



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

SOLÁRNÍ ZAVLAŽOVÁNÍ

BAKALÁŘSKA PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Rastislav Straňák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kristýna Jandová, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Rastislav Straňák

ID: 220856

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Solární zavlažování

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou solárního zavlažování a nastudujte potřebnou literaturu. Navrhněte jednoduché solární zavlažování s automatickým přihnojováním a případnou možností rozšíření o další funkce (např. detekce vlhkosti půdy). Navržené zařízení sestrojte a otestujete jeho funkčnost.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 2.6.2022

Vedoucí práce: Ing. Kristýna Jandová, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá problematikou solárneho zavlažovania spojenou s návrhom a zhotovením vlastného riešenia. Začiatok práce sa venuje analýze komerčného zariadenia, pričom určí jeho možné inovácie. Pokračuje rozborom a výberom jednotlivých komponentov pre vlastné riešenie. Navrhnuté zariadenie disponuje mikrokontrolérom, ktorý vyhodnocuje dáta z príslušných komponentov, čím riadi procesy systému. Vďaka ochrane voči samo-zničeniu spôsobenému minúťím vody alebo upchatí hadice, ochranou rastlín pred prepolievaním a aditívnou funkciou hnojenia sa jedná o kompaktný systém solárneho zavlažovania. V závere sa práca venuje testovaniu vytvoreného zariadenia a rozboru dosiahnutých výsledkov.

Kľúčové slová

solárne zavlažovanie, fotovoltaika, solárny panel, nabíjateľné batérie, samo-nasávacie čerpadlo, mikrokontrolér, 3D návrh, IRIS

Abstract

This bachelor thesis deals with the issue of solar irrigation system together with the design and manufacture of the owner's solution. The beginning of the thesis deals with the analysis of commercial equipment, determining its possible innovations. It continues with the analysis and selection of individual components for author's solution. Newly designed device has a microcontroller that evaluates data from the relevant components, thus controlling the system processes. Thanks to the protection against self-destruction caused by running out of water or clogged hoses, the protection of plants against overwatering and the additive function of fertilization, it is a compact solar irrigation system. The last part deals with the testing of the created equipment and the analysis of the achieved results.

Keywords

solar irrigation, photovoltaics, solar panel, rechargeable batteries, self-priming pump, microcontroller, 3D design, IRIS

Bibliografická citácia

STRAŇÁK, Rastislav. *Solární zavlažování*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141576>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Kristýna Jandová.

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko študenta: *Rastislav Straňák*

VUT ID študenta: *220856*

Typ práce: *Bakalárska práca*

Akademický rok: *2021/22*

Téma záverečnej práce: *Solárni zavlažování*

Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, vyslovene som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 2. júna 2022

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcej bakalárskej práce Ing. Kristýne Jandovej, Ph.D. za aktívnu odbornú a pedagogickú pomoc a za poskytnuté rady pri spracovávaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa: 2. júna 2022

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ZOZNAM TABULIEK	11
ÚVOD	12
1. SOLÁRNE ZAVLAŽOVANIE	13
1.1 KOMERČNÉ RIEŠENIE SOLÁRNEHO ZAVLAŽOVANIA.....	13
1.2 NÁVRH VLASTNÉHO RIEŠENIA	13
2. FOTOVOLTAIKA.....	14
2.1 FOTOLEKTRICKÝ JAV.....	15
2.2 PN PRECHOD	15
2.3 SOLÁRNY ČLÁNOK	16
2.4 SOLÁRNY PANEL	17
2.5 DÔLEŽITÉ PARAMETRE SOLÁRNYCH PANELOV	18
2.6 TYPY SOLÁRNYCH PANELOV	19
2.6.1 <i>Monokryštalické solárne panely</i>	19
2.6.2 <i>Polykryštalické solárne panely</i>	19
2.6.3 <i>Tenkovrstevné solárne panely</i>	19
2.7 VÝBER SOLÁRNEHO PANELU	20
3. BATÉRIA AKO ÚLOŽISKO ENERGIE	21
3.1 POTREBA ZAVEDENIA NABÍJATELNÝCH BATÉRIÍ.....	21
3.2 DÔLEŽITÉ PARAMETRE NABÍJATELNÝCH BATÉRIÍ.....	22
3.3 POROVNANIE POUŽÍVANÝCH TYPOV NABÍJATELNÝCH BATÉRIÍ	23
3.3.1 <i>Nikel-kadmiové batérie</i>	23
3.3.2 <i>Nikel-metal-hybridové batérie</i>	23
3.3.3 <i>Lítium-ión polymérové batérie</i>	24
3.4 TYPY ZAPOJENIA BATÉRIÍ.....	25
4. ELEKTRICKÉ ČERPADLO.....	27
4.1 FUNKCIA MEMBRÁNOVÉHO ČERPADLA	27
5. MIKROKONTROLÉR AKO RIADIACA JEDNOTKA	28
5.1 ZÁKLADNÉ KOMPONENTY MIKROKONTROLÉRU	28
5.1.1 <i>Centrálne procesorová jednotka</i>	28
5.1.2 <i>Vnútorňý oscilátor</i>	28
5.1.3 <i>Pamäť eeprom a flash</i>	28
5.1.4 <i>Pamäť RAM</i>	28
5.1.5 <i>Vstupno/výstupné porty</i>	29
5.2 ARCHITEKTÚRA MIKROKONTROLÉROV	29
5.3 RASPBERRY PI PICO	29
5.3.1 <i>Kompatibilita so systémom solárneho zavlažovania</i>	30
6. NÁVRH SOLÁRNEHO ZAVLAŽOVANIA	31
6.1 PARAMETRE ZAVLAŽOVANIA A VÝBER HLAVNÝCH KOMPONENTOV	31

6.1.1	<i>Proces zavlažovania</i>	31
6.1.2	<i>Proces nabíjania batérií</i>	32
6.1.3	<i>Kontrolné meranie vlhkosti pôdy</i>	33
6.1.4	<i>Aditívny proces hnojenia</i>	34
6.1.5	<i>Kontrolné meranie prietoku kvapalín</i>	34
6.2	NÁVRH BLOKOVÝCH SCHÉM	35
6.2.1	<i>Správa napájania</i>	36
6.2.2	<i>Riadiaca jednotka</i>	37
6.2.3	<i>Výstupné periférie</i>	37
6.3	ELEKTRICKÝ NÁVRH ZAPOJENIA	38
6.3.1	<i>Batériový manažment a vytváranie napäťových okruhov</i>	39
6.3.2	<i>Zapojenie riadiacej jednotky s výstupnými perifériami</i>	40
6.3.3	<i>Návrh zapojenia NPN tranzistorov a signalizačných LED diód</i>	41
6.3.4	<i>DPS NPN tranzistorov a signalizačných LED</i>	44
6.4	NÁVRH 3D MODELU ZARIADENIA	47
6.4.1	<i>Vnútorne diely</i>	47
6.4.2	<i>Vonkajší kryt</i>	51
6.4.3	<i>Celkový návrh</i>	52
6.5	3D TLAČ	55
6.5.1	<i>Výber materiálu pre 3D tlač</i>	55
6.5.2	<i>Tlač dielov</i>	56
6.6	PROGRAM SOLÁRNEHO ZAVLAŽOVANIA	60
6.6.1	<i>Návrh algoritmu zavlažovania</i>	61
6.6.2	<i>Návrh algoritmu hnojenia</i>	62
6.6.3	<i>Rozbor zdrojového kódu</i>	63
6.7	ZAPOJENIE A OSADENIE SÚČIASTOK	66
7.	TESTOVANIE SOLÁRNEHO ZAVLAŽOVANIA	70
7.1	<i>TEST PERIÓDY ZAVLAŽOVANIA</i>	70
7.2	<i>TEST OCHRANY HLAVNÉHO ČERPADLA</i>	72
7.3	<i>TEST OCHRANY PRED PREPOLIEVANÍM</i>	73
7.4	<i>TEST HNOJENIA</i>	74
8.	ZÁVER	76
	LITERATÚRA	78
	ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	80
	ZOZNAM PRÍLOH	82

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1 Časový priebeh priemernej ceny solárneho panela v prepočte na \$/Watt, dáta z [5]	14
Obrázok 2 Princíp fungovania solárneho článku	16
Obrázok 3 Ekvivalentný obvod fotovoltaického článku [9]	16
Obrázok 4 Štruktúra solárneho panelu [11]	17
Obrázok 5 Volt-Ampérová charakteristika solárneho článku s pridaním výkonu, preložené z [12].....	18
Obrázok 6 Vybíjanie/nabíjanie batérie so zobrazením smeru pohybu elektrónov a iónov	21
Obrázok 7 Sériové zapojenie batériových článkov	25
Obrázok 8 Paralelné zapojenie batériových článkov	25
Obrázok 9 Sériovo-paralelné zapojenie batériových článkov	26
Obrázok 10 Funkcia membránového čerpadla, preložené z [20]	27
Obrázok 11 Harvardská architektúra	29
Obrázok 12 Kapacitný senzor vlhkosti pôdy [22].....	33
Obrázok 13 Sekundárne čerpadlo JT-DC3L	34
Obrázok 14 Senzor prietoku kvapaliny YF-S201	35
Obrázok 15 Blokové schéma vyššej úrovne	36
Obrázok 16 Blokové schéma nižšej úrovne.....	36
Obrázok 17 Blokové schéma správy napájania	37
Obrázok 18 Blokové schéma riadiacej jednotky.....	37
Obrázok 19 Blokové schéma výstupných periférií	38
Obrázok 20 Schéma zapojenia batériového manažment s rozvodom napätí	39
Obrázok 21 Schéma riadiacej jednotky a výstupných periférií.....	40
Obrázok 22 Zapojenie NPN tranzistorov	41
Obrázok 23 Zapojenie LED diód	43
Obrázok 24 Rozmiestnenie NPN tranzistorov a príslušných rezistorov na DPS	44
Obrázok 25 Rozmiestnenie LED diód a príslušných rezistorov na DPS	44
Obrázok 26 Vrchná a spodná strana DPS s NPN tranzistormi a rezistormi.....	45
Obrázok 27 Vrchná a spodná strana DPS s LED diódami a rezistormi	46
Obrázok 28 Predný izometrický pohľad	47
Obrázok 29 Zadný izometrický pohľad	48
Obrázok 30 Spodný pohľad	49
Obrázok 31 Zrezaný predný izometrický pohľad	49
Obrázok 32 Základný panel	50
Obrázok 33 Predný izometrický pohľad	51
Obrázok 34 Predný zrezaný pohľad.....	52
Obrázok 35 Zostava vnútorných dielov	53
Obrázok 36 Celá zostava	54
Obrázok 37 Vybrané farby tlače	56
Obrázok 38 Záber z 3D tlače	57
Obrázok 39 Zložené vnútro	57
Obrázok 40 Predná strana zloženej zostavy.....	58
Obrázok 41 Zadná strana zloženej zostavy	59
Obrázok 42 Algoritmus zavlažovania.....	61
Obrázok 43 Algoritmus hnojenia.....	62
Obrázok 44 Manažment vody	66
Obrázok 45 Manažment vody zo zadu.....	67
Obrázok 46 Zapojenie súčiastok na prednom paneli	68

Obrázok 47 IRIS ako celok.....	69
Obrázok 48 Graf závislosti napätia batérie a prietoku vody od času, meranie periódy zavlažovania.....	71
Obrázok 49 Graf závislosti napätia batérie a prietoku vody od času, test kritických podmienok.....	72
Obrázok 50 Graf závislosti vlhkosti okolia a prietoku vody od času, testovanie ochrany pred prepolievaním.....	73
Obrázok 51 Graf závislosti napätia batérie a prietoku oboch kvapalín na čase, test hnojenia	74

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Údaje o NiCd batériách, dáta z [17]	23
Tabuľka 2 Údaje o NiMH batériách, dáta z [18]	24
Tabuľka 3 Údaje o Li-ion batériách, dáta z [19].....	24
Tabuľka 4 Technické údaje FL-3308.....	31
Tabuľka 5 Technologické parametre solárneho panelu	32
Tabuľka 6 Prehľad názvov z obrázku 20	39
Tabuľka 7 Prehľad názvov z obrázku 21	41
Tabuľka 8 Prehľad označenia káblov	45
Tabuľka 9 Prehľad označenia káblov	46

ÚVOD

Za posledných niekoľko stoviek rokov počet ľudí na zemi rapídne narastá. S tým súvisí objem jedla, ktorý sa musí každý deň vyprodukovať pre zabránenie hladomoru a udržanie prosperujúcej ekonomiky každej krajiny. Rozvoj efektívneho poľnohospodárstva je dôležitým nástrojom pre ukončenie chudoby a pomoci krajinám tretieho sveta.

Avšak efektivita poľnohospodárstva je výrazne ovplyvnená vonkajšími podmienkami. Medzi tie môžeme zaradiť teplotu vzduchu, množstvo a intenzitu zrážok, vlhkosť a výživnosť pôdy či silu vetra alebo prírodné katastrofy.

Medzi základné piliere poľnohospodárskej výroby patrí plánované zavlažovanie, vďaka ktorému je možné zefektívniť pestovanie plodín, znížiť ich zraniteľnosť voči neustále sa meniacim modelom zrážok, ako aj voči obdobiam sucha v niektorých podnebných pásmach Zeme. Tento proces potrebuje pre svoju funkčnosť prijímať a premieňať elektrickú energiu na mechanickú.

S príchodom efektívnych a cenovo dostupných solárnych panelov vzniká nová podkategória v poľnohospodárskom priemysle nesúca názov solárne zavlažovanie. Táto podkategória ponúka energeticky nezávislé riešenie zavlažovania s využitím slnečnej energie s minimom budúcich výdavkov. Časovačom ovládané elektrické čerpadlo predstavuje výhodu pozostávajúcu z eliminácie fyzickej námahy a ľudského faktoru, ktorý sa nahradí časovým, vodou šetriacim systémom. Presné časovanie je dosiahnuté závislosťou energetickej produkcie solárnych článkov od intenzity slnečného žiarenia. Pri veľkej intenzite sa batéria nabije za kratší čas, vďaka čomu rastliny dostanú závlahu presne vtedy, keď je pôda pod nimi vysušená a najviac ju potrebujú. Šetrenie vody je uskutočnené využitím kvapôčkového zavlažovania, kde voda nie je vejarovito rozprašovaná na pôdu, ale kvapká z vycentrovaných dier v hadici rovno na rastlinu a jej blízke okolie, čím sa zabráni polievaniu nevyužívaných oblastí.

1. SOLÁRNE ZAVLAŽOVANIE

Solárne zavlažovanie funguje na princípe premeny svetelnej energie na energiu elektrickú, za pomoci solárnych panelov, ktorá sa uloží do batérie a následne využije pre pohon elektrického čerpadla. Čerpadlo obsahuje zotrvačnik, ktorý ovláda piest. Piest pri roztočení motora nasáva a vytláča vodu, ktorú pretláča k rastlinám, kvetinám alebo záhradnej zelenine. Systém využívania uloženej elektrickej energie pre pohon motora ovláda riadiaca jednotka, napríklad Raspberry Pi alebo iný mikrokontrolér. Riadiaca jednotka pomocou časovača a dátach o aktuálnej zásobe elektrickej energie a vody vypočíta presný čas zapnutia a vypnutia zavlažovacieho procesu.

1.1 Komerčné riešenie solárneho zavlažovania

V komerčnej sfére solárnemu zavlažovaniu dominuje firma s názvom Irrigatia. Jej názov vznikol z anglického ekvivalentu slova zavlažovanie – irrigation. Táto spoločnosť má aktuálne na trhu tri typy podobných zariadení, a to SOL-C12, C24 a C120. Tieto tri výrobky sa líšia v počte tzv. zavlažovacích jednotiek, čiže v počte rastlín, ktoré dokážu v priebehu jedného zavlažovania dostatočne zavlažiť. Počet maximálneho množstva zavlažovacích jednotiek tvorí časť názvu každého výrobku, pre SOL-C12 je to 12 zavlažovacích jednotiek, SOL-C24 24 a SOL-C120 dokáže zavlažiť až 120 rastlín. S rastúcim počtom zavlažovacích jednotiek prirodzene rastie aj veľkosť solárneho panelu, výkon čerpadla a veľkosť batérie pre ukladanie energie.

Zapnutie zavlažovania začína v momente nabitia batérie, pričom pri všetkých verziách je možnosť nastavenia frekvencie spúšťania. Pri zlom nastavení môže veľmi ľahko dôjsť k prepolievaniu a zničeniu rastlín.

1.2 Návrh vlastného riešenia

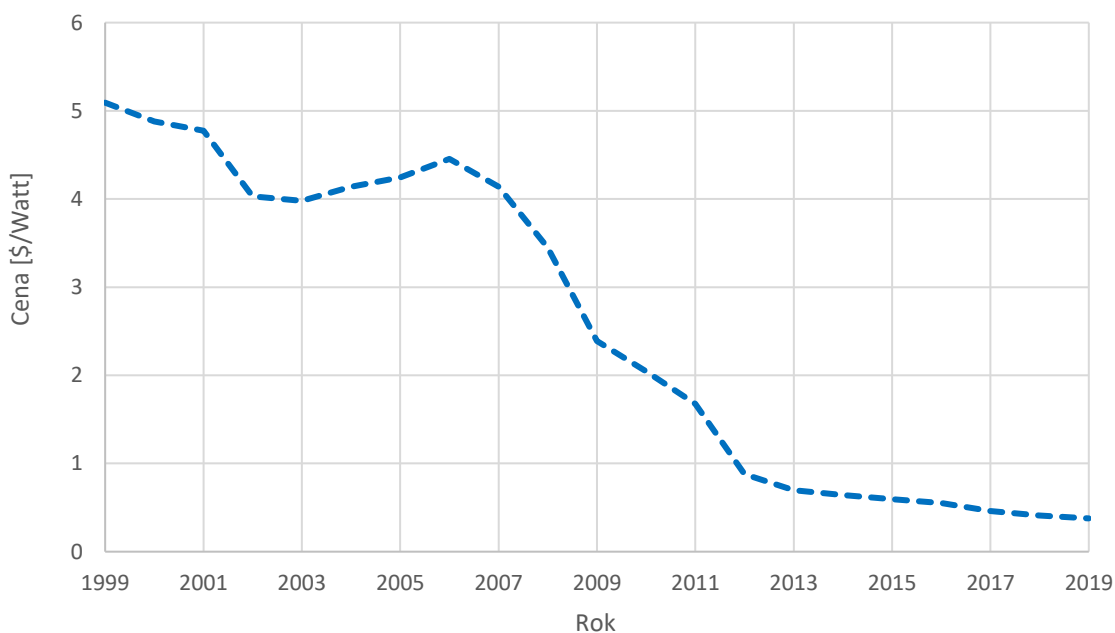
Návrh vlastného solárneho zavlažovacieho systému sa bude odrážať od základných princípov a zaužívaných spôsobov ukladania a následného využitia solárnej energie pre kvapôčkovú závlahu. Ponúkne inováciu v meraní vlhkosti pôdy, čím sa zabráni možnému prepolievaniu rastlín. Táto funkcia zároveň prispeje k správnej regulácii a šetreniu vody, čím sa zvýši ekologickosť celého zariadenia. Ďalšou inováciou bude možnosť hnojenia pôdy. Hnojenie bude prebiehať vmiešavaním tekutého hnojiva do vody počas procesu zavlažovania tak, aby bol dodržaný stanovený pomer. Systém bude obsahovať dva prietokomery, ktoré bude merať objem tečúcej vody a hnojiva. Mikrokontrolér bude dáta z prietokomerov kontrolovať, kedy pri nameraní nízkych hodnôt prietoku zastaví proces zavlažovania alebo hnojenia, čím zabráni zničeniu príslušného čerpadla.

2. FOTOVOLTAIKA

Fotovoltaické panely s využitím fotoelektrického javu premieňajú slnečnú energiu na energiu elektrickú. Vďaka tomu predstavujú obnoviteľný zdroj energie bez produkovania odpadových látok, ako sú napríklad skleníkové plyny alebo rádioaktívny odpad.

Prvá zmienka o fotoelektrickom jave siaha do roku 1839. V tom čase francúzsky fyzik Edmond Becquerel študoval správanie tuhých látok v elektrolytoch a zistil, že po ponorení platiny alebo striebra do vhodného roztoku s následným vystavením slnečnému žiareniu bolo produkované malé elektrické napätie a prúd. O niečo ďalej zašli v roku 1877 Adams a Day, ktorí vydali prvú odbornú správu venovanú výhradne fotoelektrickému javu v pevných látkach. Päť rokov na to Fritts zo selénu vyrobil prvý solárny článok. Avšak potenciál fotovoltaiky nebol v tej dobe spoločnosťou prijatý a pochopený [1]. Čo sa zmenilo začiatkom 20. storočia, kedy Albert Einstein získal Nobelovu cenu za popis fotoelektrického javu [2] a Jan Czochralski popísal metódu rastu syntetických monokryštálov, ktorá sa neskôr začala využívať na výrobu polovodičov, hlavne kremíku [3].

Fotovoltaické panely sa vďaka financovaniu kozmického priemyslu začali v 50. rokoch dvadsiateho storočia využívať ako zdroj energie pre satelity. Neskôr sa začali používať v drobnej elektronike, ako sú hodinky alebo kalkulačky [4]. V priebehu rokov sa účinnosť fotovoltaických panelov zvyšovala a ich cena, ako ukazuje obrázok 1, klesala, čím si fotovoltaika dostala do ďalších odvetví priemyslu a jej spektrum využitia stále stúpa.



Obrázok 1 Časový priebeh priemernej ceny solárneho panela v prepočte na \$/Watt, dáta z [5]

2.1 Fotoelektrický jav

Slnčné lúče ležia v pásme viditeľného spektra elektromagnetického žiarenia, toto žiarenie je tvorené fotónmi. Fotóny predstavujú kvantá energie, ktoré existujú len v pohybe, majú rýchlosť svetla a vzhľadom na typ elektromagnetického žiarenia aj frekvenciu a vlnovú dĺžku. Energiu fotónu vieme určiť zo vzťahu

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \quad (1)$$

kde h prezentuje Planckovu konštantu, f frekvenciu, c rýchlosť svetla a λ vlnovú dĺžku. Práve energia fotónu je pri fotovoltackom jave dôležitá. Ak fotón s dostatočnou energiou dopadne na elektrón vo valenčnom pásme atómu, tak elektrón absorbuje tento fotón, ktorý mu predá svoju energiu a zanikne, pričom elektrón je uvoľnený do vodivostného pásu a na jeho mieste vznikne diera, ktorá predstavuje elementárny kladný náboj [6], tento proces sa nazýva generácia páru elektrón – diera. Opakom generácie je rekombinácia, kedy elektrón uvoľní časť svojej energie napríklad vo forme tepla alebo fotónu (princíp LED diódy a laseru) a začlení sa späť do valenčného pásma, pričom zanikne jedna diera. Rýchla rekombinácia predstavuje pre fotovoltaiiku nechcený jav, ktorému sa predchádza využívaním vlastností polovodičového PN prechodu.

2.2 PN prechod

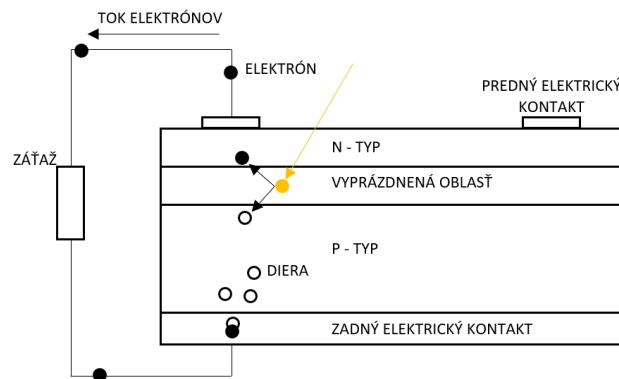
Vlastný polovodič je látka, ktorej vodivosť ovplyvňujú vonkajšie faktory ako teplota okolitého vzduchu alebo intenzita dopadajúceho žiarenia. Vlastným polovodičom je štvormocný kremík, ktorý patrí do IV. skupiny periodickej tabuľky prvkov [7]. Z toho vyplýva, že má štyri valenčné elektróny, ktoré vytvárajú väzbu s príslušnými atómami v kryštálovej mriežke.

Nevlastným polovodičom sa nazýva látka, ktorej vodivosť ovplyvňujú cudzie atómy zabudované do jej kryštálovej mriežky. Pri dotácii atómov trojmocného prvku, napríklad bóru, vzniká polovodič typu P. Tri valenčné elektróny vytvoria v kryštálovej mriežke kremíku jedno prázdne miesto – dieru, čím sa zvyšuje vodivosť polovodiča a bór sa stane aniónom. Pri dotácii atómov päťmocného prvku, napríklad fosforu, vzniká polovodič typu N, z fosforu sa stane kation a uvoľnený elektrón zvyšuje vodivosť štruktúry kremíku.

Na rozhraní spojenia polovodiča typu P a N vznikne PN prechod. Kedy voľné elektróny difundujú z oblasti typu N, do oblasti typu P, pričom za sebou nechávajú kladný priestorový náboj vytvorený ionizovanými atómami (napríklad fosforu). Rovnako zareagujú voľné diery blízko prechodu, ktoré difundujú z oblasti P do záporne nabitej oblasti N a nechajú za sebou záporný priestorový náboj (vytvorený napríklad aniónmi bóru). Po nejakom čase v blízkosti prechodu vznikne elektrické pole, ktoré zabráni ďalšiemu difundovaniu elektrónov a dier, čím na prechode vznikne vyprázdnená oblasť [8].

