohybuje v řádu tisíců až desetitisíců korun, bylo od této úvahy ustoupeno. Jako ultrazvukový měřič vzdálenosti byl využit senzor HC-SR05. Výrobce uvádí, že rozsah měření je od 2 cm do 450 cm. Výška sudu je 86 cm a senzor bude umístěný 14 cm nad maximální výškou hladiny vody, z toho plyne že bude potřeba měřit v rozsahu 14 cm až 100 cm. Senzor by proměřen v rozsahu 10 cm až 150 cm jak je vidět v tabulce 4. Toto měření probíhalo ve venkovních prostorech a vzdálenost byla měřena vůči zdi. V prvním sloupci tabulky je vidět hodnota naměřená metrem. V druhém sloupci je vidět výsledná hodnota senzoru a ve třetím sloupci je vidět rozdíl hodnot. Je vidět že u hodnoty 150 cm činí již 24,1 cm, a proto byla zavedena korekce 1,2, kde korekci je vynásoben výsledek senzoru. V posledním sloupci tabulky je vidět, že díky korekci je dosaženo přesnějších výsledků.

Vzdálenost [cm]	HY-SRF5 [cm]	Rozdíl [cm]	Korekce 1,2 [cm]	Rozdíl po korekci [cm]
10,00	9,00	-1,00	10,80	0,80
20,00	17,00	-3,00	20,40	0,40
30,00	26,40	-3,60	31,68	1,68
40,00	34,00	-6,00	40,80	0,80
50,00	43,80	-6,20	52,56	2,56
60,00	52,70	-7,30	63,24	3,24
70,00	58,70	-11,30	70,44	0,44
80,00	67,60	-12,40	81,12	1,12
90,00	76,80	-13,20	92,16	2,16
100,00	84,20	-15,80	101,04	1,04
110,00	91,60	-18,40	109,92	-0,08
120,00	100,50	-19,50	120,60	0,60
130,00	109,20	-20,80	131,04	1,04
140,00	116,50	-23,50	139,80	-0,20
150,00	125,90	-24,10	151,08	1,08

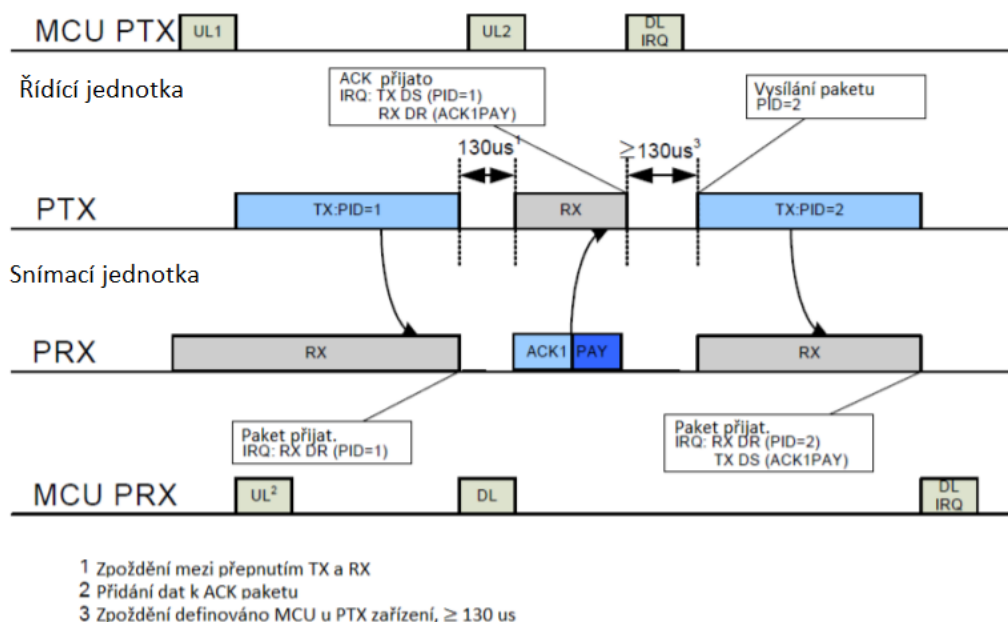
Tabulka 4 - Výsledky měření pomocí ultrazvukového měřiče vzdálenosti

Měření probíhalo také přímo v sudu, kde se projevila nevýhoda ultrazvukových senzorů. Jako nevýhoda jsou myšleny špatné odrazy od hladiny, případně odrazy od stěn. Odrazům od stěn bylo zamezeno umístěním senzoru na střed nádoby. Voda v sudu by měla být klidná, kromě stavu při dočerpávání vody, proto tato metoda nebude využita jako spolehlivá při dočerpávání vody. Místo toho bylo změřeno, že doba pro napuštění prázdného sudu je 2 minuty a 24 sekund. Pomocí měření času bude dočerpávána voda do sudu. Po každém dočerpání bude přestávka na uklidnění stavu hladiny vody a poté bude změřena hladina. Pokud by byla hladina na méně než 80% tak došlo k chybě. Chybou je myšleno to, že zřejmě došla voda v kovové nádobě, případně se rozbilo čerpadlo nebo praskla hadice. Tato chyba je indikována v chybovém podmenu. Čerpadlo má vlastní ochranu proti tomu, aby se vypnulo při nedostatku vody.

7.3 Konfigurace modulů pro přenos dat NRF24L01+

Pro programování těchto modulů jsou využity knihovny *MY_NRF24.h* a *nrf24l01.h*. Moduly jsou nakonfigurovány tak, že v počáteční konfiguraci je řídicí jednotka v režimu vysílač a snímací jednotky jsou v režimu přijímač. Pro dosažení maximální spolehlivosti a dosahu je pro komunikaci zvolena rychlost 250 kbps, vysílací výkon 0 dBm a automatické potvrzování paketů. Řídicí jednotka odešle paket a přepne se do přijímacího módu a čeká na potvrzení přijmutí. Snímací jednotka zkontroluje, zda má shodnou adresu paketu s adresou pro

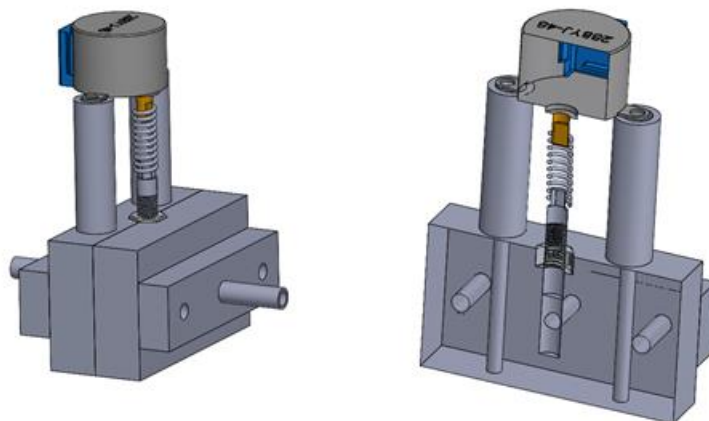
příjem a provede se kontrola dat. Pokud jsou data v pořádku odešle se potvrzení o přijetí dat. V rámci potvrzení paketu je možné odeslat data ze snímací jednotky do řídicí jednotky a to až 32 bajtů. Po přijetí se řídicí jednotka opět přepne do vysílacího režimu. Průběh je znázorněný na obrázku číslo 39. Změřený dosah při této konfiguraci je až 40 metrů.



Obrázek 39 - Přenos paketu s potvrzením obsahující datové bajty (27)