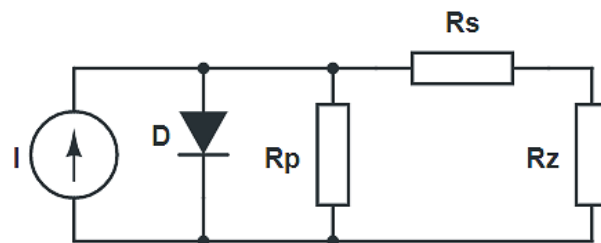
2.3 Solárny článok

V zjednodušenej verzii môžeme solárny článok popísať ako veľkoplošný PN prechod zapojený do elektrického obvodu. Absorbovaním fotónu vo vyprázdnenej oblasti vznikne voľný pár elektrón – diera, kde elektrón je elektrickým polom odsatý do oblasti N a diera do oblasti P. Po prepojení P a N časti vonkajším obvodom je elektrón priťahovaný pozitívnym nábojom a cez predný elektrický kontakt k nemu vonkajším obvodom prechádza, čím vytvára elektrický tok. Diera je naopak priťahovaná negatívnym nábojom a pri spojení diery a elektrónu je obnovená elektrická neutralita.



Obrázok 2 Princíp fungovania solárneho článku

Pre bližšie skúmanie fotovoltaiického článku existuje jeho ekvivalentný obvod, ktorý je zobrazený na obrázku 3. Solárny článok generuje prúd zodpovedajúci intenzite dopadajúceho svetla. V ideálnom prípade by zapojenie tvoril len zdroj prúdu s diódou (solárny článok je tvorený PN prechodom). V reálnom svete sa nejaká časť prúdu cestou stratí, takže do zapojenia bol pridaný skratový odpor R_p , a kvôli samotnému odporu článku a jeho vodičov, bol pridaný odpor R_s . Ak nie je medzi výstupnými svorkami pripojený žiadny zaťažovací rezistor (R_z), tak na výstupných svorkách je maximálne možné napätie = napätie naprázdno. Po zapojení zaťažovacieho rezistoru článok dodáva zaťažovací prúd, takže napätie na svorkách bude nižšie o napätie spotrebované sériovým zaťažovacím odporom [9].



Obrázok 3 Ekvivalentný obvod fotovoltaiického článku [9]

2.4 Solárny panel

Solárny panel je vyrobený zo súboru solárnych článkov zapojených v sérii, ktoré predstavujú najmenšiu funkčnú jednotku schopnú vytvárať elektrickú energiu. Solárne články sú usporiadané v obdĺžnikovom alebo v štvorcovom ráme.

Vzhľadom na výrobcu sa dĺžka záruky solárnych panelov pohybuje od 10 do 30 rokov. Pri správnej údržbe vydrží panel fungovať aj dlhšie časové obdobie. Neodvratným faktom je, že efektívnosť solárnych panelov každým rokom klesá o približne 0,5 % až 1 % [10]. Z toho vyplýva, že po 30-tich rokoch môže solárny panel stále fungovať na 70 % účinnosti. Hlavným faktorom zníženia účinnosti je mechanické poškodenie pri nesprávnom zaobchádzaní alebo nedostatočná ochranná konštrukcia solárneho panelu. Odolnosť solárnych panelov voči vonkajším vplyvom predstavuje kľúčovú vlastnosť pre ich dlhodobé a bezproblémové fungovanie.

Na obrázku 4 je zobrazená štruktúra solárneho panelu. V obrázku je zhora dole postupne:

Hliníkový rám – zvyšuje pevnosť panelu,

Tvrdené sklo – chráni solárne články pred nárazmi (napr. krúpy),

Laminačná fólia – EVA – zabraňuje vnikaniu vlhkosti a špiny a taktiež tlmí nárazi a chráni články a prepojovacie vodiče pred vibráciami,

Solárne články,

Laminačná fólia – EVA,

Zadná krycia vrstva – zabraňuje vnikaniu vlhkosti a zaisťuje mechanickú ochranu a elektrickú izoláciu,

Pripojovacia skrinka – slúži na prepojenie panelov medzi sebou a s vonkajšími aplikáciami.

Všetky spomenuté prvky majú podstatnú úlohu pri ochrane solárneho panelu a zabezpečení jeho dlhodobej životnosti.

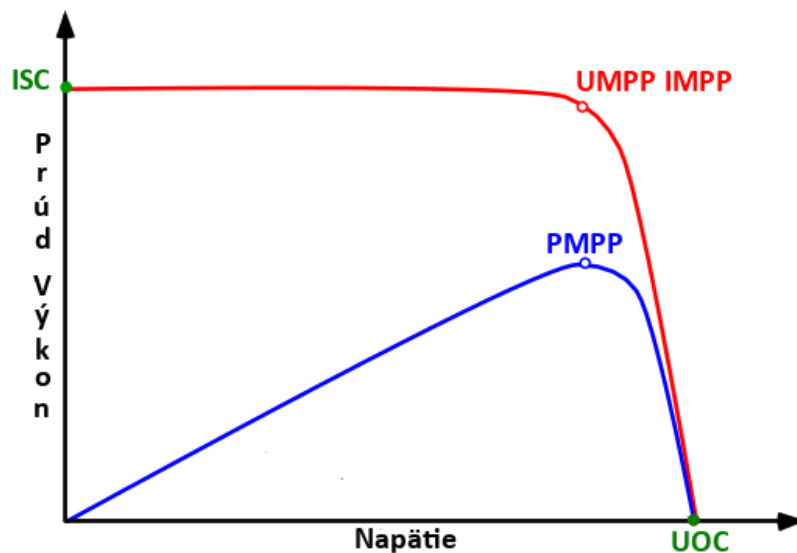


Obrázok 4 Štruktúra solárneho panelu [11]

2.5 Dôležité parametre solárnych panelov

Výber solárneho panelu pre určitú aplikáciu sprevádza porovnávanie výrobných technológií solárnych článkov. Dôležitejšie, ako samostatná technológia výroby solárneho článku, sú jeho technologické parametre:

- Menovitý výkon – vyjadruje sa vo wattoch a označuje sa PMPP (Power at Maximum Power Point). Udáva množstvo elektrickej energie, ktorú je solárny panel schopný vyprodukovať pri maximálnej intenzite slnečného žiarenia. Solárny panel o menovitom výkone 250 W dokáže počas štyroch hodín slnečného žiarenia vyprodukovať 1000 Wh elektrickej energie. Táto energia stačí na 40 hodín nabíjania smartfónu skrz 20 W rýchlo nabíjačku alebo na 2 hodiny prania 500 W práčkou.
- Menovité napätie – je napätie menovitého výkonu solárneho panelu vo V, ozn. UMPP.
- Menovitý prúd – je elektrický prúd pri menovitom výkone solárneho panelu, udáva sa v A alebo mA, ozn. IMPP.
- Napätie naprázdno – ozn. UOC. Pomenováva napätie, pri ktorom žiadny prúd netečie vonkajším obvodom.
- Prúd nakrátko – ozn. ISC. Označuje prúd solárneho článku v momente nulového napätia a zároveň to je najväčší prúd, ktorý môže solárnym článkom tečť.
- Účinnosť solárneho článku – vyjadruje podiel elektrického výkonu solárneho článku a intenzity slnečného žiarenia.
- Teplotný koeficient výkonu – predstavuje zmenu výkonu solárneho článku pri zmene okolitej teploty.



Obrázok 5 Volt-Ampérová charakteristika solárneho článku s pridaním výkonu, preložené z [12]

2.6 Typy solárnych panelov

Podľa technológie výroby delíme solárne panely na kryštalické a tenkovrstvé. Kryštalické panely sú vyrobené z kryštalického kremíku a radia sa medzi ne monokryštalické a polykryštalické solárne panely. Tenkovrstvé solárne panely sú vyrábané technológiou nanášania tenkej vrstvy amorfného kremíku. Taktiež existujú perovskitové solárne panely, ktorých hlavným negatívom je obsah olova a organické solárne panely, ktoré pracujú na bázi fotosyntézy, avšak stále sú len vo fáze výskumu.

2.6.1 Monokryštalické solárne panely

Tento druh panelov sa skladá z monokryštalických článkov, ktoré sa vyrábajú z monokryštalického kremíku za použitia Czochralského metódy. Výroba monokryštalického kremíku začína u kremičitého piesku (SiO_2), ktorý sa vytriedi v termickej reakcii s uhlíkom (2C) a vznikne čistý kremík (Si) a oxid uhoľnatý (2CO). Tento kremík je očistený na úroveň metalurgickej čistoty. Nasledovne je splynený s trichlórsilanom, čím sa odstráni veľká časť ostávajúcich nečistôt a po opätovnom skondenzovaní vznikne polykryštalický kremík. Monokryštalita sa dosahuje roztavením polykryštalického kremíku a následným vyťahovaním taveniny pomocou malého zárodka monokryštalického kremíku. Postupným vyťahovaním vzniká kremíkový ingot. Po očistení a narezaní ingotu vzniknú tzv. wafery, pláty ingotu. Očistením, testovaním, narezaním a dotovaním waferu vznikajú monokryštalické solárne články čiernej farby.

Monokryštalické solárne panely sú kvalitné a dosahujú účinnosť 15 až 20 % [13]. Majú vyššiu účinnosť ako polykryštalické solárne panely, takže sú priestorovo efektívnejšie a za zhorešených svetelných podmienok dosahujú vyššie výkony.

2.6.2 Polykryštalické solárne panely

Polykryštalické solárne panely sa vyrábajú podobne ako monokryštalické, avšak podobnosť ich výroby končí skondenzovaním po splynení s trichlórsilanom. Vtedy je polykryštalický kremík roztavený a naliaty do formy. Vo forme sa nechá vychladnúť a stuhnúť. Po stuhnutí je očistený a rozrezaný na wafery v tvare štvorcov. Wafery sú ešte raz očistené a po prepojení a umiestnení elektród vzniká polykryštalický solárny panel.

Hlavnou výhodou panelov z polykryštalického kremíku je ich nízka cena a životnosť zrovnateľná s monokryštalickými panelmi. S nízkou cenou prichádza aj účinnosť v rozmedzí 13 až 16 % [13], čím sa znižuje priestorová efektivita a pribúda nutnosť kúpy viacerých solárnych panelov pre dosiahnutie výkonu použitia monokryštalického kremíku.

2.6.3 Tenkovrstevné solárne panely

Produkcia tenkovrstevných solárnych panelov spočíva v nanášaní niekoľkých tenkých vrstiev na substrát. Prvou vrstvou je zadný metalický kontakt, po ktorom nasleduje niekoľko vrstiev amorfného kremíku a predná vodivá vrstva. Okrem týchto

vrstiev sú na substrát nanášané aj vrstvy zvyšujúce chemickú a mechanickú odolnosť solárneho panelu. Vrstvy sa na substrát nanášajú cez šablóny. Substrátom môžu byť polyméry, keramika, oceľ alebo aj sklo.

Medzi ich najväčšie výhody patrí tvarovateľnosť, vďaka ktorej sa dokážu prispôbiť väčšine nerovných povrchov. Nevýhodou je najnižšia životnosť spomedzi spomenutých typov solárnych panelov a účinnosť približne 7 % [14].

2.7 Výber solárneho panelu

Výber solárneho panelu sa bude odvíjať od dostupnosti na trhu, vzhľadom na prijateľný pomer ceny a menovitého výkonu monokryštalického, polykryštalického alebo tenkovrstevného solárneho panelu. Okrem týchto dvoch faktorov výber taktiež ovplyvnia všetky dôležité parametre solárnych panelov, ktoré táto práca rozoberá, ako napríklad účinnosť či životnosť.

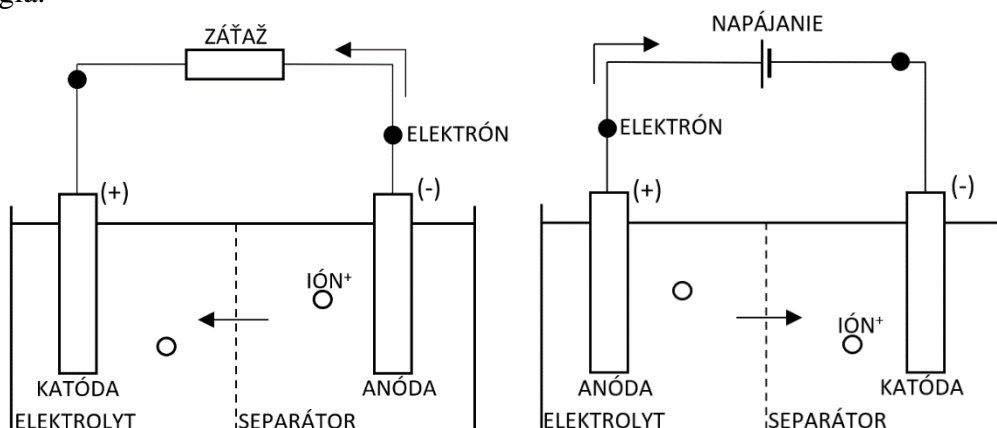
3. BATÉRIA AKO ÚLOŽISKO ENERGIE

Batéria je zariadenie, ktoré sa využíva ako zdroj elektrickej energie. Elektrická energia vzniká chemickou reakciou v batérii, ktorá ovplyvňuje tok elektrónov vo vonkajšom obvode, vďaka čomu vzniká využiteľný elektrický prúd.

Batéria sa skladá z jedného alebo viacerých elektrochemických článkov. Každý článok sa skladá z dvoch elektród, nazývajúcich sa anóda (-), katóda (+), a z elektrolytu. Elektrolyt je roztok obsahujúci ióny, ktoré môžu viesť elektrický prúd. Anóda predstavuje negatívnu elektródu elektrochemického článku, ktorá je spojená s procesom oxidácie a uvoľňovaním elektrónov do vonkajšieho obvodu. Katóda predstavuje kladnú elektródu spojenú s procesom redukcie a prijímaním elektrónov z roztoku. Oxidácia je proces, pri ktorom sa odobratím elektrónu produkujú kladne nabité ióny alebo sa odstraňujú záporne nabité ióny z roztoku [15]. Voľné elektróny sú cez vonkajší obvod priťahované ku katóde a cestou môžu byť využité na elektrickú prácu. Proces redukcie na katóde vytvára záporne nabité ióny alebo odstraňuje kladne nabité ióny z elektrolytu. Po určitom čase sa rozdiel v elektrochemickom napätí vyrovná a batéria už nie je ďalej schopná vytvárať elektrický prúd.

3.1 Potreba zavedenia nabíjateľných batérií

Pre potreby solárneho zavlažovania je kritická funkcia dobíjania batérie energiou zo solárnych článkov, k čomu sa využívajú nabíjateľné batérie. Po vybití batérie je možné namiesto záťaže pripojiť zdroj napätia, batériu nabiť a opätovne využiť ako zdroj elektrickej energie. Po zapojení zdroja napätia sa zmenia polarities elektród, tým pádom proces oxidácie a redukcie prebieha reverzne a tým, že sa kladne nabité ióny aj elektróny premiestňujú do ich pôvodného miesta sa indukuje v katóde využiteľná elektrická energia.



Obrázok 6 Vybíjanie/nabíjanie batérie so zobrazením smeru pohybu elektrónov a iónov

Pri vybíjaní a nabíjaní sa ióny pohybujú cez elektrolyt. Elektrolyt sa pri vysokých teplotách alebo pri nesprávnom zaobchádzaní môže vypariť. Po vyparení by elektróny

mohli prechádzať vnútorným obvodom článku [16] a vznikol by skrat nasledovaný plameňom alebo výbuchom. Pre zabránenie tomuto deju sa do elektrolytu umiestňuje izolačná vrstva nazývaná separátor. Separátor predstavuje záložnú ochranu, ktorá zabráňuje elektrónom prechod vnútorným obvodom článku.

3.2 Dôležité parametre nabíjateľných batérii

Medzi dôležité parametre pri výbere správneho typu nabíjateľnej batérie vzhľadom na aplikáciu patria:

- Nominálne napätie – predstavuje referenčné napätie batérie.
- Nominálna kapacita – zisťuje sa vybitím plne nabitej batérie pri určitom vybijacom prúde vynásobením časom vybijania až po vypínacie napätie batérie. Vzhľadom na vybijací prúd sa taktiež určuje C-rate, kedy 1C predstavuje taký vybijací prúd, pri ktorom sa nabitá batéria vybijie na vypínacie napätie za jednu hodinu (0,5 C za 2h, 2C a 30 minút..).
- Napájacie a vypínacie napätie – batéria je po nabití na plnú kapacitu nabitá na úroveň napájacieho napätia, zatiaľ čo vypínacie napätie predstavuje minimálne povolené napätie prakticky prázdnej batérie, kedy ešte nehrozí jej poškodenie.
- Kapacita batérie – udáva sa v mAH (miliampér · hodina), batéria s kapacitou 250 mAH dokáže dodávať konštantný prúd 2 mA po dobu 125 hodín. Pre väčšie batérie sa môže využívať aj jednotky AH (ampér · hodina).
- Energetická hustota – vyjadruje množstvo energie uloženej na jednotku objemu, udáva sa v Wh/m³ alebo Wh/kg. Energetická hustota je podstatná v aplikáciách, kde je rozmer batérie zásadným parametrom.
- Špecifický výkon – definuje výkon na jeden kilogram batérie, jednotka W/kg. Medzi energetickou hustotou a špecifickým výkonom obvykle platí nepriama úmera. Batérie, ktoré majú veľkú energetickú hustotu, majú obvykle nízky špecifický výkon. Veľký špecifický výkon majú kvôli veľkým odberným prúdom batérie s nízkou energetickou hustotou.
- Maximálny konštantný vybijací prúd – maximálny odberový prúd, pri ktorom je možné batériu súvisle vybiť tak, aby nedošlo k jej poškodeniu.
- Stav nabitia – udáva sa v skratke z anglického slovného spojenia State of Charge – SoC a predstavuje pomer uloženej energie k celkovej možnej skladovanej energii.
- Stav vybitia - udáva sa v skratke z anglického slovného spojenia Depth of Discharge – DoD a predstavuje pomer vybitej energie k celkovej možnej skladovanej energii. Súčet stavu nabitia a stavu vybitia by mal predstavovať celkovú energetickú kapacitu batérie.
- Cyklická životnosť – je počet vybijacích a nabíjacích cyklov batérie predtým, ako už nebude schopná splňať určité výkonové štandardy. Pričom počet cyklov a ich hĺbka sú definované výrobcom. Celková životnosť batérie nezávisí len od počtu cyklov, ale

aj od rýchlosti cyklovania, hĺbky cyklov a taktiež od okolitých podmienok ako teplota či vlhkosť prostredia.

- Samo-vybíjanie – definuje zníženie energetickej kapacity za čas, kedy je batéria v nezaťaženom stave. Tento parameter je dôležitý pre aplikácie, pri ktorých dochádza k obdobiam nepoužívania batérie.

3.3 Porovnanie používaných typov nabíjateľných batérií

3.3.1 Nikel-kadmiové batérie

Nikel-kadmiové (NiCd) batérie majú na pozitívnej elektróde (anóde) hydroxid oxidu nikelnatého, na negatívnej elektróde (katóde) kadmium a elektrolytom je vodný hydroxid draselný. Medzi elektródami sa nachádza polopriepustná membrána na oddelenie elektrónov od iónov niklu.

Tabuľka 1 Údaje o NiCd batériách, dáta z [17]

Nominálne napätie [V]	1,2
Cyklická životnosť [-]	1000 – 5000
Dĺžka života [rok]	10 – 15
Efektivita [%]	60 – 70
Hustota energie [Wh/kg]	30 – 70
Samo-vybíjanie [%/mesiac]	10

Z tabuľky 1 je možné odčítať nízku efektivitu, pomerne nízku hustotu energie a taktiež vysoké samo-vybíjanie NiCd batérií, čo malo vplyv na ich ústup v technologickom priemysle. Medzi ich ďalšie nevýhody patrí fakt, že obsahujú toxické kadmium, a taktiež pri nich môže nastať pokles napätia pri opakovanom cyklovaní v strednom stave nabitia.

Na druhú stranu nikel-kadmiové batérie sú lacné na výrobu, po vystavení extrémnym elektrochemickým podmienkam ako prebitie alebo nadmerné vybitie neutrpia trvalé škody a majú pomerne veľkú cyklickú životnosť. Navyše patrili k prvým široko používaným nabíjateľným batériám a ich vývoj prispel k vývoju nových druhov batérií.

I keď nikel-kadmiové batérie predstavujú lacné vyriešenie batériového úložiska pre solárne zavlažovanie, tak kvôli zmieneným nedostatkom a podľa smernice o batériách Európskej únie 2006/66/EC nemôže byť tento druh batérií použitý v systéme solárneho zavlažovania.

3.3.2 Nikel-metal-hybridové batérie

Kladnú elektródu nikel-metal-hybridových (NiMH) batérií tvorí hydroxid nikelnatý, zápornú tvorí zliatina absorbujúca vodík. Elektrolyt je tvorený vodným hydroxidom draselným.

Tabuľka 2 Údaje o NiMH batériách, dáta z [18]

Nominálne napätie [V]	1,2
Cyklická životnosť [-]	1000 – 5000
Dĺžka života [rok]	10 – 15
Efektivita [%]	60 – 70
Hustota energie [Wh/kg]	75 – 80
Samo-vybíjanie [%/mesiac]	50

V porovnaní s NiCd batériami dosahujú NiMH batérie vyššej hustoty energie, avšak tento druh batérií ma vysokú mieru samo-vybíjania. Na trhu sú taktiež dostupné typy s nízkou hodnotou samo-vybíjania ($\approx 5\%$), lenže ich nevýhodou je nižšia kapacita, zvyčajne okolo 2000mAh. Vzhľadom na vysokú hodnotu samo-vybíjania nie sú NiMH batérie vhodné pre zariadenia s nízkou záťažou, ako je napríklad riadiaca jednotka solárneho zavlažovania. Pozitívnym faktom je možnosť opätovného nabitia batérie aj po vybití na 0 % bez jej poškodenia. Hoci pri napájaním systémom zo solárnych panelov táto situácia pri správnom softvérovom nastavení pravdepodobne nestane. Ďalším, pre solárne zavlažovanie negatívnym faktorom, je relatívne pomalé nabíjanie. Pri vysokej teplote je potrebné rastliny zavlažovať aspoň každé 3h, z čoho vyplýva, že batéria sa musí pomerne rýchlo nabíjať, aby bola dodávaná závlaha dostatočná. Kvôli vlastnostiam NiMH batérií môže dôjsť k tomu, že systém solárneho zavlažovania nebude dosahovať konštantné hodnoty vysokej efektivity, preto by sa v týchto systémoch nemali používať.

3.3.3 Lítium-ión polymérové batérie

Elektrochemicky aktívny materiál pre lítium-ión polymérové batérie (Li-ion) je zlúčenina lítia a oxidu kovu, ktorá sa nachádza na kladnej elektróde. Záporná elektróda je tvorená grafitom a elektrolytom sú lítiové soli.

Tabuľka 3 Údaje o Li-ion batériách, dáta z [19]

Nominálne napätie [V]	3,7
Cyklická životnosť [-]	2000 – 10000
Dĺžka života [rok]	15 – 20
Efektivita [%]	95
Hustota energie [Wh/kg]	120 – 180
Samo-vybíjanie [%/mesiac]	5

Efektivita Li-ion batérií dosahuje z porovnávaných typov najvyššie hodnoty, tak isto, ako aj cyklická životnosť, hustota energie a miera samo-vybíjania. Ďalšou výhodou je, že tieto batérie nemajú pamäťový efekt, čiže vybíjanie a nabíjanie napríklad na polovičnú úroveň energetickej kapacity nespôsobí celkové zníženie kapacity batérie. Nabíjanie je rýchlejšie ako u NiMH batérií, preto nachádzajú uplatnenie v smartfónoch či smart hodinách a stávajú sa kompaktnými aj pre solárne zavlažovanie. Nevýhodou je

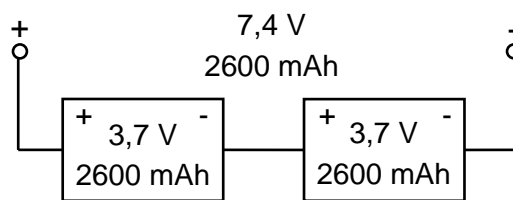
prehrievanie batérií pri vysokej záťaži, ktoré môže skončiť plameňom alebo výbuchom. Ďalej tieto batérie nezvládajú extrémne elektrotechnické podmienky, kedy sa môžu vybíjať a nabíjať len do výrobcom definovaného prúdu (napríklad 1C alebo 2C) a ich hodnota nemôže klesnúť na 0 %. Hoci sú drahšie ako NiMH batérie, tak pri relatívne malom počte kusov by tento fakt nemal spôsobiť výrazný rozdiel.

Lítium-iónové batérie sú kompaktné riešenie ako úložisko energie pre solárne zavlažovanie. Vďaka ich vysokej energetickej hustote pre požadovanú kapacitu zaberú menej miesta ako ostatné typy batérií, a vďaka vyššiemu nominálnemu napätiu sa pri rovnakom počte kusov zvýši celkový výkon batérie.