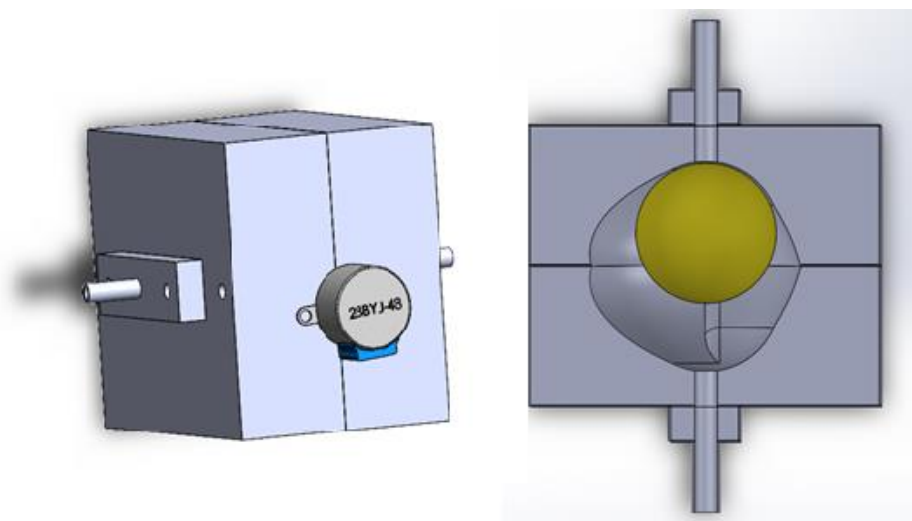
7.4 Řešení navrženého ventilu

Bohužel na trhu nelze koupit ventil, který by měl vstup a výstup na 6 mm hadici. Proto bylo nutné navrhnout ventil a vytisknout ho na 3D tiskárně. Pro ovládání zapínání je využit krokový motor. Pro navržení ventilu byl využit program Solidworks verze 2020. Byli navrženy dva druhy ventilů. První ventil funguje na principu, že do dráhy vody je zašroubován šroub a tím je zamezen její průtok. Zašroubování šroubu je realizováno otáčením krokového motoru. Mezi šroub a hřídel krokového motoru je umístěna pružina. Tento ventil je vidět na obrázku číslo 40. Jelikož na 3D tiskárně nelze tisknout libovolný tvar, bylo nutné rozdělit ventil na 4 díly.



Obrázek 40 - Ventil se šroubem

Druhý ventil se také skládá ze 4 dílů. Zde krokový motor otáčí celým modelem. Na obrázku číslo 41 je vidět zavřený stav, kdy do trasy vody je díky vztlakové síle umístěn míček. Jako míček je využit míček na ping-pong o průměru 40 mm. Pro otevření je otočeno s modelem o 90 stupňů ve směru hodinových ručiček. Míček se tímto pootočením přesune a umožní se tak průtoku vody.



Obrázek 41 – Ventil s ping-pongovým míčkem

Oba ventily byly vyzkoušeny, aby se ověřila jejich funkčnost. Změřený průtok při plném sudu je 510 ml/min. Pro otevřené ventily byl změřený stejný průtok, takže nedochází k omezení průtoku vody při otevřeném stavu. Při zavřeném stavu byl u verze s ping-pongovým míčkem změřený průtok 30 ml/min. U verze se šroubem byl výsledek horší, kde při uzavřeném stavu je průtok 100 ml/min. Zde značná část vody protéká závitem, ale především okolo šroubu. Pro zmírnění průtoku vody je nutné ještě mechanické opracování například silikonem.

7.5 Cenová rozvaha navržené koncepce

V následující tabulce číslo 5 je cenová rozvaha navržené koncepce bez uvažovaného solárního napájení. Pro zalévání je využita kapková závlaha. Bohužel v České republice se cena kapkové závlahy pohybuje vysoko, proto byla objednána z ciziny, kde cena byla 730 Kč za 50 metrů 6mm hadice, 60 x odbočka typu T, 60 x odkapávač a redukce rychlospojky typu ½ na hadici 6 mm. Z tabulky číslo 5 je patrné, že celková cena navržené koncepce dosahuje ceny 5929 Kč. Jedná se o koncepci s jednou snímací jednotkou, která má jeden odporový senzor a jeden kapacitní senzor. Značnou část ceny tvoří pořizovací cena čerpadla a řídicí vývojové desky. Případné rozšíření o další snímací jednotku není již tolik nákladné. Cena základní závlahy využívající časovač se pohybuje již od 400 Kč. Je ale nutné brát zřetel na to, že se náklady na navrženou koncepci v budoucnu vrátí díky efektivnímu využití a úspoře vody.

Náklady na řídicí jednotku		Náklady na řídicí jednotku	
Součást	Cena	Součást	Cena
STM32F469	1866 Kč	STM32L432KC	316 Kč
BMP280	63 Kč	Kapacitní senzor	128 Kč
NRF24L01+	48 Kč	Odporový senzor	33 Kč
HC-SR05	55 Kč	Krokový motor	58 Kč
Relé	45 Kč	Deska plošného spoje	100 Kč
Čerpadlo	1790 Kč	NR24L01+	48 Kč
Sud 300 l	599 Kč	Ventil	50 Kč
Celkem	4 466 Kč	Celkem	733 Kč
Kapková závlaha		730 Kč	
Dohromady 5929 Kč			

Tabulka 5 - Cenová rozvaha navržené koncepce

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout koncepci inteligentního závlahového systému. Byl realizován prototyp navrženého systému. V rámci řešení práce byly navrženy dva druhy ventilů pro spínání vody, u kterých byla ověřena jejich funkčnost, kde lepší z ventilů je schopen snížit průtok vody až o 94 %. Dále byla navržena deska plošného spoje pro snímací jednotku, která slouží k řízení krokového motoru, připojení senzorů a modulů pro bezdrátový přenos dat. Podařilo se realizovat měření výšky hladiny vody v nádobě, řešení dočerpávání vody a případná indikace chybového stavu. Je hotový přenos dat mezi snímací a řídicí jednotkou, kde vlhkost je vypisována na display. Systém primárně pracuje v automatickém režimu, to znamená, že udržuje vlhkost půdy v zadaných mezích. Systém dále umožňuje ručně spínat závlahu daného okruhu i měnit meze pro automatickou závlahu. Díky dostupnosti připojení k elektrické síti nebylo nutné řešit přechod do low-power režimů. Pro univerzálnější řešení by bylo vhodné vyřešit napájení například pomocí solárních panelů, v tom případě by vznikla potřeba co nejvíce snížit spotřebu celého systému. Navržená koncepce byla vyzkoušena pro řídicí jednotku a jednu snímací jednotku.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Odkapávač u kapkové závlahy	12
Obrázek 2 - Rozdělení metod pro měření půdní vlhkosti	13
Obrázek 3 - Odporový senzor vlhkosti půdy	14
Obrázek 4 - Kapacitní senzor vlhkosti půdy	15
Obrázek 5 - Vnitřní schéma kapacitního senzoru pro měření půdní vlhkosti	16
Obrázek 6 - Modulace signálu GFSK	17
Obrázek 7 - Popis pinů NRF24L01+	18
Obrázek 8 - Složení paketu NRF24L01+	19
Obrázek 9 - Rozdělení metod pro měření hladiny vody	19
Obrázek 10 - Princip ultrazvukového měření hladiny vody	20
Obrázek 11 - Limitní měření hladiny pomocí ultrazvukového snímače	21
Obrázek 12 - Rozdělení krokových motorů	22
Obrázek 13 - Unipolární řízení krokových motorů	24
Obrázek 14 - Bipolární řízení krokových motorů	24
Obrázek 15 - Schéma zapojení ULN2003	25
Obrázek 16 - Schéma zapojení L293D	26
Obrázek 17 - Rozdělení tzv. ekosystému STM32Cube	27
Obrázek 18 - Náhled na prostředí STM32CubeIDE	27
Obrázek 19 - Náhled na prostředí TouchGFX	28
Obrázek 20 - Realizace tzv. wildcard v prostředí TouchGFX	28
Obrázek 21 - Definice očekávaných znaků v tzv. wildcard	29
Obrázek 22 - Architektura TouchGFX	29
Obrázek 23 - Adresová struktura FreeRTOS	30
Obrázek 24 – Možné stavy úloh a přechody mezi jednotlivými stavy	31
Obrázek 25 - Navržená koncepce řídicí jednotky	33
Obrázek 26 – Navržená koncepce snímací jednotky	33
Obrázek 27 - Rozdělení do jednotlivých okruhů	34
Obrázek 28 - Popis pinů STM32L432KC	35
Obrázek 29 - Schéma zapojení snímací jednotky	35
Obrázek 30 - Softwarová realizace AD převodníku	36
Obrázek 31 - Softwarová realizace otáčení krokového motoru o 360 stupňů	36
Obrázek 32 - Graf porovnání odporového a kapacitního senzoru	38

Obrázek 33 - Náhled na hlavní menu řídicí jednotky	39
Obrázek 34 - Náhled na podmenu okruhu 1	39
Obrázek 35 - Softwarová realizace odeslání změny mezí.....	40
Obrázek 36 - Popis pinů STM32F469.....	41
Obrázek 37- Schéma zapojení řídicí jednotky	41
Obrázek 38 - Softwarová realizace měření teploty, tlaku a výšky hladiny	42
Obrázek 39 - Přenos paketu s potvrzením obsahující datové bajty.....	44
Obrázek 40 - Ventil se šroubem	45
Obrázek 41 – Ventil s ping-pongovým míčkem	45

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Čtyřtaktní řízení s magnetizací jedné fáze	22
Tabulka 2 - Čtyřtaktní řízení s magnetizací dvou fází	22
Tabulka 3 - Osmitaktní řízení.....	23
Tabulka 4 - Výsledky měření pomocí ultrazvukového měřiče vzdálenosti	43
Tabulka 5 - Cenová rozvaha navržené koncepce	46