3.4 Typy zapojenia batérií

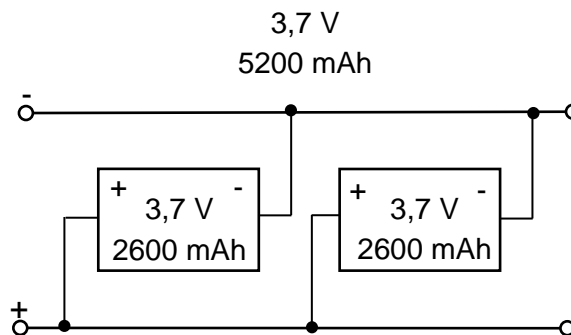
Každá batéria dokáže dodávať výrobcom definovaný výkon, čiže napätie a prúd v časovom úseku. Vo väčšine aplikácií výkon alebo kapacita jednej batérie nie je dostačujúca a je potrebné k nej, vzhľadom na potreby aplikácie, pridať ďalšie batérie. Rozlišujeme tri druhy zapojení.

Sériové zapojenie batérií spočíva v prepojení záporného terminálu jednej batérie s kladným terminálom druhej batérie. Toto zapojenie ponúka vyššie výstupné napätie so zachovaní kapacity.



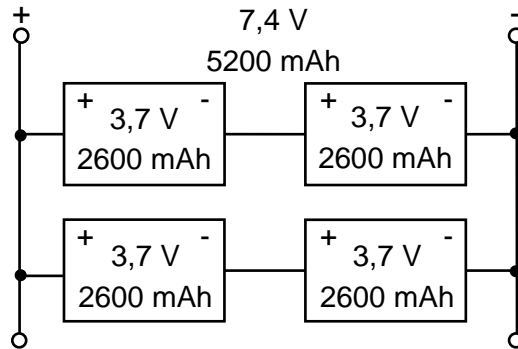
Obrázok 7 Sériové zapojenie batériových článkov

Paralelné zapojenie sa uskutočňuje prepojením negatívnych a pozitívnych terminálov batérií. Vďaka tomuto zapojeniu sa dosahuje navýšenie kapacity batériového systému pri zachovaní výstupného napätia použitého typu batérií.



Obrázok 8 Paralelné zapojenie batériových článkov

Sériovo-paralelné zapojenie je kombinácia oboch predošlých zapojení. Spôsob zapojenia tkvie v paralelnom spojení niekoľkých sériových radov batérii. Týmto zapojením sa dosahuje zvýšenie výstupného napätia spoločne so zvýšením kapacity batériového systému.



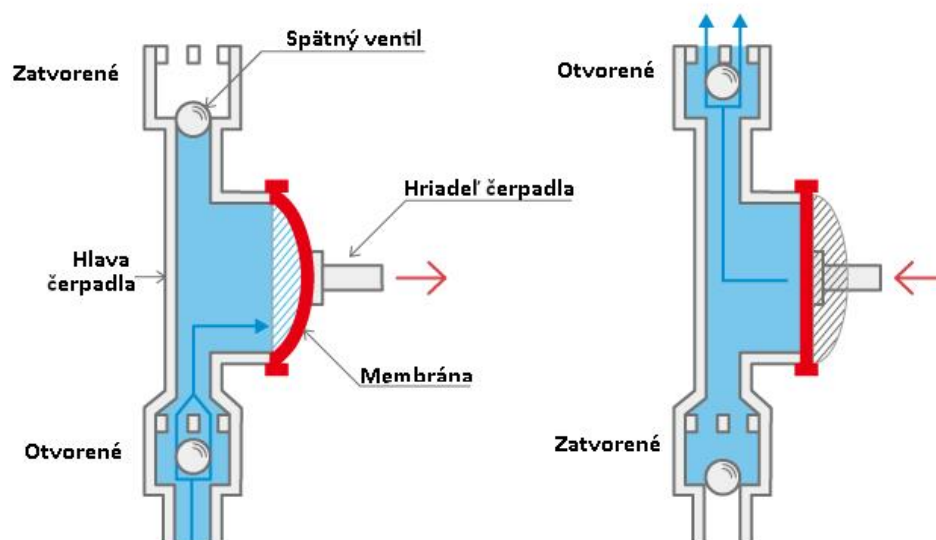
Obrázok 9 Sériovo-paralelné zapojenie batériových článkov

4. ELEKTRICKÉ ČERPADLO

Existujú viaceré druhy elektrických čerpadiel, ktoré sa rozlišujú podľa výkonu, veľkosti či typu práce s vodou. Pre účely kompaktného systému solárneho zavlažovania je vhodnejšie samo-nasávacie membránové čerpadlo. Tento druh elektrického čerpadla je vhodný z dôvodu samo-nasávania, keďže cieľom je vytvorenie zariadenia, ktorého vstupná hadica sa vloží do vody a zariadenie bude schopné samostatne pracovať. Tieto čerpadlá sú navyše dostupné vo vyhovujúcich veľkostiach, majú menovitý výkon od 72 W a s prietokom až 6 lit/min predstavujú správnu voľbu pre solárne zavlažovanie.

4.1 Funkcia membránového čerpadla

Membránové čerpadlo pre nasávanie a vytlačenie vody využíva tlak vytvorený pulzovaním. Ako napovedá názov, hlavnou časťou membránového čerpadla je membrána. Tá za pomoci hriadeľu robí pohyb dopredu a dozadu, čím vytvára pulzujúci pohyb a rozdiely tlaku v hlave čerpadla. Ako ukazuje obrázok 5, pri nasávaní vody sa membrána posúva dozadu a vytvára podtlak, ktorým sa východ z čerpadla uzavrie a vchod do čerpadla otvorí, čím sa do čerpadla dostáva voda. Pri pohybe dopredu sa vchod uzatvorí a východ z čerpadla otvorí, pričom tlakom membrány je voda vytlačená von.



Obrázok 10 Funkcia membránového čerpadla, preložené z [20]

V reálnom membránovom čerpadle sú pre zaistenie súvislého toku vody takéto hlavice paralelne vedľa seba dve. Ako napájanie sa využíva striedavý elektrický signál, kedy sa pri kladnej vlne jedna hlavica otvorí a druhá zavrie, pričom pri zápornej vlne nastane výmena tohto pohybu.

5. MIKROKONTROLÉR AKO RIADIACA JEDNOTKA

Mikrokontrolér je tvorený mikroprocesorom s perifériami na jednom čipe. Perifériami môžu byť časovače, komunikačné porty ako UART, I2C a podobne. Procesorovou jednotkou mikrokontroléru je 8, 16, 32 alebo 64 bitový mikroprocesor. Počet bitov určuje množstvo dát, ktoré je možné naraz spracovať jednou inštrukciou mikroprocesora. Hlavnou úlohou mikrokontroléru je pomocou navrhnutého algoritmu detegovať a reagovať na vonkajšie podnety, ako napríklad vstupné signály z USB portu, senzorov alebo rôznych iných druhov sériových komunikácií, ktoré daný mikrokontrolér podporuje.

5.1 Základné komponenty mikrokontroléru

5.1.1 Centrálna procesorová jednotka

Základným prvkom mikrokontroléru je centrálna procesorová jednotka (CPU). CPU je súčasťou mikrokontroléru, ktorá spracováva a vykonáva inštrukcie v zadanom programe pomocou matematických a logických funkcií. Ďalšou funkciou je kontrola a monitoring operácií dejúcich sa v mikrokontroléru.

5.1.2 Vnútorý oscilátor

Oscilátor predstavuje zdroj hodinového signálu mikrokontroléru, čím udáva jeho frekvenciu. Oscilátory môžu byť vnútorné alebo vonkajšie. Vnútoré oscilátory sú zabudované na čipe a sú tvorené z RC článku. Vonkajšie oscilátory tvoria samostatnú súčasť a sú zostrojené pomocou kryštálu. Kryštály sú tvorené z piezoelektrického materiálu a využívajú mechanickú osciláciu na tvorenie elektrického signálu s presnou frekvenciou.

5.1.3 Pamäť eeprom a flash

Pamäte eeprom a flash umožňujú elektronické zapisovanie a vymazávanie dát bez ich straty po odpojení napájania. Pamäť flash je typ eeprom, pričom rozdiel spočíva v zápise a vymazávaní dát po blokoch, nie po jednotlivých bitoch. Výhoda pamäte typu flash je v rýchlosti práce s dátami. Avšak zapisovanie a vymazávanie po blokoch predstavuje aj nevýhodu v nemožnosti prístupu k jednotlivým dátam. V mikrokontroléroch sa pamäť typu eeprom využíva ako dátová pamäť a typ flash ako programová pamäť. V prípade nedostatku ukladacieho priestoru je možné pripojiť externú pamäť.

5.1.4 Pamäť RAM

RAM ukladá dáta po dobu, kým nie sú opäť prepísané alebo nie je odpojené napájanie. Dáta môžu byť výsledky alebo medzivýsledky operácií mikrokontroléru, ktoré sa do nej pre zrýchlenie operácii ukladajú. Dáta z RAM sú dostupné len počas zapojeného

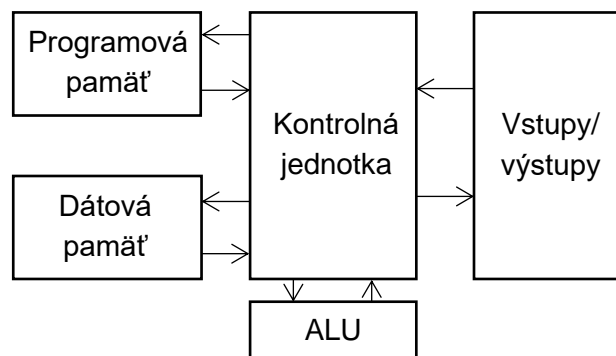
napájania, kedy sa ukladajú v pamäťových bunkách. RAM sa ďalej delí na SRAM a DRAM pamäť. Vo veľkom počte mikrokontrolérov sa využívajú pamäte SRAM, ktoré sú tvorené z niekoľkých CMOS tranzistorov, pričom ich výhodou je dĺžka doby, na ktorú dokážu dáta uložiť, a taktiež rýchlosť odozvy.

5.1.5 Vstupno/výstupné porty

Vstupné a výstupné porty slúžia na komunikáciu mikrokontroléru s vonkajšími komponentami. Skrz vstup je taktiež realizované napájanie. Komunikácia môže prebiehať cez USB, ethernet, kde sa dáta prenášajú vo väčších bitových blokoch alebo pomocou rôznych typov sériovej komunikácie ako I2C, UART, RS-232..., pri ktorej sa dáta prenášajú po jednotlivých bitoch.

5.2 Architektúra mikrokontrolérov

Oddelenie programovej pamäte a dátovej pamäte v Harvardskej architektúre umožňuje mikrokontrolérom zvýšiť procesnú rýchlosť. Procesná rýchlosť spočíva v rýchlosti aritmeticko-logickej jednotky (ALU), ktorá je uložená v CPU, a taktiež v zrýchlení prístupu k dátam skrz oddelené dátové toky, ktoré môžu mať vzhľadom na potreby mikrokontroléru nastavené rozličné šírky.



Obrázok 11 Harvardská architektúra

5.3 Raspberry Pi Pico

Raspberry Pi Pico je mikrokontrolér zo série výrobkov Raspberry Pi, ktorý je možné programovať v jazyku C/C++ alebo Phyton. Programovanie je možné po prepojení mikrokontroléru s jednodoskovým počítačom Raspberry alebo s akýmkoľvek iným počítačom obsahujúcim kompatibilné softvérové rozhranie. Tento mikrokontrolér obsahuje RP2040 mikroprocesor, ktorý pozostáva z dvojjadrového čipu s frekvenciou 133 MHz a 264 kB vstavenej SRAM pamäte. Raspberry Pi Pico ďalej obsahuje 26 univerzálnych, vstupno/výstupných konektorov, z ktorých sú 3 analógové vstupy, 2 sú určené na UART, 2 na I2C a 2 na SPI komunikáciu, 16 z 26-tich sú ovládateľné PWM kanály a 8 sú I/O stavové automaty [21].

5.3.1 Kompatibilita so systémom solárneho zavlažovania

Raspberry Pi Pico predstavuje kompaktné riešenie pre systém solárneho zavlažovania. Medzi hlavné výhody patria jeho rozmery (51 x 21 mm), vďaka ktorým nezaberie príliš veľa miesta a veľké množstvo univerzálnych konektorov, ktoré sa dajú využiť pre sériovú komunikáciu napríklad so senzorom vlhkosti pôdy. Výhodou je tiež dvojjadrový mikroprocesor, ktorý zvládne veľké množstvo operácií, ale aj overená kvalita výrobkov Raspberry Pi spojená s nízkou cenou a možnosťou budúceho rozširovania systému solárneho zavlažovania.

6. NÁVRH SOLÁRNEHO ZAVLAŽOVANIA

Kompaktná jednotka solárneho zavlažovania by mala počas slnečného dňa dodať rastline dostatočné množstvo vody pre správnu výživu a rast. Dostatočné množstvo vody je pre každý druh rastliny či zeleniny subjektívny parameter, preto je dôležité vybrať komponenty zariadenia a nastaviť procesy spojené so zavlažovaním tak, aby dokázali pokryť aj potrebu rastlín s vysokým zavlažovacím nárokom. Následne bude možné zmenou softvérového nastavenia upraviť potreby zalievania aj na menšie objemy vody s vyššou frekvenciou spúšťania alebo väčšie objemy vody menej-krát za slnečný deň.

6.1 Parametre zavlažovania a výber hlavných komponentov

Výber komponentov je úzko spätý s požadovanými výstupnými parametrami zariadenia. Začína sa výberom čerpadla a určením najdôležitejšieho parametru zavlažovacieho procesu, čím je objem prečerpanej vody v jednej perióde.

6.1.1 Proces zavlažovania

Samo-nasávacie čerpadlo by malo disponovať dostatočným prietokom vody pre efektívne zavlažovanie, pričom jeho výkonové požiadavky by mali byť splniteľné pre jednotku solárneho zavlažovania. Takýmto čerpadlo je model FL-3308, jeho technické parametre sú:

Tabuľka 4 Technické údaje FL-3308

Napájanie	[V]	9 – 14,4
Príkon	[W]	70
Tlak	[MPa]	0,9
Prietok	[l/min]	4 – 6
Životnosť	[h]	500 – 1000

Pri uvažovaní najnižšej nožnej rýchlosti prečerpávania vody, čo podľa tabuľky 4 je 4 lit/min, by tomuto čerpadlu malo stačiť dvanásť a pól minúty pre prečerpanie päťdesiatich litrov vody. Päťdesiat litrov vody predstavuje objem, s ktorým je pri správnom rozmiestnení vodovodných ciest a zalievaní aspoň 3-krát za deň možné dostatočne zaliať priemernú záhradu. Potom sa spotrebovaná energia vypočíta ako

$$E_{CERP} = P \cdot t = 70 \cdot 12,5 = 875 \text{ Wmin} = 14,58 \text{ Wh}. \quad (2)$$

Energia pre čerpadlo bude dodávaná z nabíjateľných batérií typu Li-ion, modelu 18650, ktoré disponujú nominálnym napätím 3,7 V a kapacitou 2600 mAh. Pri sériovom zapojení troch batérií bude napätie celku 11,1 V, pri maximálnom napätí článku (4,2 V) bude napätie celku 12,6 V. S kapacitou 2600 mAh sú pri maximálnom napätí tieto batérie schopné dodať energiu

$$E_{BAT} = Q \cdot U = 2600 \cdot 12,6 = 32760 \text{ mWh} = 32,76 \text{ Wh}. \quad (3)$$

Energia 32,76 Wh predstavuje celkovú uloženú energiu batérií, ktorú sú schopné dodať od maximálneho po vypínacie napätie. Z výpočtov vychádza, že po procese zalievania budú batérie disponovať energiou

$$E_{FIN} = E_{BAT} - E_{CERP} = 32,76 - 14,58 = 18,18 \text{ Wh} . \quad (3)$$

Uložená energia 18,18 Wh by nemala znížiť napätie batérii na kritickú úroveň, ani sa priblížiť k jej blízkosti. Vo výpočte nie je zahrnutá energia zo solárneho panelu, ktorá bude aj počas zapnutého čerpadla zariadením prijímaná. Kvôli životnosti batérii bude primárne využívané napätie od maximálnej hodnoty 4,1 V po približne 3,6 V. Keďže čerpadlo nebude predstavovať jediný prúdový odber, tak výsledky napovedajú, že tri sériovo zapojené batérie by mali byť schopné dodať dostatočný výkon pre čerpadlo, ako aj zabezpečiť napájanie celého systému solárneho zavlažovania.

6.1.2 Proces nabíjania batérií

Jeden z dôležitých parametrov solárneho zavlažovania, ako aj jeho hlavná výhoda voči klasickému zavlažovaniu kŕhlou, je automaticky časované zavlažovanie viac-krát do dňa. Aby toto zavlažovanie bolo efektívne, tak rýchlosť nabíjania batérií musí byť dostatočne efektívna. Rýchlosť nabíjania priamoúmerne závisí od výkonu solárneho panelu, pričom čas potrebný na nabitie batérií sa dá vypočítať pomocou ich nominálnej kapacity a prúdu vyprodukovaného solárnym panelom ako

$$t = \frac{Q}{I} . \quad (4)$$

Výkon, ako aj výstupný prúd solárneho panelu sú dôležitými parametrami. Pri nízkom výkone sa môže stať, že proces zalievania prebehne len raz denne, čo je nežiadúce. Vysoký výstupný výkon môže spôsobiť príliš rýchle nabitie batérií, ktoré síce nemusia nutne viesť k príliš vysokej vlhkosti pôdy, keďže každé dva procesy zalievania budú od seba oddelené minimálnym časovým intervalom. Avšak potenciál solárneho panelu by nebol naplno využitý a jeho kúpa by bola ekonomicky nesprávnou voľbou.

Výkonovú kompatibilitu predstavuje polykryštalický solárny panel 12 V/10 W, ktorý má rozmery 370x250x18mm a technologické parametre:

Tabuľka 5 Technologické parametre solárneho panelu

Max. napätie na prázdno, V_{OC} [V]	21,58
Max. skratový prúd, I_{SC} [A]	0,64
Max. napätie pri záťaži 10 W [V]	1742
Max. prúd pri 10 W [A]	0,57

Pri použití troch sériovo zapojených batérií s kapacitou 2600 mAh bude dĺžka nabíjania pri priamom slnku s maximálnym dodávaným prúdom rovná

$$t = \frac{2600 \cdot 10^{-3}}{0,57} = 4,57 \text{ h.} \quad (5)$$

Tento čas predstavuje dĺžku nabíjania od vypínacieho napätia po plný stav nabitia. V skutočnosti sa batérie nebudú úplne vybíjať. Po energetickom odbere čerpadla 14,58 Wh, napätí 12,3 V a maximálnom prúde solárneho panelu 0,57 A bude dĺžka nabíjania

$$E = Q \cdot U \Rightarrow Q = \frac{E}{U} = \frac{14,58}{12,30} = 1,19 \text{ Ah,} \quad (6)$$

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{1,19}{0,57} = 2,09 \text{ h.} \quad (7)$$

Celkový čas medzi dvomi zavlažovacími cyklami je približne 2,09 h, čo predstavuje 125 minút. Variabilnou premennou je prúd dodávaný solárnym panelom, ktorý aj počas procesu zavlažovania dodáva do systému energiu, čo môže znížiť úroveň vybitia batérií a skrátiť dobu nabíjania. Avšak v časovom okne dobíjania batérií nemusí vždy dosahovať maximálnych prúdových hodnôt, vďaka čomu sa celkový čas nabíjania batérií môže predĺžiť. Dôležitým faktom je, že batérie sa nabíjajú najrýchlejšie pri najväčšej intenzite slnečného žiarenia, takže práve vtedy, keď budú rastliny potrebovať závlahu.

6.1.3 Kontrolné meranie vlhkosti pôdy

Meranie vlhkosti pôdy môže zabrániť prepolievaniu rastlín v prípade zavlaženia vďaka krátkemu letnému dažďu alebo inému náhodnému javu. Komerčne najdostupnejšie sú kapacitné senzory merania vlhkosti pôdy. Tieto senzory obsahujú antikoroznú sondu a vlastnú elektroniku, ktorá je umiestnená na vrchnej časti senzoru. Senzor vlhkosti pôdy sa pripája pomocou pinu napájania, zeme a pinu, ktorého analógovým výstupom je spracovaný signál zo sondy.



Obrázok 12 Kapacitný senzor vlhkosti pôdy [22]

Kapacitný senzor sa skladá z kladného a záporného pólu kondenzátora, medzi ktorými sa nachádza dielektrikum. Zmeny elektrického náboja v dielektriku spôsobujú zmenu kapacity, ktorá je úmerná napätiu vyprodukovanému osadenou elektronikou v analógovej podobe. Analógový pin mikrokontroléru tento signál prevedie na digitálnu podobu, ktorú môžeme označiť za vlhkosť pôdy. Hodnota signálu odpovedajúca minimálnej vlhkosti pôdy sa zistí meraním vo vzduchu a hodnota odpovedajúca maximálnej vlhkosti vložением senzoru do vody. Počas zisťovania krajných hodnôt, ako aj počas merania vlhkosti v zemi je dôležité, aby sa voda alebo vyššia vlhkosť nedostala do časti s elektronikou. Tento senzor je kompatibilný s 3,3 V aj 5 V napájaním, vďaka čomu vyhovuje mikrokontroléru Raspberry Pi Pico.

6.1.4 Aditívny proces hnojenia

Hnojenie predstavuje jeden z aditívnych procesov k jednotke solárneho zavlažovania. Najjednoduchší spôsob hnojenia, ktorý nezníži kompaktnosť celého systému, je vmiešavanie tekutého hnojiva priamo do vody počas procesu zalievania. Existujú dva spôsoby vmiešania tekutého hnojiva do vody. Prvým je zapojenie sekundárneho čerpadla, ktoré bude napájané z hlavnej batérie a vykonávaním práce bude vmiešavať hnojivo do hlavného prúdu vody. Druhým je použitie elektromagnetického ventilu a tlaku kvapaliny pôsobiacej na ventil. Nevýhodou elektromagnetického ventilu je fakt, že tlak kvapaliny na ventil sa bude postupným mŕňaním hnojiva znižovať. Z čoho vyplýva, že softvérovo nastavený čas zopnutého ventilu premiestni pri plnej nádrži hnojiva iné množstvo kvapaliny, ako keď bude nádrž skoro prázdna. Použitím čerpadla sa síce zvýši energetická náročnosť systému, avšak prietok hnojiva do hlavného kanálu vody bude vždy konštantný, čím sa doieli ucelený proces hnojenia rastlín.



Obrázok 13 Sekundárne čerpadlo JT-DC3L

Hnojivo, ktoré bude použité v tomto komplexe má pri aplikácii pomer 15 ml na 1 liter vody. Radou experimentov bolo určené, že pri napájaní na 5 V dokáže JT-DC3L prečerpáť 1 liter vody za priemerný čas 27 sekúnd. Ak hlavné čerpadlo vody prečerpá každú minútu 5 litrov vody, tak čerpadlo hnojiva bude musieť pre zachovanie pomeru prečerpáť počas každej minúty 75 mililitrov hnojiva. Pri jeho prečerpávajúcej rýchlosti 1 liter za 27 sekúnd, po prevedení 37 mililitrov za 1 sekundu vychádza, že pre každú začatú minútu zalievania bude sekundárne čerpadlo zapnuté po dobu 2 sekúnd. K tomuto času sa pripočíta 0,5 sekundy, čo je čas potrebný pre nasatie hnojiva do čerpadla a jeho presun skrz trubicu do hlavného prietoku vody.

Počas prečerpávania päťdesiatich litrov vody bude najefektívnejším spôsobom vmiešania hnojiva neprerušené zapnutie sekundárneho čerpadla na časový interval 20,5 sekúnd. Počas tohto intervalu sa prečerpá 760 mililitrov hnojiva, čo po ukončení zavlažovania a prečerpaní 50 litrov vody značí 15 ml na 1 liter vody.

6.1.5 Kontrolné meranie prietoku kvapalín

Počas procesu zalievania alebo počas procesu hnojenia môže nastať situácia, pri ktorej jedno z čerpadiel nebude schopné prečerpávať vodu alebo hnojivo. Táto situácia

môže byť napríklad minútie kvapaliny v nádrži alebo zapchatie prívodnej či vývodnej hadičky listom, či iným náhodným objektom. V tom momente je nutné proces zavlažovania alebo hnojenia zastaviť a počkať na odstránenie chyby. Aby bolo možné proces zastaviť a tým pádom zabrániť zničeniu čerpadla, budú do zariadenia solárneho zavlažovania pridané senzory prietoku kvapaliny. Pre merania prietoku vody bude použitý senzor YF-S201, ktorý dokáže merať objemy prietokov od 1-30 L/min, tento senzor je zobrazený na obrázku 14. Meranie prietoku hnojiva bude kontrolovať senzor YF-S401, ktorý meria objemy od 0,3-6 l/min, vďaka čomu je kompatibilný s menej výkonným čerpadlom JT-DC3L.

Oba senzory prietoku majú 3 vývody, prvým je napájanie na 5 V, druhý zem a tretím pulzný signál, ktorý môže byť pripojený na digitálny pin mikrokontroléru. Pulzný signál je charakteristický obdĺžnikovým priebehom, kedy počítaním zostupných hrán počas časového úseku, napríklad jednej sekundy, je možné určiť hodnotu prietoku kvapaliny.

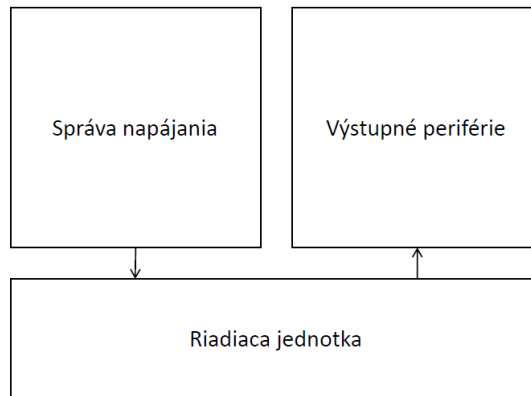
Senzory prietoku využívajú Hallov javu. Magnetický rotor vo vnútri senzoru sa otáča priamoúmerne rýchlo s rýchlosťou prietoku kvapaliny, kedy toto otáčanie zaznamenáva snímač Hallovho javu, ktorý na základe prietoku moduluje striedu pulzného signálu.



Obrázok 14 Senzor prietoku kvapaliny YF-S201

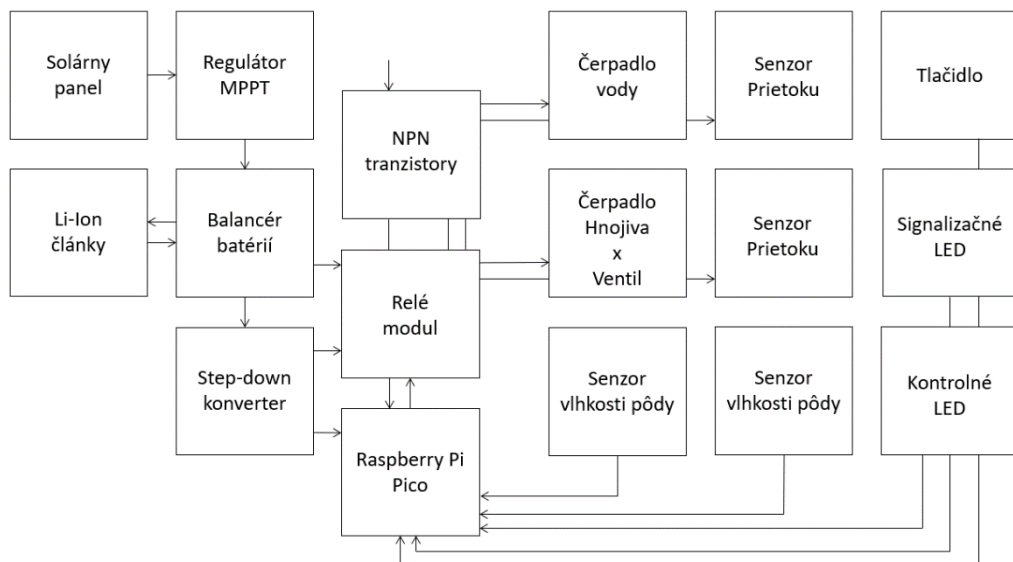
6.2 Návrh blokových schém

V najvyššej úrovni blokového popisu solárneho zavlažovania je možné tento systém rozdeliť do troch základných blokov. Prvým blokom je správa napájania, ktorého úlohou je premena energie fotónov na energiu elektrickú. Kritickým bodom je pokrytie všetkých úrovní výstupného výkonu vyžadovaného riadiacou jednotkou, alebo následne výstupnými perifériami. Riadiaca jednotka spája správu napájania a výstupné periférie, pričom rozhoduje o využívaní uloženej energie a kontroluje procesy, čím zabraňuje vzniku chyby a poškodeniu zariadenia. Výstupné periférie predstavujú všetky zariadenia potrebné k premene elektrickej energie na mechanickú a taktiež zariadenia k vytváraniu dát z interných či externých senzorov.



Obrázok 15 Blokové schéma vyššej úrovne

Nižšia úroveň predstavuje detailnejší popis blokovej schémy z obrázku 15. Funkcia a význam jednotlivých blokov je popísaná v nadchádzajúcich podkapitolách.

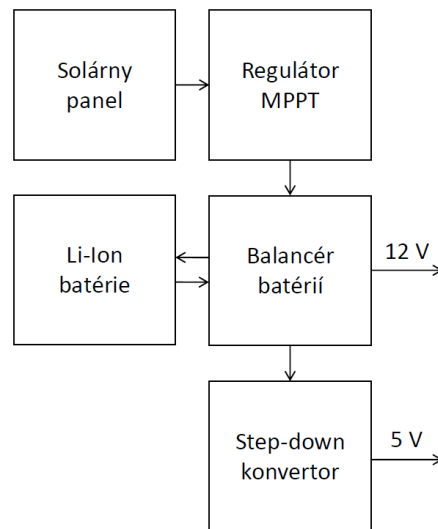


Obrázok 16 Blokové schéma nižšej úrovne

6.2.1 Správa napájania

Správa napájania zodpovedá za premenu a ukladanie elektrickej energie. Skladá sa z piatich hlavných blokov. Okrem solárneho panelu a Li-Ion batérií, ktorých funkcia bola popísaná v predchádzajúcich kapitolách, tento blok obsahuje regulátor MPPT, balancér batérii a step-down konvertor. Regulátor MPPT sleduje bod maximálneho výkonu solárneho panelu v ktorom volí odber energie, čím zabezpečuje jej maximálne využitie a zvyšuje efektivitu systému. Balancér batérií vyrovnáva napätia viacerých článkov sériovo zapojených batérií, pričom ich chráni pred preťažením, prebitím a vybitím. Sériovo zapojené batérie udržuujú výstupný prúd, zatiaľ čo ich napätia sa sčítavajú, čím je možné dosiahnuť dostačujúci výstupný výkon napríklad pre čerpadlo vody. Napájanie

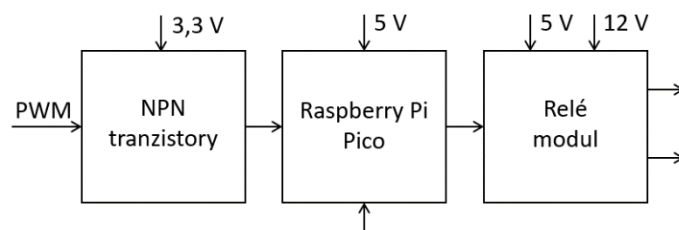
mikrokontroléru alebo iných zariadení si nevyžaduje tak veľký výkon, kvôli čomu bol do blokovej schémy zabudovaný step-down konvertor.



Obrázok 17 Blokové schéma správy napájania

6.2.2 Riadiaca jednotka

Hlavnou časťou riadiacej jednotky je mikrokontrolér Raspberry Pi Pico. Kvôli vysokým výkonom schopných poškodiť tento mikrokontrolér sa väčšina procesov neriadi priamo ale nepriamo skrz spínanie relé modulov. Signály z merania napätia batérie alebo merania vlhkosti pôdy sú prijímané priamo mikrokontrolérom, čo značí šípka dovnútra zo spodnej strany. Maximálne napätie jednotlivých pinov je 3,3 V aj napriek tomu, že mikrokontrolér má napájacie napätie 5 V. Sensory prietoku pracujú s piatimi voltami, ktoré by po pripojení mikrokontrolér zničili. Riešenie sa nachádza jednoduchom prevodníku úrovni 5 V na 3,3 V, ktorý je tvorený NPN tranzistormi.

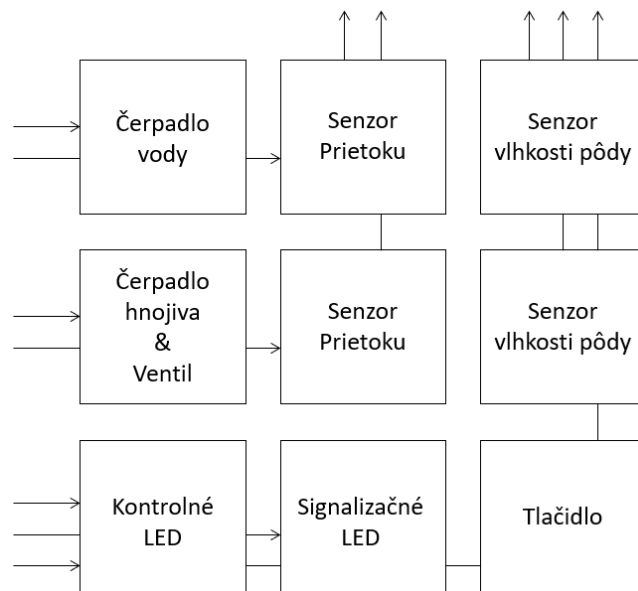


Obrázok 18 Blokové schéma riadiacej jednotky

6.2.3 Výstupné periférie

Medzi výstupné periférie patrí čerpadlo vody, ktoré poberá najväčší výkon v celom systéme solárneho zavlažovania. Ďalej tam patrí čerpadlo hnojiva, ktorého spínaním sa bude do hlavného toku vody vmiešavať tekuté hnojivo. Spoločne s ním je v bloku aj ventil. Ventil sa bude spínať v moment zapnutia čerpadla hnojiva, pričom zabráni spätnému toku vody do nádrže s hnojivom počas intervalu prečerpania vody, a taktiež

k samovoľnému prečerpaniu hnojiva z nádrže vplyvom rozdielu v tlakoch medzi vyššie postaveným zariadením a na zemi rozvedenými cestami zavlažovania. Posledným krokom pred prečerpaním kvapalín do pôdy je prechod skrz prietokomery, vďaka čomu sa môže proces zavlažovania vypnúť pred zničením čerpadiel. Dva senzory vlhkosti pôdy majú svoj analógový výstup prepojený s mikrokontrolérom, ktorý kontroluje prijaté dáta o obsahu vody v pôde a môže zabrániť prepolievaniu rastlín. V poslednom riadku sa postupne nachádzajú kontrolné LED svetlá pripojené k výstupom relé modulov, čo umožní kontrolu funkčnosti výstupných periférií pri nečakanej chybe. Signalizačné LED, ktoré sa budú skladať z jednej červenej a jednej zelenej vysoko svietivej LED diódy. Spínať sa budú skrz NPN tranzistory, a to z dôvodu obmedzeného výstupného prúdu použitého mikrokontroléru. Tieto svietidlá budú umiestnené tak, aby ich používateľ mohol vidieť bez otvárania zariadenia a budú signalizovať úspešný štart a vypnutie zariadenia, ukončenie zalievania či chybu počas jeho procesu a taktiež zapnutie procesu hnojenia do ďalšieho cyklu zavlažovania. Posledným blokom je tlačidlo, vďaka ktorému bude možné inicializovať proces hnojenia a zapnúť či vypnúť zariadenie.



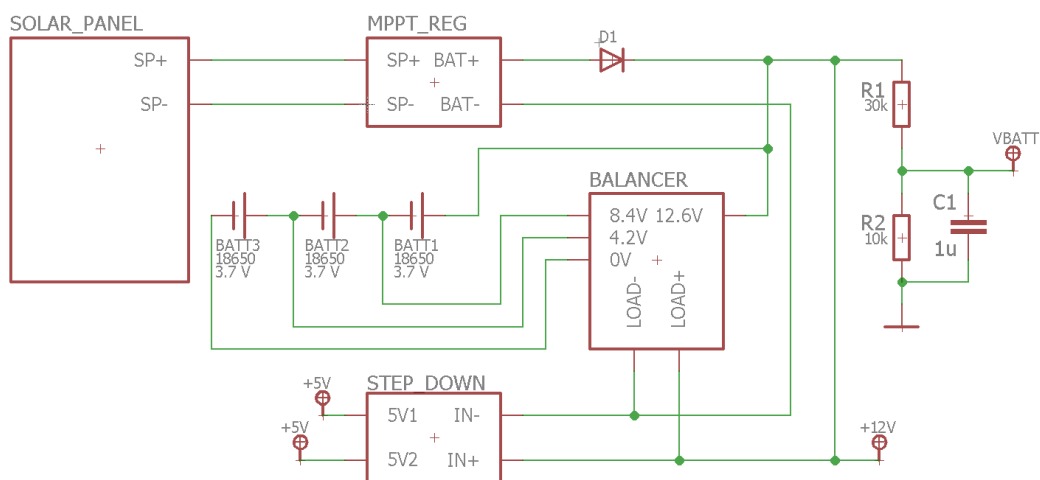
Obrázok 19 Blokové schéma výstupných periférií

6.3 Elektrický návrh zapojenia

Návrh schémy zapojenia sa odráža od blokovej schémy nižšej úrovne zobrazenej na obrázku 15. Návrh zobrazuje všetky bloky v obrázku 16 v podobe elektrického zapojenia jednotlivých súčiastok tak, ako to má v dátovom liste určené výrobca, ďalej zobrazuje všetky potrebné prepojenia a pomenovania jednotlivých pinov a spojov.

6.3.1 Batériový manažment a vytváranie napät'ových okruhov

Zapojenie začína solárnym panelom, ktorý má + a – pin, tieto piny budú pripojené do MPPT regulátora, ktorého požadované výstupné napätie bude nastavené na 12,3 V, čím nebude dochádzať k nabíjaniu batérií na maximálnu úroveň, vďaka čomu sa zvýši ich životnosť. Ďalej bude na MPPT regulátore nastavený bod, kedy po zapojení solárneho panela tečie do batérie najvyšší prúd a taktiež požadované výstupné napätie batérií. Výstup MMPT regulátoru bude skrz usmerňovaciú diódu pripojený na balancér troch Li-ion batérií. Balancér bude na batérie pripojený pomocou štyroch spojov, kvôli ktorým bude môcť zaznamenávať napätie každej batérie zvlášť a v prípade potreby balancovať nevyváženosť. Výstup balancéru, ako aj jeho 12,6 V pin budú pripojené na delič napätia. Delič delí v pomere 4:1 a vytvára prvý napät'ový okruh VBATT, ktorý bude pripojený do ADC pinu mikrokontroléru, kde sa vzhľadom na referenčnú hodnotu napätia bude merať napätie batérie. Druhý napät'ový okruh +12 V vytvára výstup z balancéru, tento okruh bude použitý na napájanie čerpadla vody a relé modulov. Výstup z balancéru bude taktiež napojený na step-down konvertor, ktorý má dva USB výstupy. Jeden USB výstup bude napájať mikrokontrolér, pričom druhý bude slúžiť ako napät'ový okruh +5 V pre napájanie čerpadla hnojiva, prietokomerov a senzorov vlhkosti pôdy. Posledný +3,3 V okruh bude tvoriť výstupné napätie mikrokontroléru, na ktoré budú pripojené niektoré kolektory NPN tranzistorov pre snímanie prietoku vody.

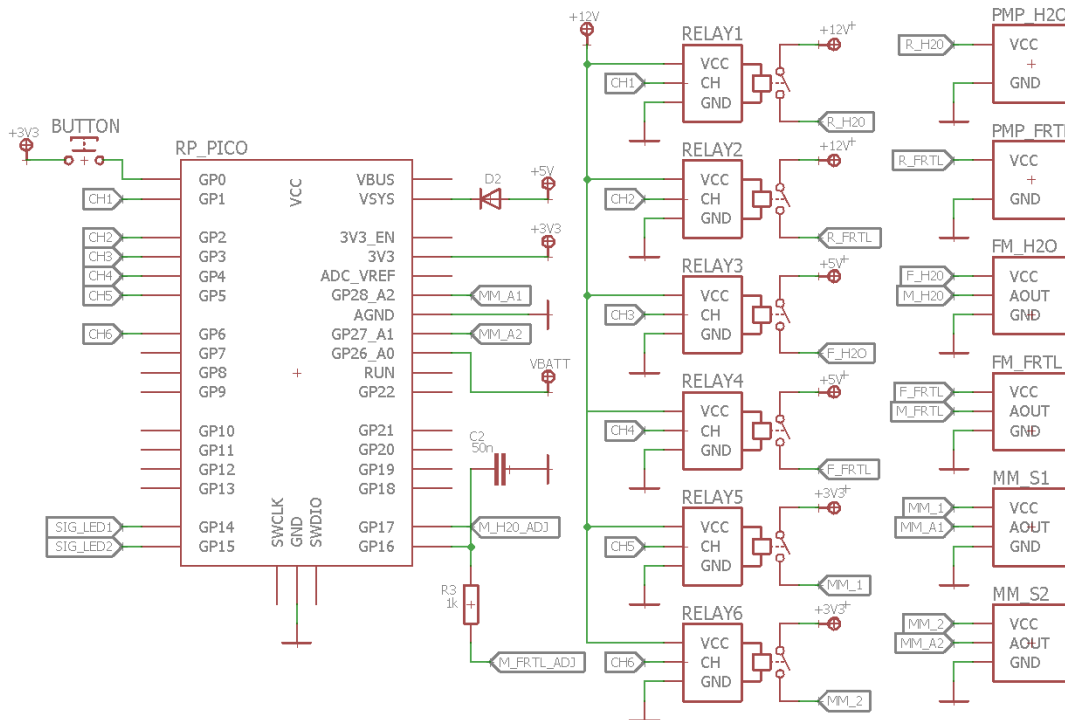


Obrázok 20 Schéma zapojenia batériového manažment s rozvodom napätí

Tabuľka 6 Prehľad názvov z obrázku 20

Názov	anglický jazyk	slovenský jazyk
SOLAR_PANEL	Solar panel	Solárny panel
BALANCER	Balancer	Balancér
BATT1 – 3	Battery 1 – 3	Batéria 1 – 3
R1 – 2	Resistor 1 – 2	Rezistor 1 – 2
C1	Capacitor 1	Kondenzátor 1
STEP_DOWN	Step Down Converter	Step-down konvertor

6.3.2 Zapojenie riadiacej jednotky s výstupnými perifériami



Obrázok 21 Schéma riadiacej jednotky a výstupných periférií

V ľavej časti obrázku 20 sa nachádza mikrokontrolér Raspberry Pi Pico, cez stred vedie séria relé modulov a pravú stranu vyplňajú výstupné periférie. Tieto zariadenia predstavujú, postupne z vrchu dole: čerpadlo vody, čerpadlo hnojiva, dva prietokomery a dva senzory vlhkosti pôdy.

Napájanie mikrokontroléru Raspberry Pi Pico bude sprostredkované skrz pin VSYS, kde bude napojené napätie +5 V zo step-down konvertoru. Pin GP28_A2 sníma napätie batérie zmenšené v pomere 4:1. Senzory vlhkosti pôdy majú analógový výstup, preto sú pripojené na zvyšné ADC piny GP26_A0 a GP27_A1. Na pin GP0 je pripojené tlačidlo. Pinami GP1 až GP6 je možné skrz kanály CH1 až CH6 ovládať relé moduly jedna až šesť. Tieto relé moduly sú napájané z 12 V a môžu spínať výstupné periférie. Výstup 5 V sekundárneho čerpadla je pripojený na 12 V vetvu pretože, tak ako naznačuje blokové schéma, je potrebné zopnúť relé modul, ktorý spína pri napätí +12 V. Toto napätie bude prevedené na +5 V až za ventilom. Oba senzory prietokov majú digitálne výstupy, ktoré sú pripojené na piny GP16 a GP17. Na výstup senzoru prietoku hnojiva je umiestnený RC filter prvého rádu, a to z dôvodu odfiltrovania rušenia, ktoré spôsobuje sekundárne čerpadlo, čím by mohlo ovplyvniť namerané hodnoty prietoku.

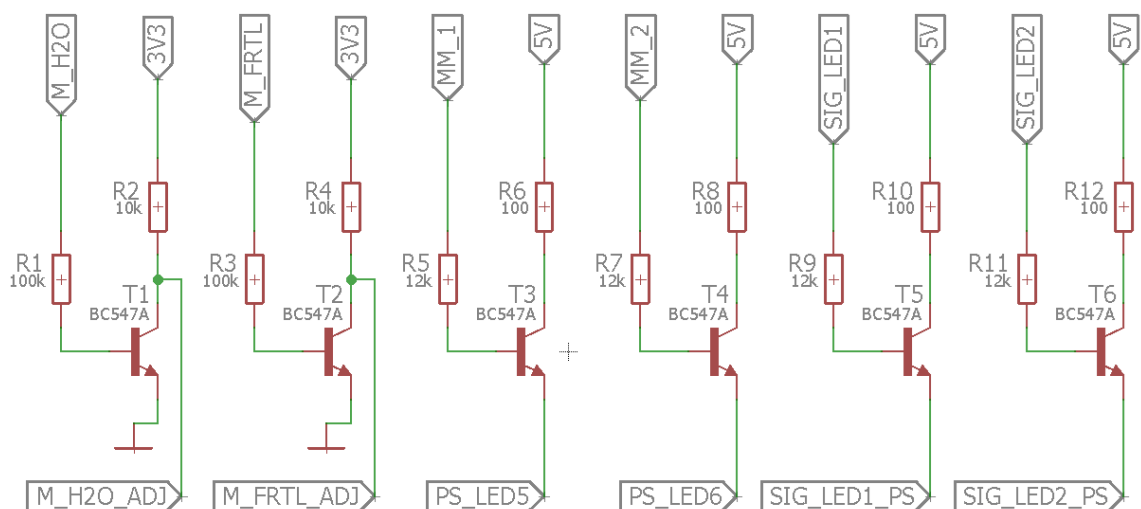
Senzory prietoku použitých kvapalín kontrolujú prietok vody vždy, keď ich program ohlási a zopne príslušný relé modul. Softvérovým nastavením by bolo možné nastaviť merania prietoku len na vymedzené časové úseky, napríklad pri štarte procesu alebo v jeho polovici. I keď sa výskyt chyby procesu s najväčšou pravdepodobnosťou objaví behom prvých desiatok sekúnd zavlažovania, tak aj na úkor väčšieho množstva minútej

energie bude bezpečnejšie, ak prietokomery budú snímať prietoky počas celej doby procesu.

Tabuľka 7 Prehľad názvov z obrázku 21

Skratka	anglický jazyk	slovenský jazyk
BUTTON	Button	Tlačidlo
CH1 – 6	Channel 1 – 6	Kanál 1 - 6
SIG_LED1 – 2	Signaling Led 1 – 2	Signalizačná LED 1 – 2
RELAY1 – 6	Relay 1 – 6	Relé 1 – 6
PMP_H2O	Pump H2O	Čerpadlo H2O
R_H2O	Relay H2O	Relé H2O
PMP_FRTL	Pump Fertilizer	Čerpadlo Hnojiva
R_FRTL	Relay Fertilizer	Relé Hnojiva
FM_H2O	Flow Measurement H2O	Senzor Prietoku H2O
F_H2O	Flow H2O	Prietok H2O
M_H2O	Measurement H2O	Meranie H2O
M_H2O_ADJ	Measurement H2O Adjusted	Meranie H2O Prispôsobené
FM_FRTL	Flow Measurement Fertilizer	Senzor Prietoku Hnojiva
F_FRTL	Flow Fertilizer	Prietok Hnojiva
M_FRTL	Measurement Fertilizer	Meranie Hnojiva
M_FRTL_ADJ	Measurement Fertilizer Adjusted	Meranie Hnojiva Prispôsobené
MM_S1 - 2	Moisture Measurement Sensor 1 – 2	Senzor vlhkosti 1 – 2
MM_1 - 2	Moisture Measurement 1 – 2	Meranie vlhkosti 1 – 2
MM_A1 - 2	Moisture Measurement Analog output 1 – 2	Analógový výstup merania vlhkosti 1 – 2

6.3.3 Návrh zapojenia NPN tranzistorov a signalizačných LED diód



Obrázok 22 Zapojenie NPN tranzistorov

Všetky použité NPN tranzistory budú modelu BC547A [23], jedná sa o tranzistory v puzdre TO92, s prúdovým zosilňovacím činiteľom $h_{21E} = 110$ až 220. Vďaka týmto tranzistorom bude umožnené spínanie napätia, ktoré by použitý mikrokontrolér výkonovo nezniesol. Z tohto dôvodu sú tranzistory zapojené ako spínače.

Na obrázku 22 je vidno šesť tranzistorov typu NPN, ktoré sú zapojené rovnakým spôsobom, avšak majú rozličné významy. Tranzistory T1 a T2 majú na kolektore pripojené napätie +3,3 V, pričom na báze sú vyvedené PWM signály zo senzorov prietoku, T1 pre vodu, T2 pre hnojivo. Kolektorový prúd tranzistora potom bude:

$$I_C = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{3,3}{10 \cdot 10^3} = 330 \cdot 10^{-6} A = 330 \mu A, \quad (8)$$

prúd bázou by mal byť h_{21E} krát menší:

$$I_B = \frac{I_C}{h_{21E}} = \frac{330 \cdot 10^{-6}}{110} = 3 \cdot 10^{-6} A = 3 \mu A. \quad (9)$$

Tento prúd by bol pre spoľahlivé otvorenie tranzistoru nedostatočný, pričom spoľahlivá hodnota by mohla byť na približne 10-krát väčšej úrovni $I_B = 30 \mu A$. Preto sa vzhľadom na túto hodnotu vypočíta veľkosť rezistoru R_1 ako

$$R_1 = \frac{U_{M_{H2O}} - U_{BE}}{I_B} = \frac{5 - 0,627}{30 \cdot 10^{-6}} = 145,77 \cdot 10^3 \Omega \cong 146 \text{ k}\Omega. \quad (10)$$

K dispozícii je rezistor veľkosti $R = 100 \text{ k}\Omega$, z čoho vyplýva výsledný prúd bázou tranzistoru T1

$$I_B = \frac{U_{M_{H2O}} - U_{BE}}{R} = \frac{5 - 0,627}{100 \cdot 10^3} = 43,73 \cdot 10^{-6} A = 43,73 \mu A. \quad (11)$$

Bázový prúd veľkosti $43,73 \mu A$ dokáže spoľahlivo otvoriť tranzistor, kedy počas vzostupnej hrany PWM signálu sa tranzistor otvorí, zvedie napätie kolektoru do zeme, čím vytvorí zostupnú hranu. Pri zostupnej hrane PWM signálu sa tranzistor opäť zavrie a napätie kolektoru stúpne na +3,3 V. Týmto spôsobom bude možné meraním zostupných hrán kolektorového napätia určovať prietok kvapaliny skrz prietokomery.