Bibliografie

- 1.[Online]<http://zitkrajinou.cz/voda-a-sucho/kapkova-zavlaha-usetri-zemedelcum-az-dve-tretiny-nakladu-vodu/>.
- 2.[Online]https://rivio.cz/p/velka-sada-pro-zahradni-zavlazovani-100kusu-100-kusu/?gclid=CjwKCAjw47eFBhA9EiwAy8kzNBq8z4e8L0bLdmWaR_vWk_Axr6XXT8rKAabvKBQKvUmfPmphoq86lhoCV20QAvD_BwE.
- 3.[Online]<https://adoc.pub/meni-pdni-vlhkosti.html>.
- 4.[Online]https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/39467/1/BP_Strnadova_2019.pdf.
- 5.[Online]<https://docplayer.cz/39172393-Mereni-pudni-vlhkosti.html>.
- 6.[Online]<https://www.laskarduino.cz/arduino-senzor-vlhkosti-pudy/>.
- 7.[Online]<https://www.switchdoc.com/2020/06/tutorial-capacitive-moisture-sensor-grove/>.

8.DATASHEET, SEN0193,.

9.[Online]http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/25126/dlaba%20_2013_bp.pdf?sequence=1.

10.[Online]https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/32168/1/BP_Tomas_Portasik.PDF.

11.[Online] https://cs.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi_6.

12.DATASHEET, NRF24L01+,.

13.[Online] https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/31565/1/DP_Martin%20Masa.pdf.

14.ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. 1999.

15.[Online][http://www.energiazer.org/arduino_sensori/Arduino%20ultrasonic%20sensor%20\(HC-SR04%20or%20HY-SRF05\).pdf](http://www.energiazer.org/arduino_sensori/Arduino%20ultrasonic%20sensor%20(HC-SR04%20or%20HY-SRF05).pdf).

16.[Online]<http://profirobot.cz/wp-content/uploads/2018/03/Krokov%C3%A9-motory.pdf>.

17.[Online]https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85709.

18.DATASHEET, ULN 2003.

19.DATASHEET, ULN L293D.

20.[Online]<https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>.

21.[Online]<https://vyvoj.hw.cz/nove-funkce-stm32cube-pro-zrychleni-vyvoje.html>.

22.[Online]<https://support.touchgfx.com/docs/introduction/welcom>.

23.[Online]<https://www.mikrocontroller.net/attachment/95930/FreeRTOSPaper.pdf>.

24.[Online]https://www.freertos.org/RTOS_ports.html.

25.[Online]<https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-L432KC/>.

26.[Online]<https://os.mbed.com/platforms/ST-Discovery-F469NI/>.

27.[Online]<https://fel.cvut.cz/cz/education/prace/00010.pdf>.

28.[Online]<https://www.mikrocontroller.net/attachment/95930/FreeRTOSPaper.pdf>.

29.[Online]<https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-L432KC/>.

Přílohy

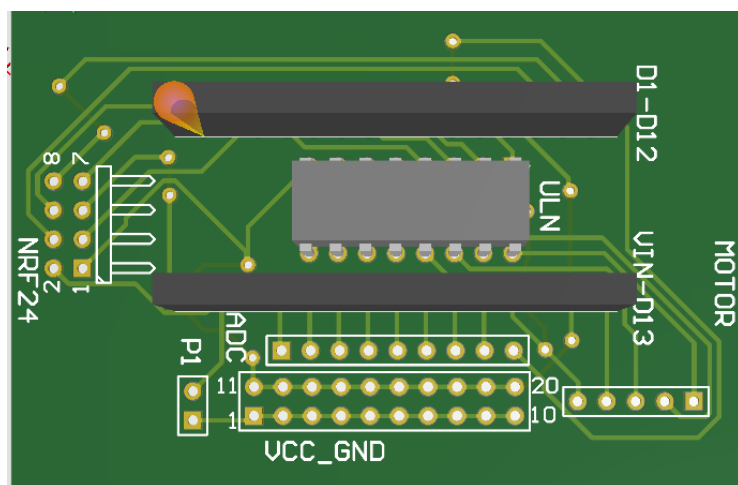
A. Popis registrů NRF24L01+

Adresa registru (hexadecimální)	Bit	Popis	Volba
0x00	6	Povolit projevení přerušení způsobené přijmutím dat na pinu IRQ	1-vypnuto 0-zapnuto
	5	Povolit projevení přerušení způsobené odesláním dat na pinu IRQ	1-vypnuto 0-zapnuto
	4	Povolit projevení přerušení způsobené chybným přenosem dat na pinu IRQ	1-vypnuto 0-zapnuto
	3	Povolit CRC	1-vypnuto 0-zapnuto
	2	Délka CRC	1-2bajty 0-1bajt
	1	Vypnutí/zapnutí	1-zapnuto 0-vypnuto
	0	Režim vysílač nebo přijímač	1-přijímač 0-vysílač
0x01	5 až 0	Povolit automatické potvrzování paketů na piplinech 5 až 0	1-povolit 0-zakázat
0x02	5 až 0	Povolit pipeline 5 až 0	1-povolit 0-zakázat
0x03	1 a 0	Nastavení délky adresního pole	01-3 bajty 10-4 bajty 11-5 bajtů
0x04	7 až 4	Nastavení zpoždění mezi opakovaným přenosem	0000 – 250uS 0001 – 500us 1111 – 4000us
	3 až 0	Počet opakovaných přenosů	0000 – opakovaný přenos zakázán 0001 -až 1x odeslat znovu 1111 – až 15x odeslat znovu

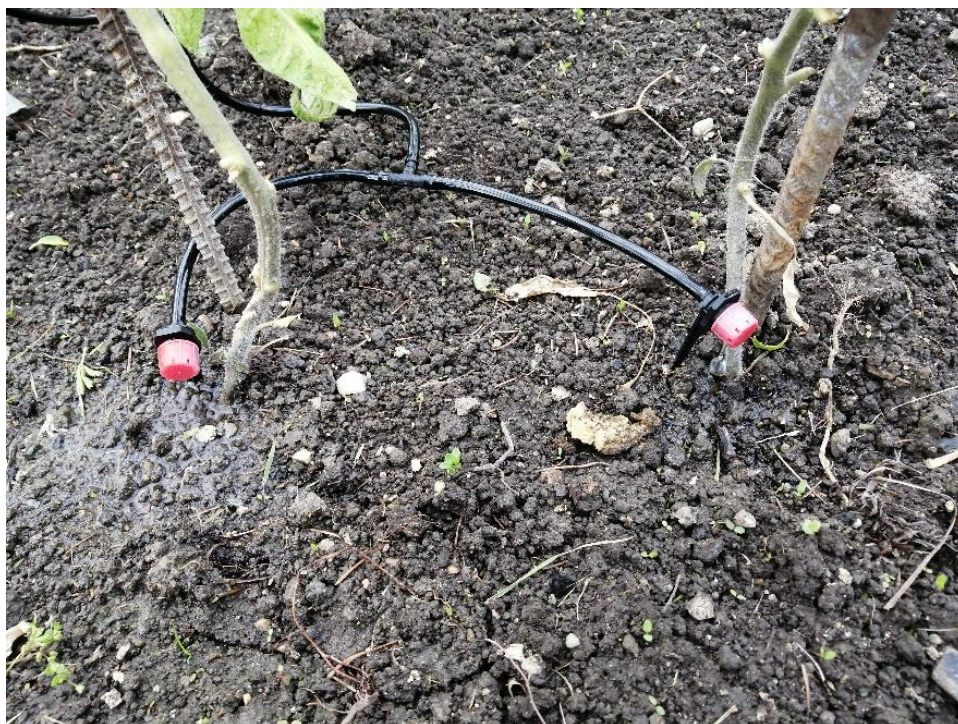
0x05	6 až 0	Nastavení frekvence	000000 – 2400MHz 111111 – 2525 MHz
0x06	5 a 3	Nastavení přenosové rychlosti	00 – 1Mbps 01 – 2 Mbps 10 – 250kpbs
	2 a 1	Nastavení vysílacího výkonu	00 - -18dBm 01 - -12dBm 10 - -6dBm 00 – 0dBm