Maximálny odberový prúd Raspberry Pi Pico mikrokontroléru je 16 mA na jeden pin, pričom celkový prúdový odber zo všetkých pinov nemôže presiahnuť 51 mA. Prúd potrebný pre rozsvietenie jednej LED diódy sa pohybuje v intervale od 10 po 30 mA. Z čoho vyplýva, že použitý mikrokontrolér by nebol schopný rozsvietiť viac ako päť LED diód zároveň a pritom napájať dva senzory vlhkosti pôdy. Z tohto dôvodu boli tranzistory T3 až T6 určené pre spínanie dvoch kontrolných a dvoch signalizačných LED diód. Tranzistory T3 až T6 majú kolektorové napätie +5 V zo step-down konvertora. Tranzistory T5 a T6 svojím zopnutím rozsvietia vysoko svietivé signalizačné LED diódy. Bázové napätie spínajúce tieto tranzistory bude zo signálov SIG_LED1 a SIG_LED2, ktoré sú podľa obrázka 21 napojené na GPIO 14 a 15 mikrokontroléru. Ich napätie predstavuje výstupné napätie pinov mikrokontroléru, t.j. +3,3 V. S hodnotou bázových rezistorov R_9 a R_{11} 12 k Ω bude do ich báz tiecť prúd o približnej hodnote

$$I_{B_{T5,6}} = \frac{U_{MM_{1,2}} - U_{BE} - U_{LED}}{R} = \frac{3,3 - 0,627 - 2}{12 \cdot 10^3} = 222 \cdot 10^{-6} A = 52 \mu A. \quad (12)$$

a pri použití kolektorových rezistorov R10 a R12 100 Ω bude po otvorení tranzistoru skrz kolektor tiecť prúd h21E-krát väčší

$$I_C = h_{21E} \cdot I_B = 110 \cdot 52 \cdot 10^{-6} = 5,72 \cdot 10^{-3} A \cong 6 mA. \quad (13)$$

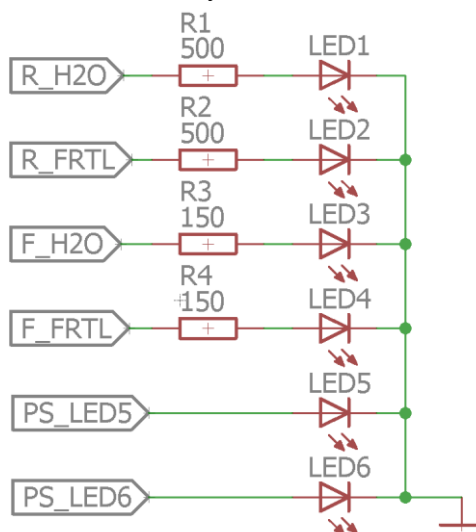
Tranzistory T3 a T4 majú rovnaké napät'ové aj prúdové podmienky, avšak signály pripojené na ich bázy taktiež napájajú senzory vlhkosti pôdy. Každý senzor vlhkosti pôdy má podľa dátového listu [24] prúdový odber 5 mA. Všetkých šesť tranzistorov a dva senzory vlhkosti pôdy majú spolu prúdový odber približnej veľkosti

$$I_{celk} = I_{C1} + I_{C2} + I_{B3} + I_{B4} + I_{B5} + I_{B6} + I_{MM_{1,2}} \cong 11,55 mA. \quad (14)$$

Kontrolné LED diódy sú pripojené na výstupné signály relé modulov, ktoré zobrazuje obrázok 21. LED1 je pripojená na čerpadlo vody, ktoré je napájané na 12V, potom výpočet veľkosti odporu rezistoru R1 je

$$R_1 = \frac{U_{R_{H20}} - U_f}{I_f} = \frac{12 - 2}{20 \cdot 10^{-3}} = 500 \Omega. \quad (15)$$

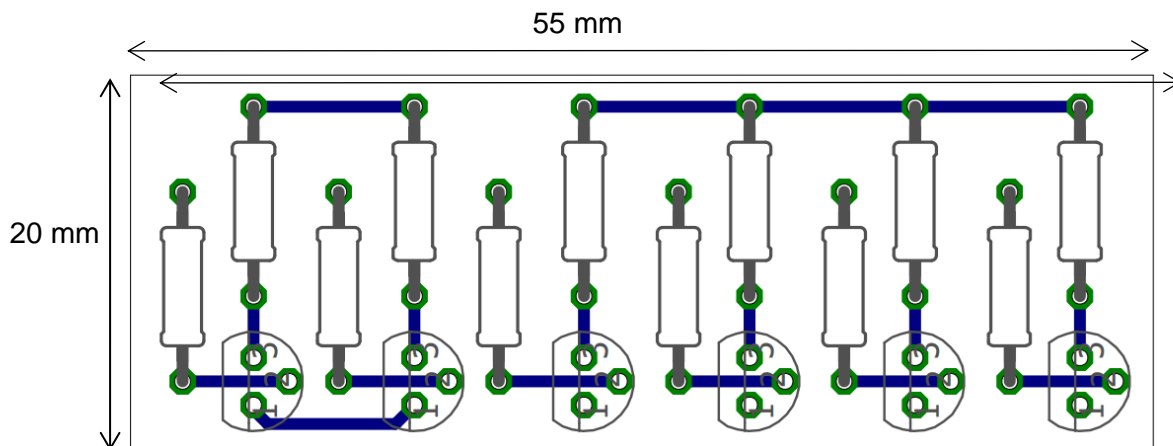
Podobne boli zistené aj veľkosti zvyšných odporov, pričom signály pre LED diódy 1 až 4 sa nachádzajú na obrázku 21 a LED diódy 5, 6 na obrázku 22.



Obrázok 23 Zapojenie LED diód

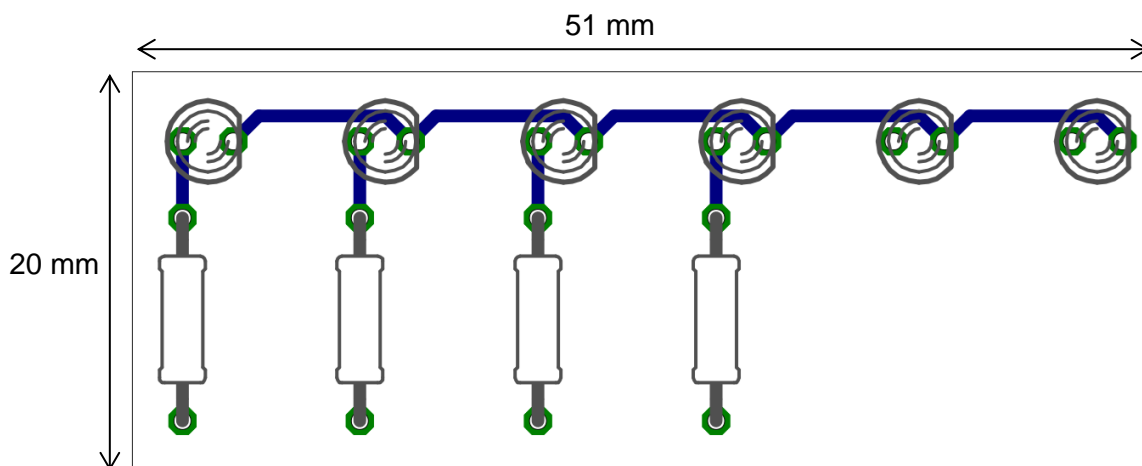
6.3.4 DPS NPN tranzistorov a signalizačných LED

Po určení hodnôt súčiastok a návrhov zapojení bolo navrhnuté rozmiestnenie súčiastok na doskách plošných spojov.



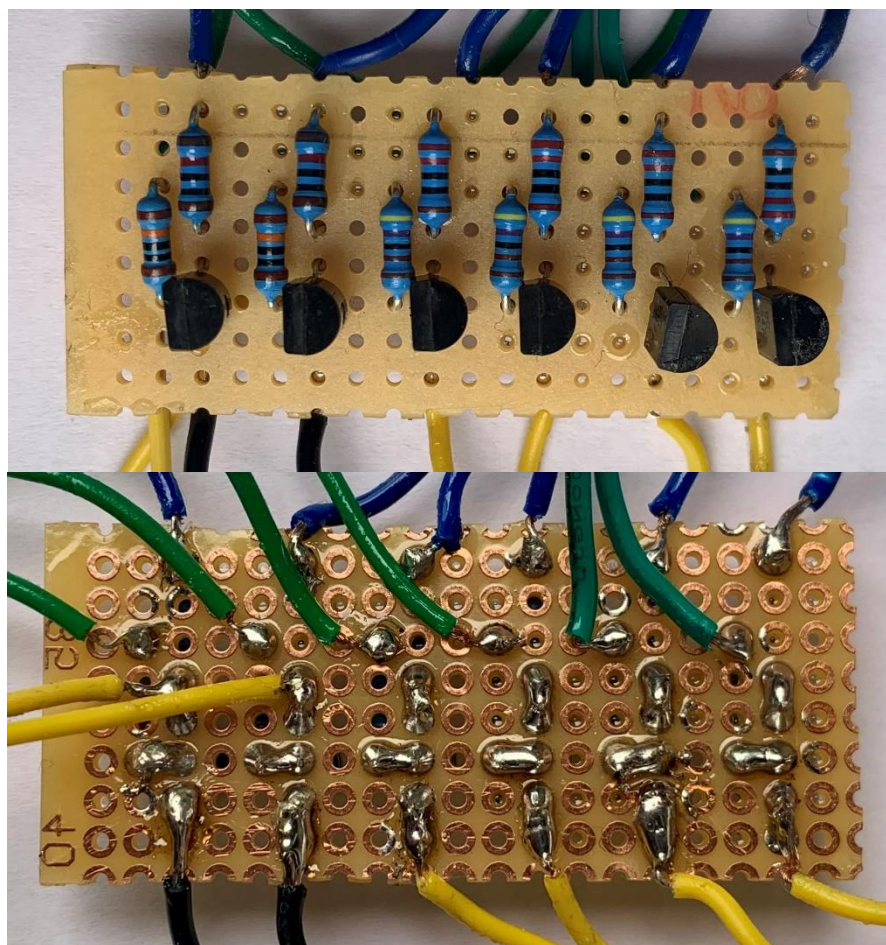
Obrázok 24 Rozmiestnenie NPN tranzistorov a príslušných rezistorov na DPS

Rozmery návrhu vyšli na 55 x 20 mm. Reálne zapojenie bude vytvorené na univerzálne vŕtanom spoji s guľatými bodmi, vďaka čomu sa konečné rozmery dosky plošných spojov môžu mierne zmeniť. Použité rezistory a tranzistoru budú typu THT, z toho dôvodu sú spoje vytvorené zo spodnej strany dosky.



Obrázok 25 Rozmiestnenie LED diód a príslušných rezistorov na DPS

Návrh rozmiestnenia LED diód s príslušnými rezistormi má podobné rozmery ako návrh rozmiestnenia NPN tranzistorov, a to 51 x 20 mm. Opäť budú všetky súčiastky typu THT. Na voľné piny rezistorov, LED diód či tranzistorov budú privedené signály v podobe káblu, ktorý bude k príslušnému pinu pripájaný pomocou spájky a spájkovačky. Pri spájaní bude použitá spájka typu Sn60Pb40, a to z dôvodu hladkého, lesklého a dobre formovateľného tvaru, výhodného zvlášť pre spájanie v nelaboratórnom prostredí, pričom vysoká pevnosť a schopnosť vyplňania otvorov sú len ďalšie výhody tejto spájky.



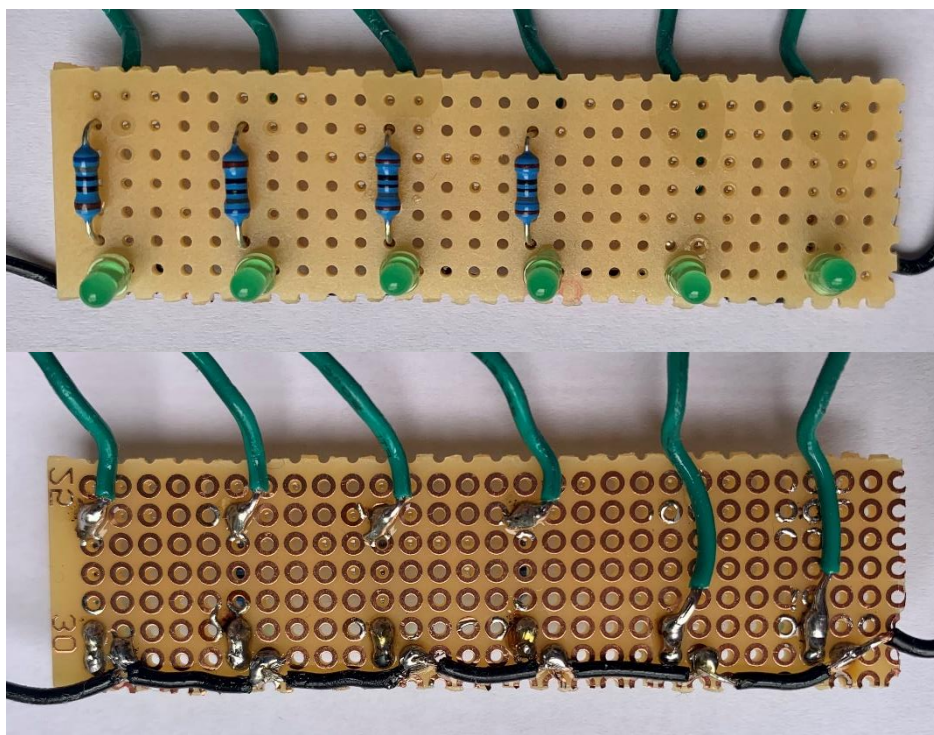
Obrázok 26 Vrchná a spodná strana DPS s NPN tranzistormi a rezistormi

Konečné rozmery tejto dosky plošných spojov sú 50 x 23 mm, čo približne zodpovedá teoretickému návrhu. Farebné vyznačenie káblov je nasledovné:

Tabuľka 8 Prehľad označenia káblov

Farba	Význam
Modrý kábel	Konektor tranzistoru
Zelený kábel	Báza tranzistoru
Žltý kábel	Užitný výstup, kolektor alebo emitor
Čierny kábel	Zem

Na spodnej časti fotky je možné pozorovať lesklú vrstvu. Po osadení a spájaní súčiastok bol na dosku nanesený ochranný lak, ktorý má primárne dve funkcie. Prvá je ochrana proti vlhkosti, ktorá sa môže v zariadení počas zmien teploty v letných dňoch vyskytnúť. Druhou funkciou je zvýšenie mechanickej fixácie. Pevná mechanická fixácia je dôležitá z dôvodu vyššieho stupňa vibrovania hlavného čerpadla, ktoré bude zariadenie pravidelne namáhať.



Obrázok 27 Vrchná a spodná strana DPS s LED diódami a rezistormi

Rozmery dosky plošných spojov sú 70 x 20 mm. I keď by bolo možné dĺžku zmenšiť a dodržať navrhnuté pomery, tak z dôvodu prehľadnosti LED diód a dostatku voľného miesta v zariadení boli LED diódy umiestnené so vzájomnou vzdialenosťou 13 mm. Podobne ako pri predchádzajúcej doske, aj tu bol po osadení a spájaní komponentov nanesený ochranný lak.

Tabuľka 9 Prehľad označenia káblov

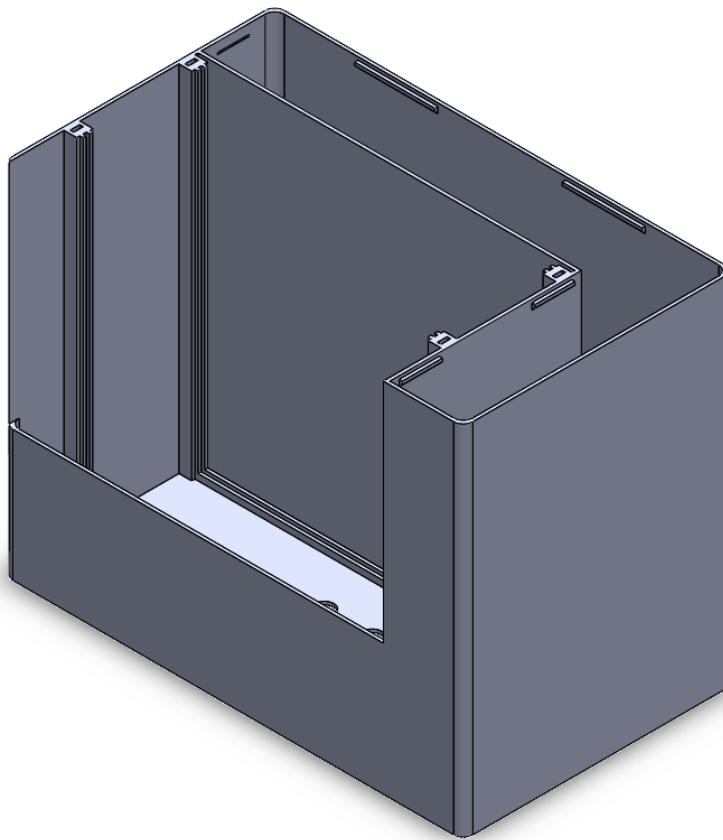
Farba	Význam
Zelený kábel	Zdroj napätia
Čierny kábel	Zem

Okrem týchto dvoch dosiek plošných spojov boli rovnakým spôsobom vyhotovené a ochranným lakom ošetrené ďalšie tri dosky plošných spojov. Prvou je delič napätia, ktorý je zobrazený v schéme na obrázku 20, druhou je doska plošných spojov obsahujúca dva-krát dutinkovú lištu s dvadsiatimi pinami a roztečou 2,54 mm kompatibilnou s Raspberry Pi Pico. Pričom z dôvodu prepojenia vstupných a výstupných signálov boli na mikrokontrolér prispájkované kolíkové lišty ako proti kusy. Posledná doska plošných spojov má význam v prevedení výstupného napätia z USB konektorov do káblvej podoby. Všetky tri dosky sú veľmi jednoduché a nevyžadovali si návrh zapojenia ani osadenia na doske plošných spojov.

6.4 Návrh 3D modelu zariadenia

Hlavnými piliermi dizajnu solárneho zavlažovania bude zachovanie minimalizmu a jednoduchosti. Na prvý pohľad musí evokovať v užívateľovi pocit užitočnosti a zmysluplného využívania obnoviteľnej elektrickej energie. Pričom nemôže byť príliš nápadný, ale zároveň musí byť dostatočne viditeľný v záhradnom prostredí. Zariadenie solárneho zavlažovania kombinuje viaceré technologické systémy v jednom kompaktnom celku, z toho dôvodu mu bol pridelený skratkový názov IRIS, anglicky Integrated irRIgation System, slovensky integrovaný zavlažovací systém, ďalej len IRIS.

6.4.1 Vnútorne diely



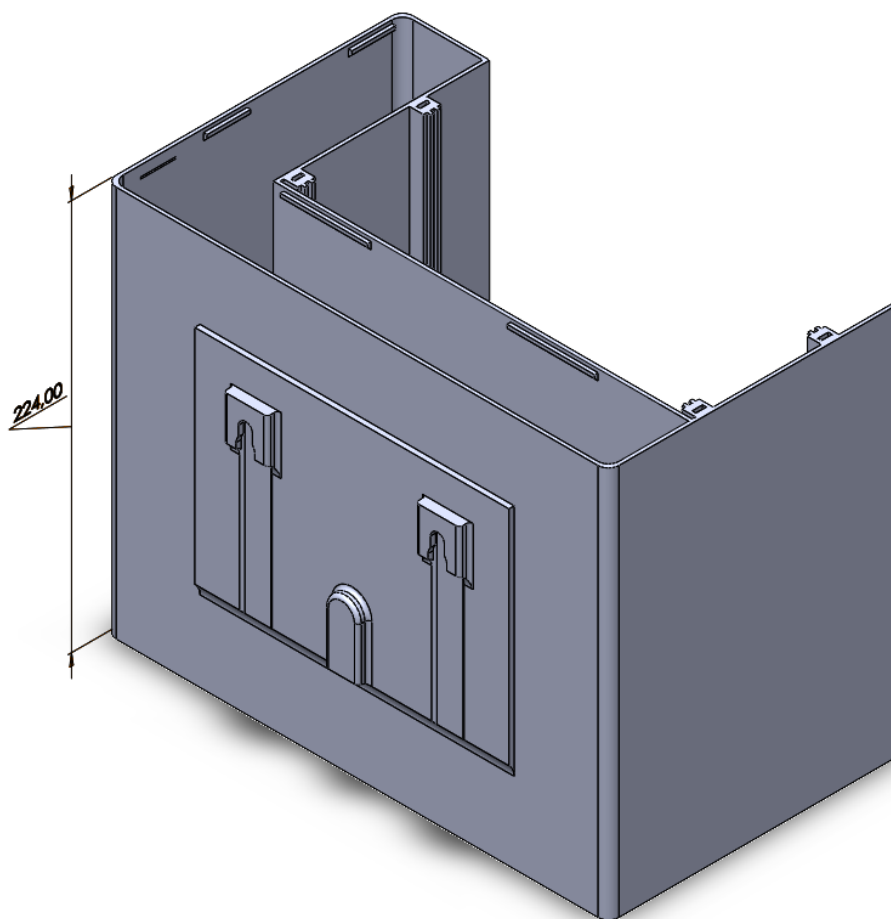
Obrázok 28 Predný izometrický pohľad

Na obrázku 28 je možné vidieť prvý navrhnutý diel IRIS, jedná sa o vnútorný diel, v ktorom budú uložené všetky elektrické obvody, čerpadlá a ostatné použité súčiastky. Návrh vychádza z obdĺžnikovej podstavy so zaoblenými hranami rozdelenej na dve hlavné časti.

Prvá tvorí prázdny blok v prednej časti obrázku 28. V tomto bloku budú na dvoch základných paneloch umiestnené všetky komponenty a funkčné celky. Panely budú mať štvorcový tvar a bude ich možné zasunúť do vysunutých drážok v spodnej a v bočných stenách. Zadný panel bude obsahovať manažment vody a hnojiva, predný panel elektrické

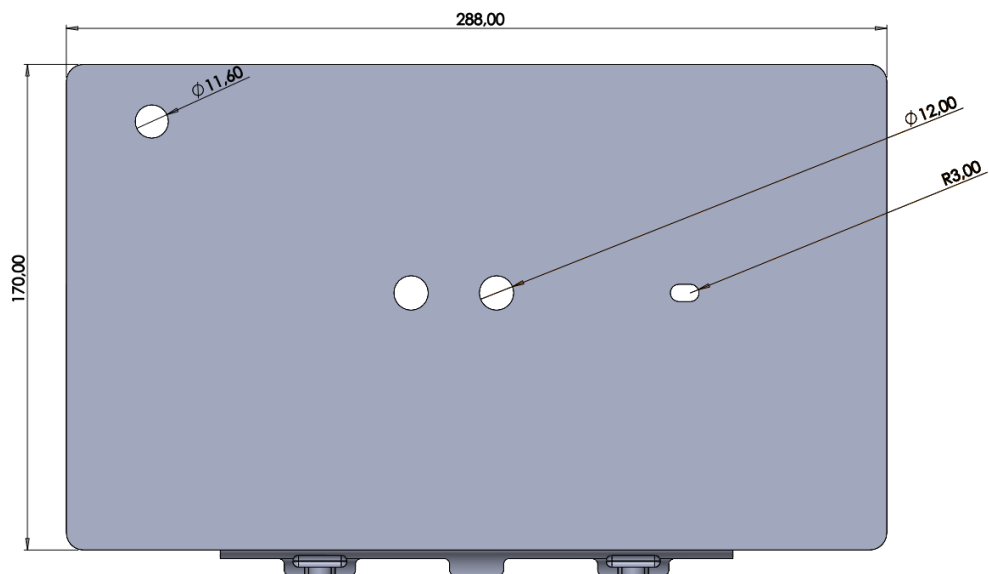
zapojenie pozostávajúce z troch hlavných blokov popísaných v podkapitole 6.2. Po zasunutí panelov do drážok ich bude možné z vrchu prichytiť upevňovacími krytkami, ktoré sa zasunú do obdĺžnikových otvorov za vysunutými drážkami a svojím tvarom obopnú vrchnú časť základných panelov. Obopnutím základných panelov sa zvýši celková mechanická pevnosť, napríklad počas vibračného namáhania.

Druhý blok tvorí zadná časť v tvare písmena L. V tejto časti bude umiestnené sekundárne čerpadlo a hnojivo, ktoré bude vmiešavané do toku vody. Celkový objem hnojivovej nádrže sú približne 4 litre. Jedným procesom hnojenia sa spotrebuje približne 740 ml hnojiva, tým pádom bude možné spustiť proces hnojenia 5-krát bez potreby jeho dolievania. Súčasťou hnojivovej nádrže sú aj vysunuté lišty, ktoré sa nachádzajú v jej vrchnej časti. Na vysunutých lištách bude umiestnený kryt, ktorý zabráni vylievaniu hnojiva.



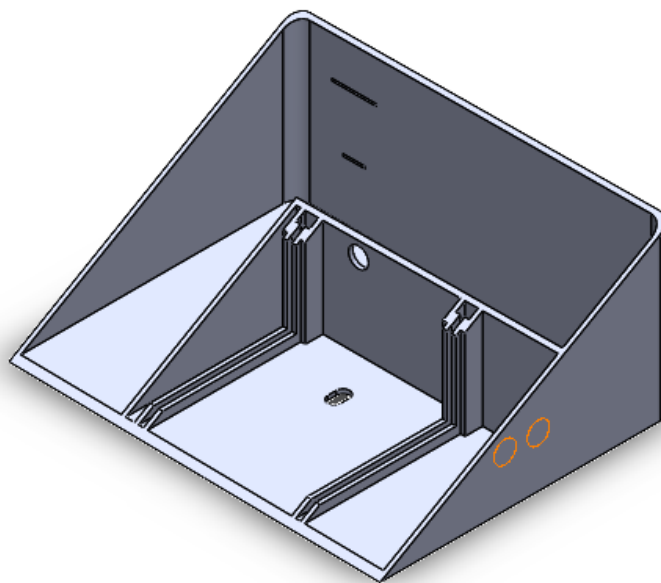
Obrázok 29 Zadný izometrický pohľad

V pohľade na obrázku 29 je vidno zadnú stenu, na ktorej sa nachádzajú dva otvory, vďaka ktorým bude možné IRIS zavesiť napríklad na stenu alebo inú vertikálnu rovinu. Závesné otvory sú navrhnuté so širšou hrúbkou stien a čo najväčšou dotýčnou plochou tak, aby uniesli celé zariadenie. Pod otvormi sa nachádza vyrovnávací výstupok.



Obrázok 30 Spodný pohľad

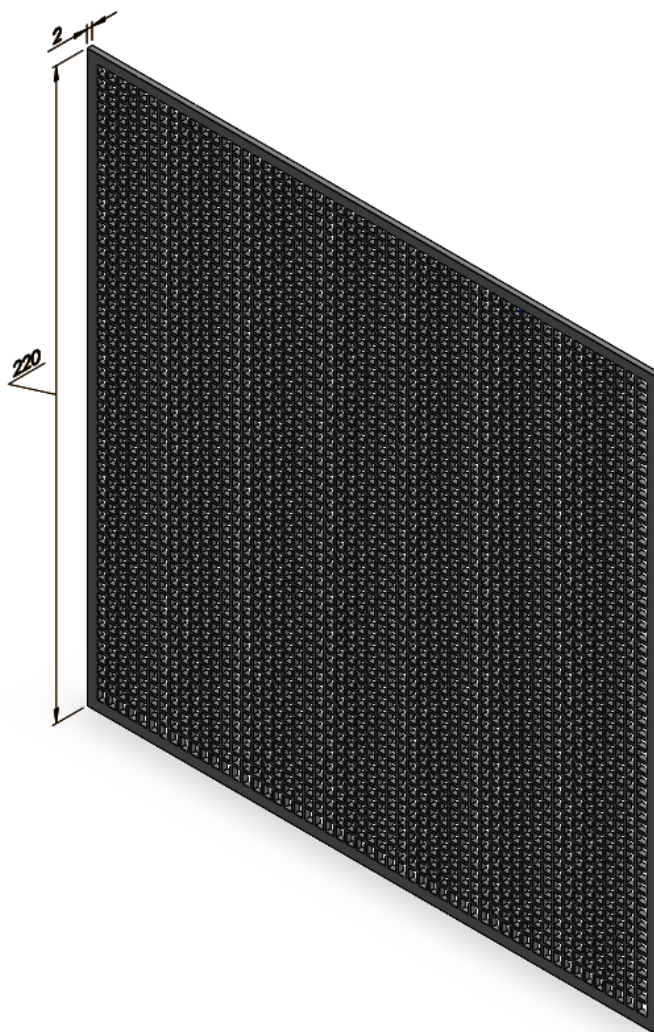
Zo spodného pohľadu obrázku 30 a obrázku 29 je možné vyčítať rozmery vnútorného dielu, ktoré sú 224 x 170 x 288 mm. Na obrázku 30 sa nachádzajú tri kruhové a jeden valcový otvor. Do kruhového otvoru v ľavom hornom rohu bude umiestnené tlačidlo. Dva kruhové otvory v strede plnia funkciu prívodu a odvodu vody, prípadne odvodu vody zmiešanej s hnojivom. Skrz valcový otvor bude do zariadenia privedený dvojžilový kábel valcového tvaru zo solárneho panela.



Obrázok 31 Zrezaný predný izometrický pohľad

Obrázok 31 zobrazuje kruhový otvor v bočnej stene, skrz ktorý sa bude prečerpávať hnojivo. V nádrži pre hnojivo sa nachádzajú dve čiary vsunuté 0,2 mm do bočnej steny,

kde menšia čiara predstavuje 0,5 l a väčšia 1 l kvapaliny. Tieto čiary ukazujúce aktuálny objem kvapaliny sú umiestnené skrz celú výšku po oboch bočných stenách. Ďalej sú na obrázku zvýraznené dva kruhy nachádzajúce sa na vnútornej strane prednej steny, kde bola hrúbka steny zmenšená z 2 mm na 0,8 mm. Do týchto kruhových výrezov budú vložené signalizačné LED diódy, ktoré stenu hrúbky 0,8 mm spoľahlivo presvietia, vďaka čomu budú indikovať procesy zavlažovacieho systému. Na obrázku je taktiež možné pozorovať umiestnenie spodných a bočných vysunutých drážok. Drážky sú umiestnené tak, aby ich vzájomná vzdialenosť bola dostatočná pre rozmery hlavného čerpadla, ktoré bude predstavovať objemovo najväčší komponent vnútorného zapojenia.

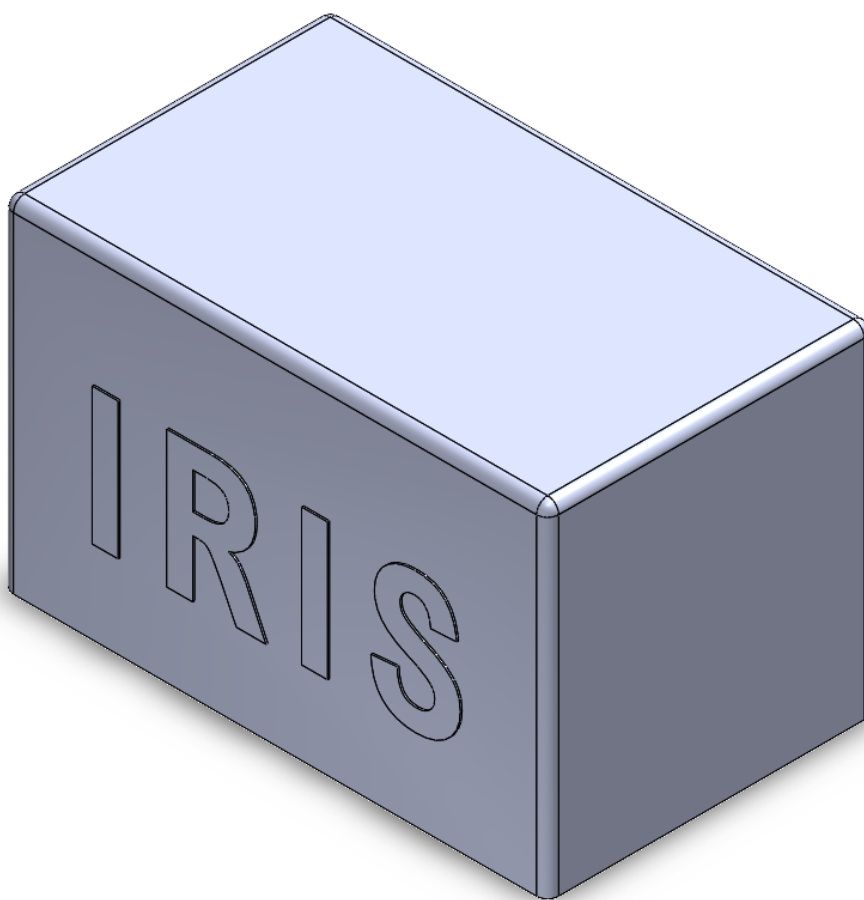


Obrázok 32 Základný panel

Základný panel má štvorcový tvar s rozmermi 220 x 220 mm a hrúbku 2 mm. Jeho obsah je tvorený sieťou malých štvorcov s rozmermi 3 x 3 mm. Tento rozmer odzrkadľuje najčastejší priemer záchytných otvorov súčiastok, napríklad relé modulov. Na základom panely budú z prednej strany uchytené súčiastky a zo zadnej strany elektrické spoje.

Uchytenie bude tvorené skrutkami skrz záchytné otvory súčiastok a im prislúchajúce štvorce alebo sťahovacími páskami. Sťahovacími páskami budú ku základnému panelu pripevnené aj elektrické spoje na zadnej strane. Pri nožnej chybe alebo nutnej zmene cesty spoja tak bude ich uvoľnenie, oprava a následné upevnenie najjednoduchšie vykonané použitím sťahovacích pásof. Ďalšou výhodou sťahovacích pásof oproti skrutkám je spoľahlivosť uchytenia počas vibračnej záťaže spôsobenej hlavným čerpadlom. Matky sa postupom času môžu zo skrutiek samovoľne vyskrutkovať.

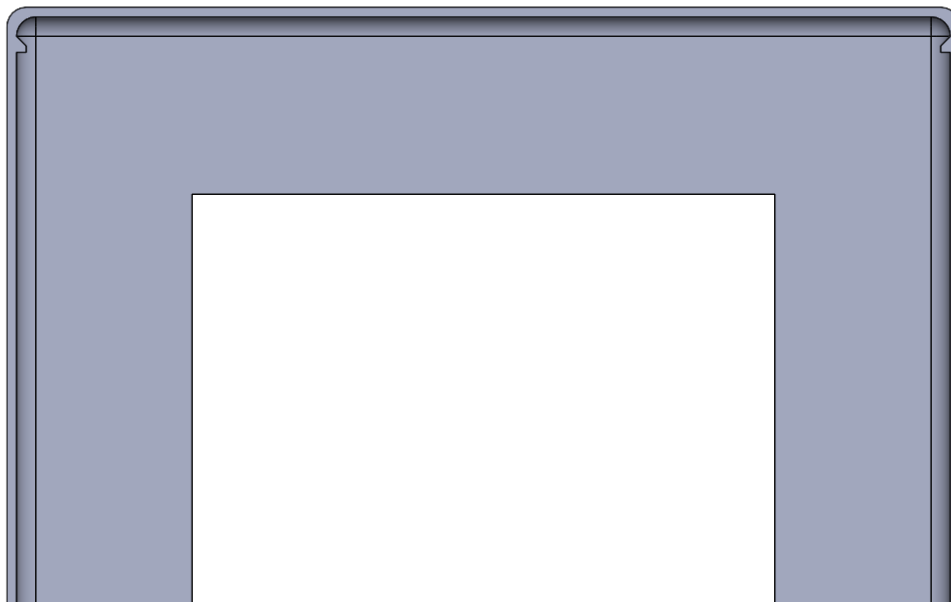
6.4.2 Vonkajší kryt



Obrázok 33 Predný izometrický pohľad

Vonkajší kryt má kvádrový tvar so zaoblenými hranami a primárne splňa ochrannú funkciu celého zariadenia. Zaoblenie vrchných hrán zariadeniu pridá estetickú stránku a opticky zmenší jeho rozmery. Na prednej strane sa nachádza na 1 mm vysunutý názov zariadenia. Font zvoleného písma dodržiava aspekt jednoduchosti a minimalizmu. Na rozdiel od vnútorných dielov je hrúbka steny vonkajšieho krytu rovná 3 mm. O jeden milimeter väčšia hrúbka bola zvolená z dôvodu odolnosti voči klimatickým podmienkam, ktorým bude zariadenia vystavené.

Okrem nápisu na prednej strane je vonkajší kryt z troch strán geometricky totožný, bez výrazných zásekov alebo výstupkov. Zmena nastáva na zadnej stene, kde sa nachádza obdĺžnikový výrez. Z obrázku 29 je zrejmé, že obdĺžnikový výstupok vnútornej časti spĺňa závesnú funkciu. Tým pádom obdĺžnikový výrez vonkajšej časti tento výstupok lemuje. Výška výrezu nemôže nejako ovplyvniť funkčnosť zariadenia, keďže výrez nie je tak vysoký, aby skrz neho mohla do zariadenia napríklad natiect' voda. Vonkajší kryt bude umiestnený na vnútornú časť nasunutím zhora na dol. Spojenie vonkajšej a vnútornej časti nastane v jednom momente v dvoch bodoch. Prvý je spojenie vrchnej hrany výrezu vonkajšej časti a výstupku vnútornej časti. Druhý je uloženie vysunutých výstupkov na vrchnú rovinu vnútorného dielu. Vysunuté výstupky sú dva lichobežníky s dĺžkou 152 mm nachádzajúce sa na vnútre bočných stien vonkajšieho krytu. Taktiež sú zobrazené na obrázku 34.

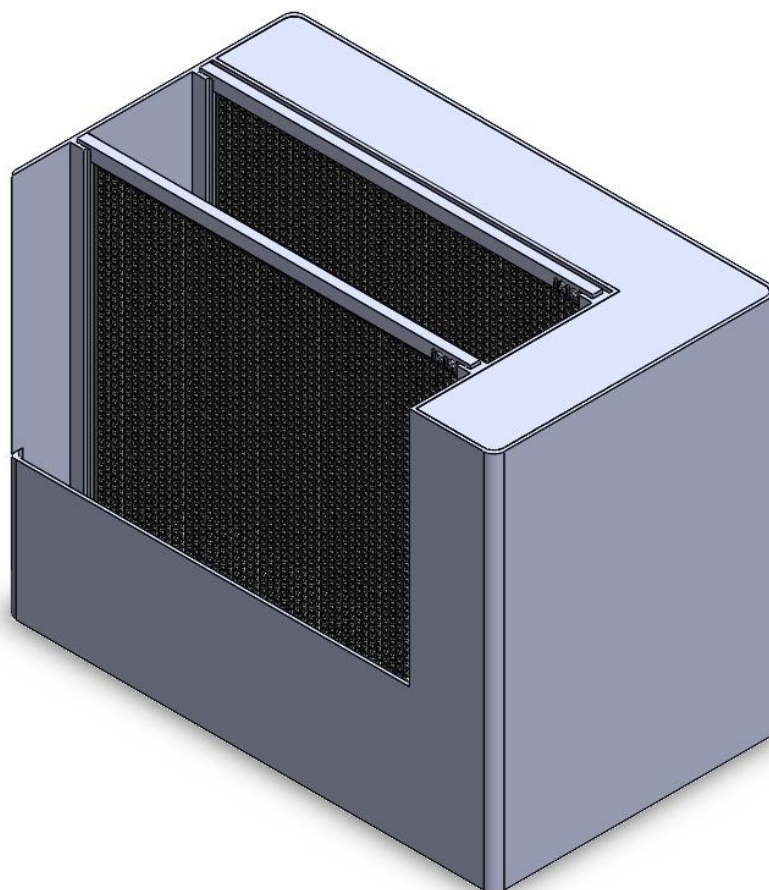


Obrázok 34 Predný zrezaný pohľad

6.4.3 Celkový návrh

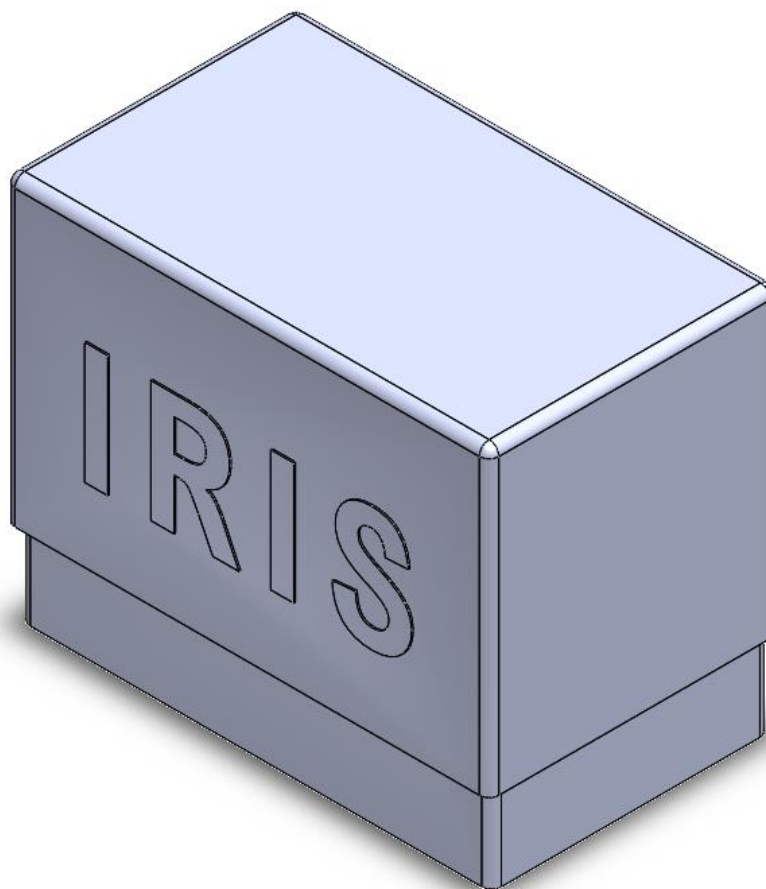
Zloženie zostavy bude začínať umiestnením vrchného krytu nad hnojivovú nádrž, kedy bude kryt vložený na vysunuté lišty zobrazené na obrázku 28 a 29. Umiestnením krytu medzi steny zariadenia bude jeho upevňovací faktor tvorený odporom štruktúry okolitého materiálu. Následne budú do vysunutých drážok vnútornej časti vložené dva základné panely s tým, že prvý sa bude vkladat' panel bližšie ku hnojivovej nádrži. Po uložení základného panelu bude dôležité jeho upevnenie upevňovacou krytkou, ktorá je zobrazená na obrázku 35. Koncové časti upevňovacej krytky budú vložené do otvorov, ktoré sa nachádzajú za vysunutými drážkami. Po vložení oboch panelov bude možné na zostavu vnútorných dielov nasunúť vonkajší kryt, čím sa zvýši pevnosť a mechanická odolnosť celej zostavy. Zloženie aj rozloženie zostavy bude možné vykonať pomocou

mechanickým pohybom s jednotlivými kusmi bez nutnosti uvoľňovania skrutiek alebo iných spojov. Vonkajší kryt bude možné vybrať potiahnutím hore. Vrechný kryt hnojiva bude možné vyňať pákovým systémom, jemným zatlačením na ľavý zadný roh zariadenia, kedy sa predná časť krytu vďaka zapretiu o vysunuté lišty nadvihne do vzduchu a potiahnutím von bude kryt odstránený. Upevňovacie krytky základných panelov bude možné vybrať potiahnutím hore. Rovnakým spôsobom bude možné vybrať aj základné panely.



Obrázok 35 Zostava vnútorných dielov

Zostava vnútorných dielov tvorí pevný celok, ktorý je vďaka zásuvným spojom mechanicky aj vibračne odolný. Predná časť vnútorného dielu obsahuje výrez začínajúci koncom hnojivovej nádrže a končiaci ľavou bočnou stenou. Tento výrez plní funkciu jednoduchej diagnostiky a opravy problému, ktorý sa môže vyskytnúť pri prvotnom testovaní alebo postupom času v elektrickom zapojení zariadenia. Z toho dôvodu bude väčšina elektrického zapojenia umiestnená na prednom paneli. Do zadného panelu obsahujúceho manažment vody povedú spoje napájania pre hlavné čerpadlo vody a sekundárne čerpadlo hnojiva, a taktiež dátové spoje pre získanie informácií o prietoku kvapalín.



Obrázok 36 Celá zostava

Po osadení vonkajšieho krytu bude zostava kompletná. Celkové rozmery výška x dĺžka x šírka sú 238 x 296 x 184 mm. Veľkosťne sú splnené rozmery kompaktného zavlažovacieho systému do záhrady. Zaoblenými vrchnými a bočnými hranami, pri zachovaní ostrých spodných hrán je zariadeniu dodaný prvok svižnosti a odolnosti. Ovládaním zariadenia skrz jedno tlačidlo je zachovaná jednoduchosť bez potlačenia funkčnosti. Absenciou neúčelných dizajnových výstupkov a geometrických tvarov je zachovaný minimalizmus, ktorý reprezentuje aj strohý fond písma názvu zariadenia na prednej strane. Zariadenie bude umiestnené v približnej výške jeden meter nad úrovňou zeme. Kvádrový tvar v tejto výške nie je v záhrade typický, preto bude ľahko povšimuteľný. Avšak výberom správnych farieb, napríklad odtieňmi zelenej, bude do okolitého prostredia správne zapadať. Zavesením na dvoch záchytných bodoch bude možné zavesenie na plote, múre alebo dreve. Zachytenie vo výške je nutné z dôvodu umiestnenia hadíc prítoku a odtoku vody zo spodnej strany. Vďaka spôsobu uchytienia, ktoré je zobrazené na obrázku 29, a štruktúre jednotlivých dielov, bude zariadenie odolné voči klimatickým vplyvom ako je silný vietor, búrka či dážď. Umiestnenie solárneho panelu bude možné v ľubovoľnom bode priestoru nad zariadením.

6.5 3D tlač

3D tlač je proces premeny 3D modelov zo softvérových programov do podoby fyzickej na základe poskytnutých dát. Jedná sa o aditívny proces vrstvenia materiálu zahriateho na pracovnú teplotu, pri ktorom postupom času vznikne požadovaný objekt. Dôležitý je výber správnej tlačovej technológie, najrozšírenejším je modelovanie fúzovaných depozícií (z ang. FDM).

Princíp funkcie FDM tlačiarní je založený na vytlačaní termoplastických vlákien skrz trysku ohriatu na pracovnú teplotu použitého vlákna – materiálu. Vlákno je do výsledného tvaru formované pomocou pohyblivej hlavice. Týmto spôsobom sa postupne vytlačajú všetky vrstvy modelu. Pre vytlačanie jednotlivých vrstiev je potrebné, aby hlavica menila svoju polohu nie len v 2D priestore, ale taktiež v zetovej ose karteziánskej súradnicovej sústavy. Vzhľadom na konkrétny model tlačiareň je taktiež možné, že v ose Z sa môže pohybovať podstava, na ktorú sa daný objekt vytláča a hlavica sa pohybuje v ose X a Y.

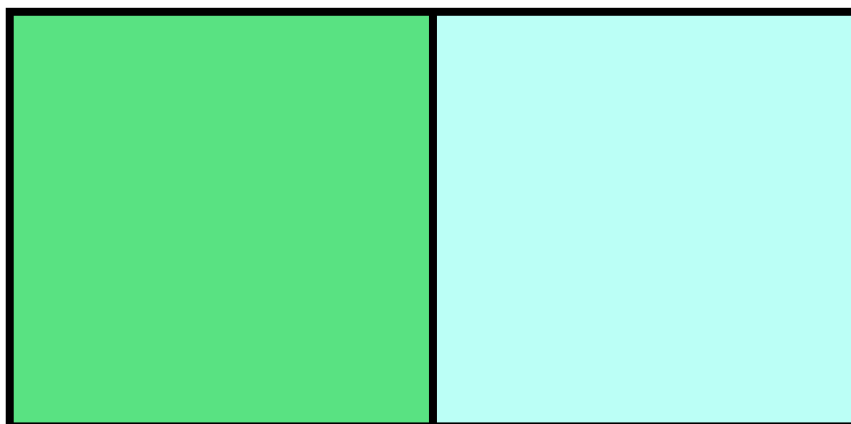
Materiálmi 3D tlače sú vo väčšine prípadov termoplasty. Výber sa uskutočňuje podľa aplikácie výsledného produktu. Najbežnejšími materiálmi sú ABS a PLA. ABS – akrylonitril butadien styren, patrí medzi materiály s vysokou pevnosťou a odolnosťou voči nárazu a vysokej teplote. Z materiálu ABS sú vyrábané napríklad LEGO kocky. PLA – kyselina polymliečna, je najuniverzálnejší materiálom pre 3D, ktorý je vhodný aj na tlač veľkých modelov, pričom má malý faktor krútenia. ABS a PLA sú len dva z mnohých termoplastov používaných na 3D tlač. Môžu existovať aj viaceré variácie jedného materiálu ako je napríklad PET a PET-G. Z pravidla je možné každý materiál kúpiť v rôznych veľkostiach, pričom na výber je veľké množstvo farieb.

Vzhľadom na aplikáciu je vhodné vyberať tlačiareň s dostatočne veľkou plochou podložky, rýchlosťou tlače a tlačovým rozlíšením. Správna rýchlosť tlače a tlačové rozlíšenie hrajú rozhodujúcu úlohu vo finálnom výzore produktu. Pri zle nastavenej rýchlosti by mohli napríklad na ostrých hranách modelu vzniknúť výbežky alebo nerovnosti, čo spôsobuje pokles kvality. Tlačové rozlíšenie definuje mieru presnosti s akou dokáže daná tlačiareň tlačiť. Rozlišuje sa rozlíšenie v ose X a Y, čiže minimálny posun tlačovej hlavice a rozlíšenie v ose Z, ktorá reprezentuje minimálnu výšku steny. Rozlíšenie a kvalita tlače je taktiež ovplyvnená výberom trysky vzhľadom na materiál a dĺžku tlače. Zachovanie kvality je silne závislé od správneho priestorového otočenia modelu vzhľadom na jeho geometrický charakter. Zlým natočením môžu vzniknúť chyby procesu a výsledný produkt nemusí dosiahnuť svojej predlohy.