B. Fotodokumentace z realizace

3D pohled na navrženou desku plošného spoje



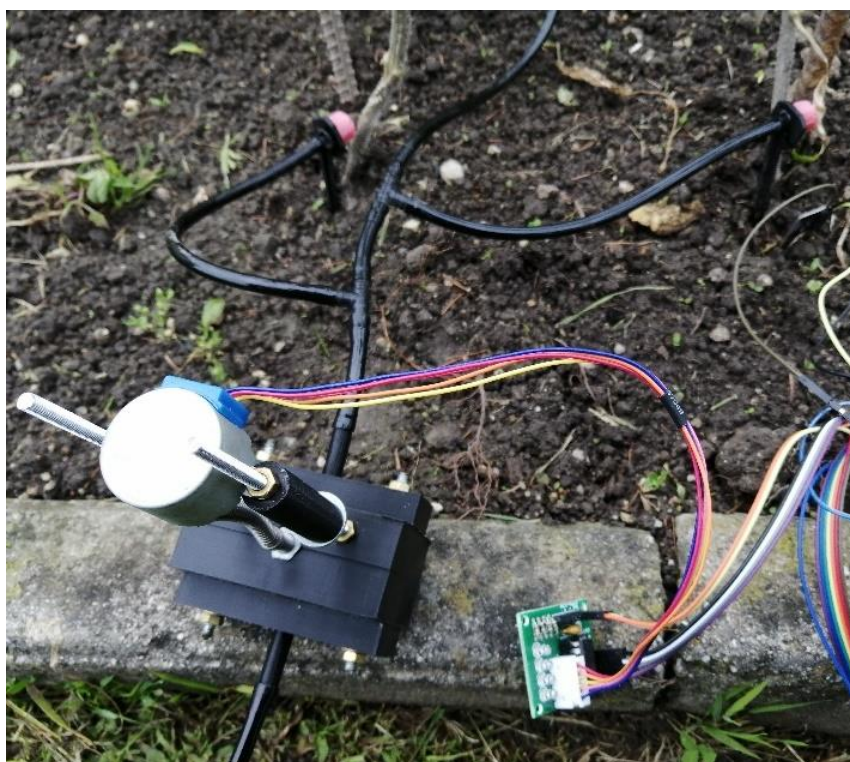
Kapková závlaha



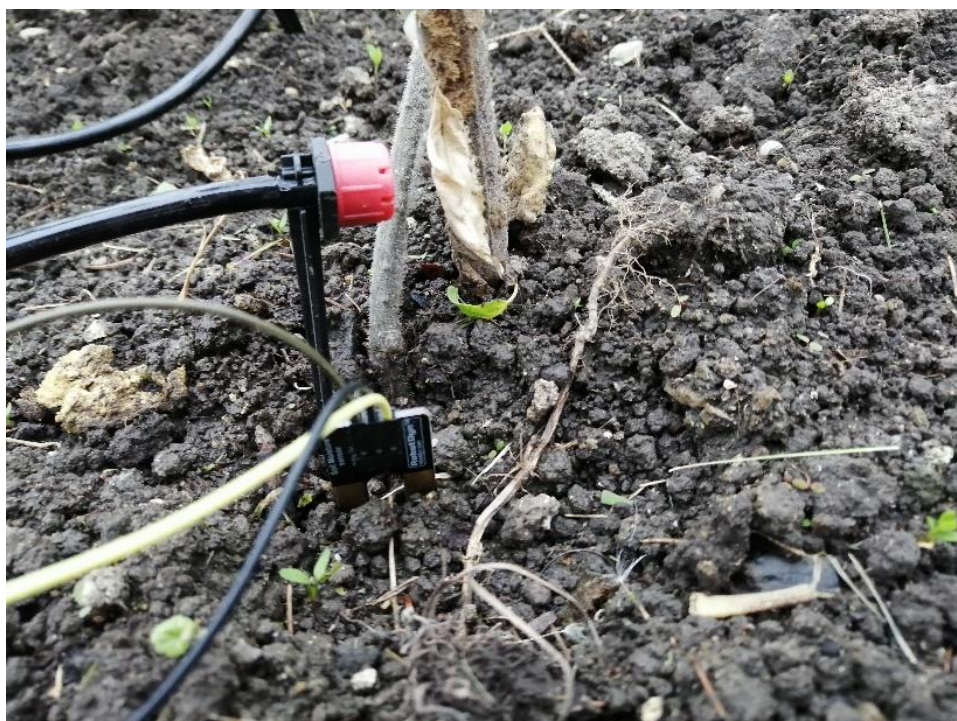
Řídící jednotka a měření stavu hladiny vody



Realizace navrženého ventilu



Měření pomocí odporového senzoru



Záhon