6.5.1 Výber materiálu pre 3D tlač

Rozhodujúcim faktor pri výbere materiálu bola odolnosť voči klimatickým podmienkam a pevnosť. Vysoká pevnosť bude potrebná hlavne z dôvodu váhy zariadenia, ktorá spoločne so štyrmi litrami hnojiva bude viac ako 6 kg. Zariadenie bude zavesené na dvoch držiakoch tak, ako bolo ukázané v predchádzajúcej kapitole, preto je odolnosť voči vibráciám a celková pevnosť rozhodujúca. Medzi najpevnejšie, dobre

dostupné materiály patrí ABS a PET-G. Základom materiálu PET-G je PET-polyethylentereftalát, ktorý sa bežne používa pri výrobe fľašiek, dóz či pohárov. Úprava G odzrkadľuje prídanie modifikovaného „glykolu“ k materiálovej kompozícii, čím sa zvýši odolnosť voči nárazu a lesk, pričom sa zníži krehkosť. Oba materiály sú pevnostne odolné a majú podobné aj ostatné vlastnosti, avšak nakoniec bol kvôli jednoduchšiemu nastaveniu tlače a odolnosti voči kyselinám, rozpúšťadlám vybraný materiál PET-G. Vybraný materiál je taktiež možné recyklovať, čo zvyšuje ekologickosť celého produktu.

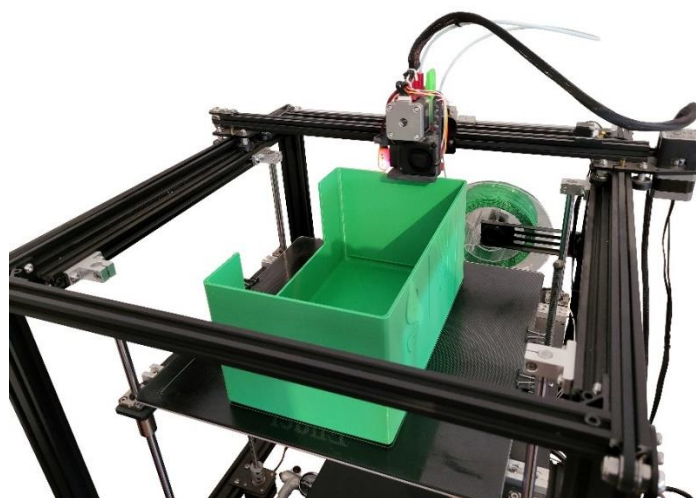


Obrázok 37 Vybrané farby tlače

Aby zariadenie zapadalo do prostredia letnej záhrady bola ako prvá farba vybraná svetlo zelená, ktorá má podobný odtieň ako tráva. Druhou farbou bola mentolovo zelená. Vrchný kryt, ktorý tvorí väčšinovú časť vonkajšieho obalu bude vytlačený svetlo zelenou. Spodná časť vonkajšieho obalu, čiže vnútorný diel bude vytlačený mentolovo zelenou. Voľba farieb bude zariadenie farebne oddeľovať od zelene na zemi, zatiaľ čo svetlo zelená farba pridá efekt prispôsobenia.

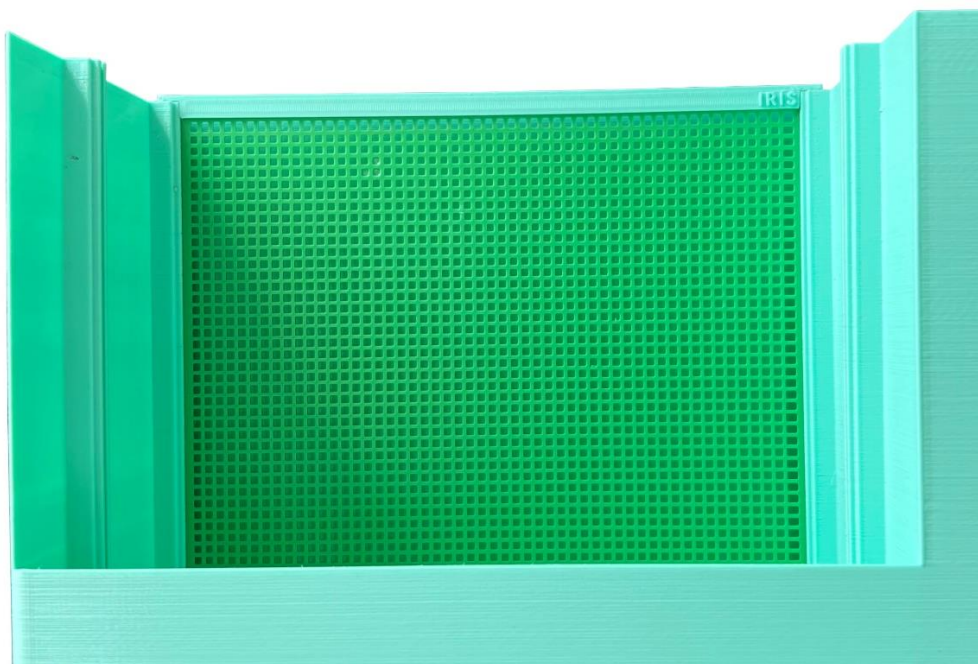
6.5.2 Tlač dielov

Všetky diely sa tlačili na tlačiarni Creality Ender 5 plus. Jej hlavnou výhodou je tlačový priestor v rozmeroch 350 x 350 x 400 mm, čo aj s rezervou vystačí na rozmery zadaného 3D modelu. Model bol navrhnutý v programe SolidWorks, kde bol jeho súbor prevedený do formátu STL, v programe Cura slicer boli nastavené parametre tlače ako výplň stien, počet vrstiev v jednotlivých stenách a rýchlosť hlavice. S použitou tryskov bolo maximálne rozlíšenie 0,4 mm v X a Y ose a 0,25 mm v ose Z. V osách X a Y by bolo možné tlačiť aj vo väčších detailoch, avšak pri plných stenách je dobré zachovanie maximálneho násobku rozlíšenia. Ako prvé boli vytlačené základné panely, v ktorých sa nachádzajú 3 x 3 mm otvory, na ktorých bolo možné jednoducho overiť správnosť nastavených parametrov pri práci s materiálom PET-G. Nasledoval kryt hnojiva, vrchné krytky, ktoré slúžia na uchytenie panelov z vrchnej strany, vnútorný diel a vonkajší kryt.



Obrázok 38 Záber z 3D tlače

Na obrázku 38 je zobrazený moment z 3D tlače vrchného krytu, dôležité je jeho geometrické otočenie tak, aby nedošlo k tlači mostíku. V obrázku je taktiež vidno časť konštrukcie použitej 3D tlačiarne s jej hlavicou ako prechádza po ľavej bočnej stene. Pozorovaním obrázku je si možné všimnúť štruktúru tlače, kedy bolo v nastaveniach zvolené menšie zahustenie vnútra stien, ktoré vyplňajú tvary písmena X. Použitím nižšej hustoty výplne bolo ušetrené na materiály a skrátil sa celkový čas tlače, pričom pevnosť vrchného krytu sa znížila len minimálne. Podobný princíp s trocha vyššou hustotou bol použitý pri tlačení záchytnej časti vnútorného dielu, kde má v najširšom bode stena 11 mm. Celkový čas tlače všetkých dielov presiahol 100 hodín.



Obrázok 39 Zložené vnútro

Dôležitým faktorom tlače v troch rozmeroch je nastavenie správnych tolerancií. Nastavenie tolerancií modelu IRIS odzrkadľuje obrázok 39, kde je možné pozorovať viacero správnych zapadnutí jednotlivých dielov do seba. Prvým je základný panel vložený medzi vysunuté drážky, druhým obopnutie upevňovacej krytky na panel a tretím zapadnutie záchytných nožičiek upevňovacej krytky do otvorov za vysunutými drážkami. Tlač nie je dokonale presná a stáva sa, hlavne pri ostrých uhloch, že aj pri nižšej rýchlosti materiál trochu pretečie a finálny výsledok má o pár desiatín milimetra väčší rozmer. Pri menších rozmeroch bola nastavená tolerancia, ktorá sa pohybovala okolo hodnoty 0,1 mm. U väčších zas 1 mm. Príklad menšieho rozmeru je medzera medzi vysunutými drážkami pre vkladanie základného panelu. V tomto prípade bolo z každej drážky odstránených 0,1 mm, čo spolu s pôvodnou veľkosťou medzery činí 2,2 mm pre základný panel šírky 2 mm. Väčšou medzerou je dotyk vysunutej záchytnéj roviny s vonkajším krytom. Keďže sa jedná o materiál z rady plastov, tak je vždy možné hranu jemne obrúsiť, avšak nie všetky sú miesta pre obrus ľahko dostupné.



Obrázok 40 Predná strana zloženej zostavy

Obrázok 40 zobrazuje finálnu podobu zariadenia, bez solárneho panelu a dvoch hadíc pre tok vody zo spodnej strany. Tlač prebehla bez väčších chýb, na obrázku je možné vidieť jednotlivé vrstvy. V spodnej časti vidieť dva jemné kruhy, za ktorými budú umiestnené vysoko-svietivé LED diódy. Kruhy sú vidieť z vonkajšej strany aj keď je táto strana rovná pretože hlavica musela v tomto mieste postupne vytvarovať kruh, čo spôsobili jemný otláčok jeho hrán do vonkajšej steny.



Obrázok 41 Zadná strana zloženej zostavy

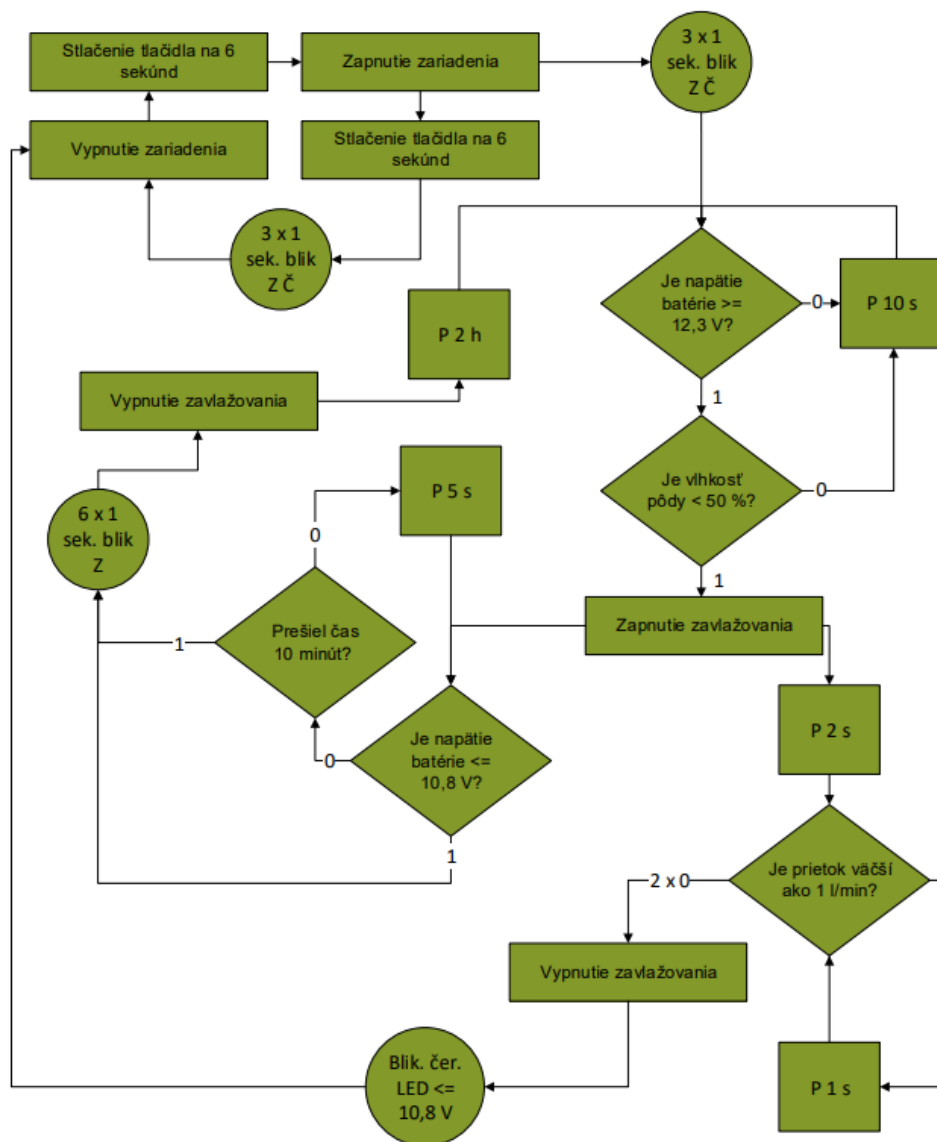
Na zadnej strane vidieť uloženie vonkajšieho krytu na vnútorný diel. V ľavom spoji týchto dielov je taktiež vidno malú medzeru spôsobenú toleranciou. Táto medzera nie je považovaná za chybu, keďže bez nastavenia tolerancií by pravdepodobne bolo nutné obrúsiť obsah všetkých vnútorných stien. Pre zníženie hluku pri vibráciách spôsobených spustením hlavného čerpadla, ako aj zvuku spôsobenom trením pri skladaní a rozkladaní bola na vnútorné steny vonkajšieho krytu nanesená vrstva silikónu.

Aby bolo isté, že záchytné otvory udržia celú zostavu, bola ešte pred začatím tlače všetkých dielov vytlačená testovacia verzia vysunutej záchytnej roviny na ktorej bol prevedený zaťažovací test. Testovacia verzia bola vytlačená z rovnakého materiálu, tj. PET-G. V zaťažovacom teste sa vytlačený diel upevnil pomocou záchytných otvorov na rovnú stenu a následne naňho bolo zavesené závažie vážiace viac ako dvojnásobok predpokladanej váhy, približne 15 kg. Časový interval pôsobenia záťaže trval 24 hodín. Po dvadsiatich štyroch hodinách neboli na testovanom produkte pozorované žiadne viditeľné zmeny. Po úspešnom zaťažovacom teste bola započatá tlač všetkých dielov. Ak by bol test neúspešný, muselo by dôjsť k zníženiu hmotnosti zariadenia, čo by pravdepodobne viedlo k zmenšeniu nádrže na hnojivo, čím by sa znížila miera funkčnosti celku. Avšak aj po úspešnom zaťažovacom teste sa situácia môže vďaka pravidelnému pôsobeniu vibrácií na objekt zmeniť, preto bude cieľom osadiť hlavné čerpadlo tak, aby boli jeho vibrácie čo najviac utlmené. Ďalším vylepšením môže pridanie tenkej vrstvy látky pohlcujúcej vibrácie do záchytných oblúkov.

6.6 Program solárneho zavlažovania

Pre použitý mikrokontrolér je možné písanie programu v jazyku MicroPython alebo C/C++. Vďaka predchádzajúcim skúsenostiam bude v návrhu zvolený programovací jazyk C. Návrh programu sa bude odrážať od Návrhu vlastného riešenia, ktorý sa nachádza v prvej kapitole tejto bakalárskej práce. Výsledný program bude kontrolovať a regulovať procesy v zariadení solárneho zavlažovania. V prvom kroku sa budú musieť batérie nabiť na plné nabíjacie napätie, po ktorom dôjde k využitiu uskladnenej solárnej energie pre pohon čerpadla počas doby zavlažovania. Pred procesom zavlažovania bude nutné skontrolovať vlhkosť pôdy pomocou vlhkomerov, čím sa predíde možnému prepolievaniu rastlín. Po zavlažovaní začne plynúť časový interval, vďaka ktorému nedôjde k zavlažovaniu skôr, ako ubehne jeho prednastavená hodnota. I keď je približný čas nabíjania vypočítaný na 111 minút, tak napäťový okruh +12 V začína solárnym panelom a nie batériami, čiže nie je rozdelený na dve časti. Dôvodom je šetrenie batérií využívaním solárnej energie počas doby zapnutia čerpadla. Nutnosť časového intervalu je daná štruktúrou +12 V okruhu. Mohla by nastať situácia, v ktorej by vznikla náhodná chyba a delič napätia by mikrokontroléru zadal o niečo vyššiu hodnotu ako je + 12 V, napríklad hodnotu, pri ktorej sa bude spúšťať proces zavlažovania. Výsledkom by bolo veľmi krátke zavlažovanie, ktoré by bolo ukončené buď prečítaním správnej hodnoty batérií alebo prečítaním dát o prietoku z prietokomerov. Časová medzera medzi dvoma zavlažovacími cyklami rovná 120 minút, tj. 2 hodiny, je ideálna pre čas potrebný na vsiaknutie vody a nabitie batérií. Po dvoch hodinách bude mikrokontrolér v časových cykloch kontrolovať napätie batérie, kedy po dosiahnutí požadovanej hodnoty spustí proces zavlažovania. Počas všetkých vykonávaných procesov bude nutné sledovať stav tlačidla, kedy po jeho stlačení bude v nasledujúcom cykle zavlažovania spustený proces hnojenia. Týmto spôsobom môže byť behom slnečného dňa prečerpaných až 250 litrov vody.

6.6.1 Návrh algoritmu zavlažovania



Obrázok 42 Algoritmus zavlažovania

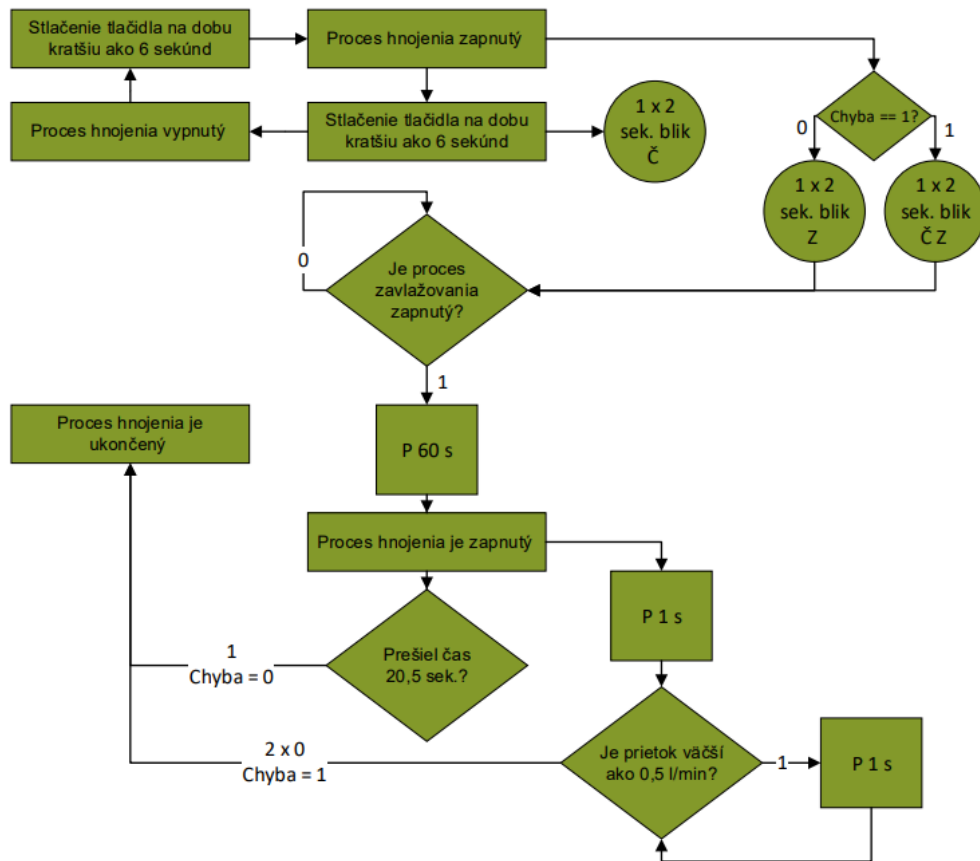
Algoritmus na obrázku 42 začína zapnutím zariadenia stlačením tlačidla na 6 sekúnd. Rovnakým časom stlačenia bude možné zariadenie vypnúť. Po zapnutí sa 3-krát na dobu jednej sekundy zapnú obe signalizačné LED diódy, po ktorých sa zmeria napätie batérie. Ak bude napätie väčšie alebo rovné 12,3 V, tak sa skontroluje vlhkosť pôdy, ak bude aj tá vyhovovať, tak sa zapne proces zavlažovania. Ak bude napätie menšie ako 12,3 V alebo bude vlhkosť pôdy príliš vysoká, tak mikrokontrolér počká 10 sekúnd a opäť skontroluje oba parametre. Po zapnutí zavlažovania sa začnú dva procesy.

Prvým je cyklické kontrolovanie stavu batérie od doby začatia procesu zavlažovania. Ak bude napätie batérie menšie ako 10,8 V (3,6 V na jeden článok), tak sa zavlažovanie ukončí ešte pred dosiahnutím požadovaného času. Po dosiahnutí desiatich minút bude

proces zavlažovania taktiež ukončený. V oboch prípadoch 6-krát po dobu jednej sekundy blikne zelená signalizačná LED dióda, aby oznámila ukončenie zavlažovania. Následne sa dve hodiny počká a celý proces zavlažovania sa začne odznova.

Druhým procesom je cyklické kontrolovanie hodnoty prietokomeru. Po zapnutí zavlažovania mikrokontrolér počká, z dôvodu presunu vody z nádrže do čerpadla a z čerpadla skrz prietokomer von, dve sekundy. Po úvodných dvoch sekundách začne s intervalom jednej sekundy kontrolovať prietok vody. Ak bude prietok tri sekundy po sebe príliš nízky, tak sa proces nútené vypne. Potom bude blikat' červená LED dióda až do doby, kedy napätie batérie neklesne na minimálnu úroveň a zariadenie sa vypne. Po úspešnom ukončení zavlažovania sa premenná zaznamenávajúca nízke hodnoty prietokomeru vynuluje. Ak dôjde ku rozblikaniu červenej LED diódy, bude pre opätovný chod systému nutné reštartovanie zariadenia.

6.6.2 Návrh algoritmu hnojenia



Obrázok 43 Algoritmus hnojenia

Stlačením tlačidla na dobu kratšiu ako 6 sekúnd sa inicializuje proces hnojenia, vďaka čomu 1-krát na dobu dvoch sekúnd blikne zelená LED dióda. Ak bola v predchádzajúcom procese hnojenia evidovaná chyba, tak bliknú obe diódy súčasne, čím bude používateľ oboznámený o pravdepodobnom minutí hnojiva. Po signalizačnom zabliknutí sa bude

čakať na začatie procesu zavlažovania. Opätovným stlačením sa inicializácia procesu zavlažovania ukončí, čo bude signalizované rovnakým spôsobom bliknutia červenej LED diódy. Po začatí zavlažovania sa jednu minútu počká, a potom sa spustí proces hnojenia. Kedy sa počas vypočítaného času z kapitoly 6.1.4 bude prečerpávať hnojivo do hlavného toku vody skrz prietokomer. Prietokomer bude podobne ako v procese zavlažovania kontrolovať prietok hnojiva s intervalom počítania impulzov rovného jednej sekunde. Po prejdení časového intervalu alebo po dosiahnutí dvoch nízkych hodnôt z prietokomeru sa proces hnojenia ukončí. Dve nízke hodnoty prietoku hnojiva znamenajú dve sekundy, počas ktorých nebude dosiahnutá hodnota prietoku.

6.6.3 Rozbor zdrojového kódu

```
int main()
{
    initialisation();
    static bool on_off1, on_off2= false;
    static uint8_t counter = 0;
```

Začiatok hlavného programu začína funkciou `initialisation()`, ktorá inicializuje všetky potrebné GPIO piny podľa obrázku 21 a tabuľky 7, pričom ich uvedie do správneho počiatočného stavu. Ďalej začína nekonečný cyklus `while (1)`.

```
while(1)
{
    batt_V();
    flow_M();

    if( btn_check() )
    {
        on_off1 = !on_off1;

        if( on_off1 )
        {
            irrigation = irig_init;
        }
        else
        {
            irrigation = irig_off;
        }
    }

    if( irrigation == irig_check && irrigation == irig_pasue )
    {
        if( frtl_check() )
        {
            on_off2 = !on_off2;

            if( on_off2 )
            {
                fertilization = fert_start;
            }
            else
```

```

        {
            fertilization = fert_stop;
        }
    }
}

```

Nekončený cyklus vždy začína meraním napätia batérie a inicializáciou funkcie merania prietoku. Potom nasleduje druhá časť programu, ktorá sa venuje dvom if funkciám a k nim príslušným switch funkciám. Prvá if funkcia zapína a vypína zariadenie. Pri stlačení tlačidla na 6 sekúnd vráti funkcia `btn_check ()` hodnotu 1, čo zmení hodnotu statickej premennej `on_off` na 1 a do enumeratívneho typu `irrigation` sa priradí hodnota `irig_init`. Opätovným stlačením tlačidla na 6 sekúnd sa do premennej `on_off` uloží hodnota 0, čo spôsobí priradenie hodnoty `irig_off`. Podobne funguje druhá if funkcia, kedy stlačením tlačidla bude proces hnojenia inicializovaný a opätovným stlačením ukončený. Všetky stlačenia sú sprevádzané blikaním signalizačným LED diód podľa navrhnutého algoritmu zavlažovania a hnojenia.

```

switch( irrigation )
{
    case irig_off:
        device_off();
        break;

    case irig_init:
        irg_init();
        break;

    case irig_check:
        irg_check();
        break;

    case irig_on:
        irg_on();
        break;

    case irig_pause:
        irg_pause();
        break;

    case irig_issue:
        irg_issue();
        break;
}

```

V tretej časti sa podľa priradenej premennej enumeratívneho typu `irrigation` rozhoduje o funkcii, ktorá bude vykonávaná. Po zapnutí zariadenia je v premennej `irrigation` priradená hodnota `irig_init`, ktorá spustí funkciu `irg_init ()`. V tejto funkcii sa rozblíkajú obe LED diódy, po čom sa prepne do stavu `irig_check`. Funkcia stavu `irig_check` kontroluje stav batérie a vlhkosť pôdy, po splnení podmienok je do premennej `irrigation` priradená hodnota `irig_on`, čím bude spustená funkcia `irg_on ()`. Táto funkcia každých 5 sekúnd kontroluje stav batérie s nastaveným časovačom na dvanásť a pól minúty a každé 3 sekundy prietok vody. Taktiež kontroluje, či bol inicializovaný proces hnojenia. Ak áno, tak v 60. sekunde na dvadsať sekúnd vypne hlavné čerpadlo. Pri

úspešnom ukončení priradí premennú `irig_pause`, pri hlásení chyby `irig_issue`. Funkcia premennej `irig_pause` prevedie svetelnú signalizáciu a začne počítat' časovač trvajúci dve hodiny. Po uplynutí stanoveného času sa do premennej irrigation priradí hodnota `irig_check` a celý proces sa začne od začiatku. Pri viac-násobnej chybe prietoku funkcia `irig_issue ()` vypne zariadenie, pričom rozbliká červenú LED diódu, ktorá bude blikať až do minimálnej hodnoty batérie. Po jej dosiahnutí priradí premennú `irig_off`, čiže funkciu `irig_off ()`, k tomuto kroku sa vplyvom energie solárnych panelov funkcia `irig_issue ()` pravdepodobne nedostane. Zapnutí funkcie `irig_off ()` bude nutné zariadenie reštartovať. Zmyslom nutného reštartovania je iniciovanie riešenia problému s minutím vody alebo upchatím hadíc používateľom zariadenia.

```
switch ( fertilization )
{
case fert_start:
    frtl_on();
    break;

    case fert_pause:
    frtl_pause();
    break;

case fert_stop:
    frtl_off();
    break;

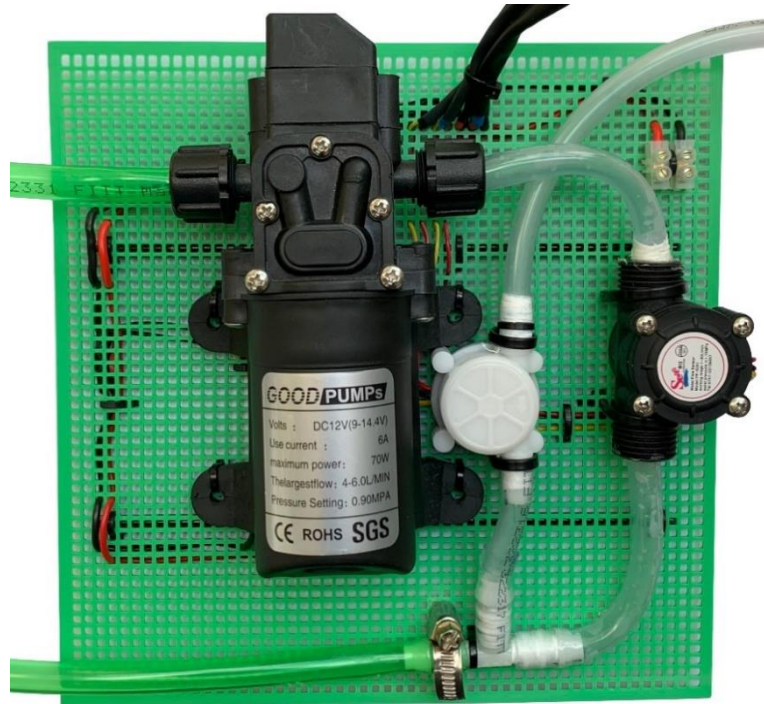
case fert_issue:
    frtl_issue();
    break;
}
sleep_ms(100);
}

return 0;
}
```

Posledná časť sa podobne pomocou funkcie `switch (fertilization)` rozhoduje o priradení hodnoty k enumeratívnej premennej. Po zapnutí zariadenia je priradená premenná `fert_pause`, ktorá drží sekundárne čerpadlo vypnuté. Stlačením tlačidla sa zapne funkcia `frtl_on ()`, ktorá na dve sekundy zapne zelenú LED diódu a následne čaká na funkciu `irg_on ()`. Po začatí zavlažovania a prejdení 60-tich sekúnd sa pokynom mikrokontroléru zopne príslušný relé modul ovládajúci sekundárne čerpadlo a začne sa časový interval, počas ktorého sa do hlavného rozvodu vody prečerpáva hnojivo. V tomto intervale sa taktiež kontroluje stav prietokomeru. Po úspešnom ukončení hnojenia je v premennej `fertilization` priradená hodnota `fert_pause`, ktorá vďaka svojej funkcii vypne čerpadlo. Funkcia `frtl_off ()` rozsvieti červenú LED diódu pri de inicializovaní hnojenia a priradí premennú `fert_pause`. Celý `while (1)` cyklus sa opakuje každých 100 ms, na čom sú založené všetky vnútorné časovače.

6.7 Zapojenie a osadenie súčiastok

Všetky súčiastky z obrázkov 20 až 23, kde sa nachádzajú schematické návrhy, budú osadené na dva základné panely, ktoré sú popísané pod obrázkom 32. Na panely bližšie k nádrži s hnojivom sa bude nachádzať manažment vody, na prednom panely väčšina elektrických obvodov. Mimo tieto panely sa budú nachádzať dve signalizačné LED diódy a tlačidlo, ktoré budú umiestnené na stene vnútorného obalu zariadenia, a taktiež čerpadlo pre hnojivo, ktoré bude umiestnené priamo v nádrži. Osadenie bude prevedené pomocou skrutiek s matkami alebo sťahovacími páskami. V tých súčiastkach, ktoré sú prispôbené na skrutky vyhovujúcej veľkosti budú použité skrutky, inak budú použité sťahovacie pásky. Sťahovacie pásky budú taktiež použité na uchytenie čerpadla, čím ho bude možné pevne prichytiť bez rizika uvoľnenia matiek a vypadnutia skrutiek. Z prednej strany základných panelov sa budú nachádzať súčiastky, zo zadnej ich elektrické spoje. Rozmery panelov sú dané tak, aby prierez najhrubšieho použitého drôtu prešiel cez jedno oko panelu. Káble budú na panel prichytené pomocou sťahovacích pásek alebo lepidla.

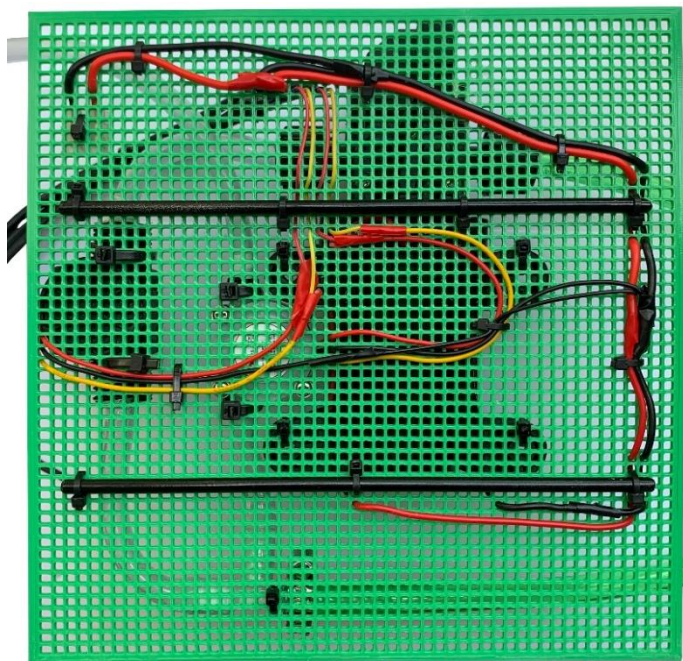


Obrázok 44 Manažment vody

Na obrázku 44 vidno umiestnenie hlavného čerpadla vody a dvoch senzorov prietoku. Väčší čierny senzor meria prietok vody, menší biely prietok hnojiva. Prívod a odvod vody je farebne rozlíšený použitím zelených hadíc, na vnútorné rozvody sú použité biele hadice. Hadice sú na hlavné čerpadlo uchytené pomocou šróbovacieho mechanizmu, ktorým čerpadlo disponuje. Na senzory prietoku sú hadice prichytené pomocou kombinácie teflónových pásov a lepidla na plasty. Výstupy z oboch senzorov sa

stretávajú v „T“ spojke, ktorej výstupom je výstup kvapaliny zo zariadenia. Tento výstup je navyše zaizolovaný uchytaním pozinkovanej hadicovej svorky.

Pohľad na zadnú stranu z obrázku 44 sa nachádza na obrázku 45. Zobrazuje spôsob uchytania a prepojovania káblov na základnom paneli. Farby jednotlivých káblov boli určené bežným spôsobom tak, aby káble čiernej farby reprezentovali zem, červenej alebo v niektorých prípadoch bielej napájanie a ostatné farby predstavovali káble, ktoré nesú údaje. V prípade manažmentu vody to sú žlté káble nesúce údaje zo senzorov prietoku. Pri zapojovaní káblov bol využívaný spôsob zbernice na kábli väčšieho prierezu, ako to je zobrazené na kábli zeme, na ktorý sa postupne zo spodu na vrch pripájajú káble zeme jednotlivých zariadení. Všetky potrebné káble sú vyvedené v hornej časti panelu, kde boli po jednotlivých celkoch obalené do zmršťovacích bužírok, pričom ich výstup bude na prednom paneli. V pravom hornom rohu sa nachádza šróbovací svorkovnica, na ktorú budú pripojené dva káble z čerpadla hnojiva. Na paneli sú taktiež umiestnené dve pozinkované a zafarbené kovové tyče, ktoré vyrovnávajú ohnutie panelu spôsobené váhou hlavného čerpadla, čím mu dodávajú pevnosť.

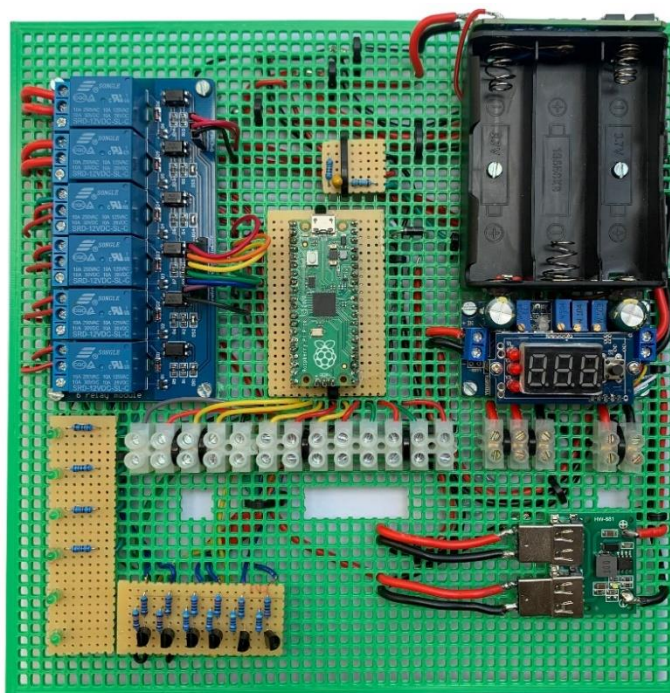


Obrázok 45 Manažment vody zo zadu

Panel manažmentu vody obsahuje z blokovej schémy len výstupné periférie. Správu napájania a riadiacu jednotku, spoločne s niektorými výstupnými perifériami, obsahuje panel s elektrickými obvodmi.

Z ľavej strany na pravú sa na paneli z obrázku 46 nachádza relé modul, pod ktorým sú kontrolné LED diódy a NPN tranzistory na doskách plošných spojov. Vedľa relé modulu je umiestnený delič napätia pre meranie stavu batérie, pod ktorým je mikrokontrolér Raspberry Pi Pico, taktiež na doskách plošných spojov. Ďalej je na batériovom boxe umiestnený balancér batérií, pod ním MPPT regulátor a úplne dole step-

down menič z +12 V na 2-krát +5 V. Súčiastky boli rozmiestnené tak, aby na seba nadväzovali a ich vzájomné prepojenie bolo čo najjednoduchšie. Podľa typu súčiastky sú káble prichytené pomocou skrutičiek alebo prispájkovaním. Pod stredom panelu sa nachádzajú tri otvory, nad ktorými sú umiestnené šróbovacie svorkovnice. Tieto otvory so svorkovnicami budú slúžiť na pripojenie káblov zo zadného panelu na predný, a taktiež na napojenie systému na solárny panel. Rozmiestnenie káblov v svorkovniciach je zľava doprava nasledovné. Sivý kábel spoločne s červeným (+3,3 V) budú umiestnené na tlačidlo. Dva žlté kábel spoločne s čiernym sú vývody na signalizačné LED diódy. Ďalej sa tam nachádza séria žltých a červených káblov, čo sú analógové výstupy a napájacie káble pre senzory vlhkosti pôdy. Zem bude zdieľaná so zemou LED diód. Nasledujúca séria zelených a žltých káblov sú digitálne výstupy a napájanie pre senzory prietokov. Tri samostatne stojace svorkovnice sú dva výstupy z relé modulov pre čerpadlá, a to +12 V a +5 V. Posledným káblom z tejto trojice je zem, ktorá prepojí predný a zadný panel. Na pravej strane sa nachádzajú dve svorkovnice pre pripojenie káblov zo solárneho panelu. Použitím svorkovnic bude v prípade potreby možné všetky medzi-panelové káble odpojiť a panel s elektrickými obvodmi vybrať, čím sa zjednoduší hľadanie a opravovanie chyby.



Obrázok 46 Zapojenie súčiastok na prednom panelu

Po zapojení súčiastok na oba panely nasledovalo ich umiestnenie do vytlačeného modelu a vzájomné prepojenie. Prepojovacie káble v ochranných bužírkach boli na predný panel vsunuté skrz vyrezaný otvor v strede. Po prepojení boli do zariadenia vložené batériové články, po čom nasledovalo jeho počiatočné testovanie, vďaka čomu bolo odstránených niekoľko nedostatkov. Jedným z nich bola prívodová hadica vody,

ktorá mala hrúbky stenu 1 mm a v zariadení sa vplyvom ohnutia lámala, čím zabraňovala plynulému prechodu vody do čerpadla. Táto hadica bola nahradená rovnakou hadicou, akou sú vytvorené vnútorné rozvody s hrúbkou steny 1,5 mm. Ďalším zistením bol rozdiel v tlakoch medzi nádržou hnojiva a zemou v spojený s obojsmernou možnosťou prechodu sekundárneho čerpadla. Vďaka čomu sa počas procesu zavlažovania napúšťala nádrž hnojiva vodou, a po ukončení bol celý objem nádrže samovoľne prečerpaný von. Riešenie spočívalo v umiestnení ventilu do cesty rozvodu hnojiva. Najväčšou prekážkou bolo rušenie vytvárané sekundárnym čerpadlom, ktoré rušilo meranie prietoku hnojiva, kedy po zapnutí hnojenia mikrokontrolér čítal nereálne hodnoty prietoku. Toto rušenie bolo zaznamenané na napájacom kábli čerpadla, ako aj na napájacom kábli mikrokontroléru, ktorého celkovú funkciu našťastie nejakým spôsobom neovplyvnilo. Mikrokontrolér bol softvérovým nastavením na detekciu padajúcich hrán zo senzora prietoku. Rušenie vytváralo vysokofrekvenčný parazitný signál na pôvodnom obdĺžnikovom signáli, vďaka čomu mikrokontrolér zaznamenával všetky parazitné padajúce hrany, ktoré stihol zaznamenať. Riešenie spočívalo v zapojení RC filtra dolnej priepusti na pin mikrokontroléru, čím bol tento parazitný signál odfiltrovaný na takú úroveň, ktorú mikrokontrolér nedokáže rozpoznať. Medzný kmitočet použitého filtra je 3,38 kHz.

Po detekcii a odstránení všetkých zaznamenaných prekážok bola IRIS dokončená a nasledovalo záverečné testovanie.



Obrázok 47 IRIS ako celok

7. TESTOVANIE SOLÁRNEHO ZAVLAŽOVANIA

Nahrátím programu do mikrokontroléru, osadením základných panelov do vnútorného dielu IRIS, ich vzájomnom prepojení a prepojení všetkých elektrických signálov výstupných periférií s predným panelom je pre overenie funkčnosti kompletne zariadenie nutné otestovať.

Testovanie bude overovať základné parametre a funkcie systému. Prvý test bude periodicky merať hodnoty batérie a prietok vody z čerpadla počas jednej periódy zavlažovania. Týmto testom sa overí správnosť elektrických prepojení a funkčnosť hlavného čerpadla. Predpokladom je spustenie zavlažovania pri dosiahnutí maximálneho napätia batérie, vďaka čomu by malo dôjsť k postupnému znižovaniu napätia. Ukončením funkcie čerpadla by malo napätie batérie postupne narastať až do nasledujúceho bodu dosiahnutia plného napätia, vďaka čomu bude možné porovnať vypočítaný a reálny výsledok dĺžky nabíjania.

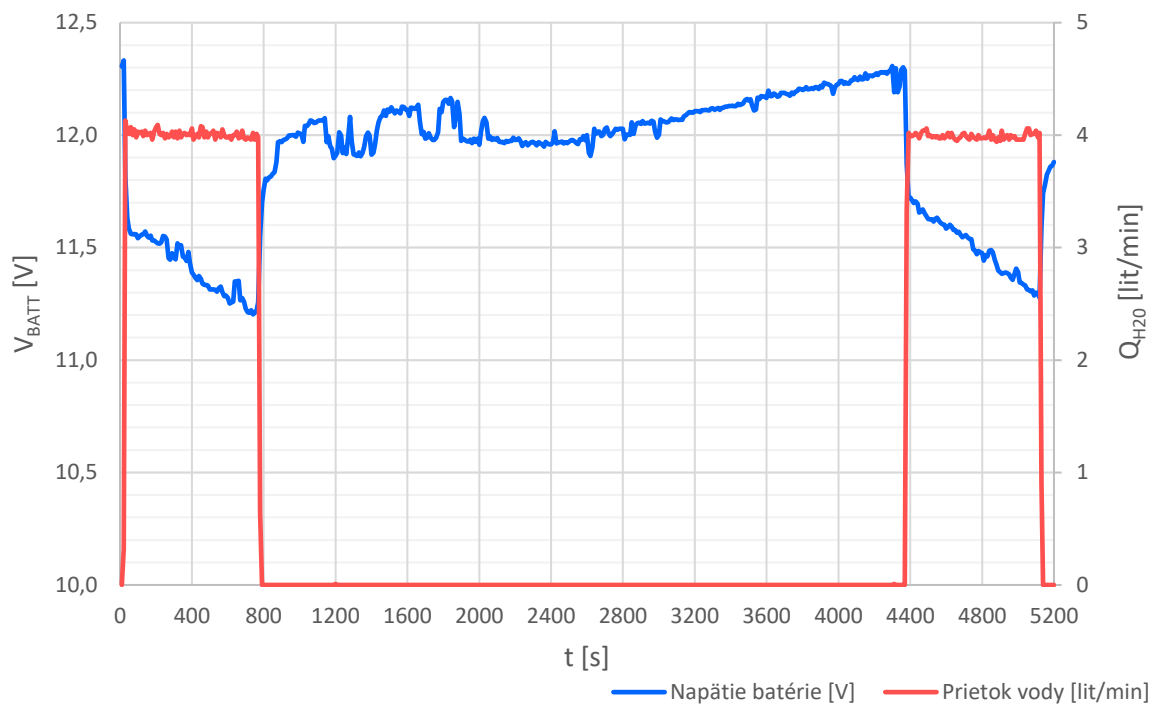
V druhom teste budú merané rovnaké dáta, ako počas prvého testu. Rozdiel bude spočívať vo vytiahnutí prívodnej hadice z vody počas procesu zavlažovania. Týmto spôsobom bude overená reakcia systému na nízke hodnoty z prietokomeru. Po zaznamenaní nízkych, alebo nulových hodnôt prietoku vody by sa malo zariadenie vypnúť a ostať vypnuté až do reštartu používateľom. Pre ochranu hlavného čerpadla pred samo-zničením je simulácia zastavenia prítoku vodu, ktorá môže byť spôsobená jej minútím alebo upchatím prívodnej či vývodovej hadice kritická.

Tretí test bude merať dáta z oboch senzorov vlhkosti pôdy. Test začne so skoro nabitými batériami pripravenými na proces zavlažovania. Sensory vlhkosti budú postupne ponárané do vody, čím by mal byť proces zavlažovania oddiaľovaný až do momentu vhodnej vlhkosti okolia. Simuláciou dvoch krajných prípadov (ponorenie a vytiahnutie z vody) bude overená ochrana rastlín pred prepoliavaním.

Počas posledného testu bude stlačením tlačidla inicializovaná funkcia hnojenia. Na začiatku testu budú batérie opäť takmer nabité. Po zapnutí hlavného čerpadla by sa malo zapnúť sekundárne čerpadlo hnojiva. Meraním dát oboch čerpadiel bude zistená funkčnosť procesu hnojenia a taktiež dodržania nastaveného pomeru vody k hnojivu na jeden proces zavlažovania.

7.1 Test periódy zavlažovania

Periódou zavlažovania značí dobu medzi dvomi spusteniami hlavného čerpadla. V medzičase periódy dôjde k jednému procesu zavlažovania a k nabitíu batérií. Systémovo je táto periódou nastavená na 2h. Avšak predpokladom je, že batérie budú nabité za kratší časový úsek. Pre zistenie času potrebného pre nabitie batérií na úroveň spustenia ďalšieho procesu bola funkcia dvoj-hodinového časovača vypnutá.

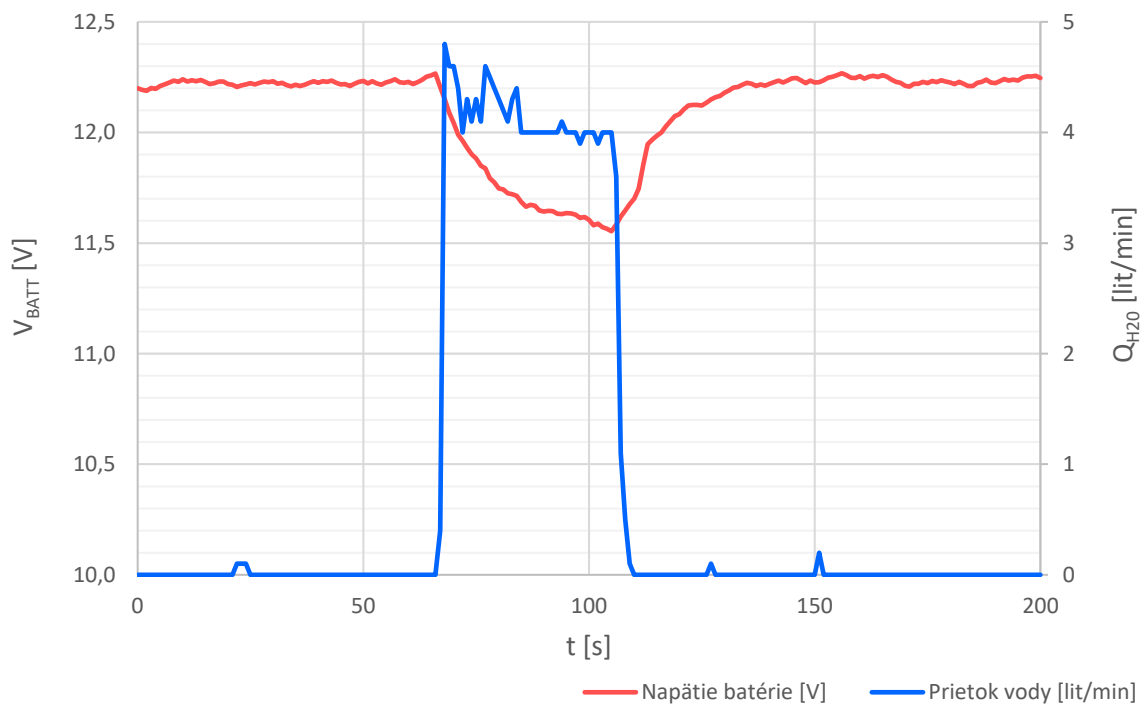


Obrázok 48 Graf závislosti napätia batérie a prietoku vody od času, meranie periódy zavlažovania

Obrázok 48 zobrazuje dva procesy zavlažovania. Meranie začalo s nabitými batériami, vďaka čomu došlo k zopnutiu hlavného čerpadla už v 20. sekunde. Vplyvom vystaveniu záťaži je možné na obrázku pozorovať prudký pád napätia batérie z 12,30 V na 11,70 V. Ďalej napätie postupne klesá až na úroveň 11,23 V pri ukončení zavlažovania v 770. sekunde. Najnižšie namerané napätie bolo 11,18 V v 709. a 711. sekunde. Priemerná hodnota prietoku je 4,01 lit/min, interval zapnutého čerpadla je 750 sekúnd (12,5 min.), a podľa dát z prietokomeru bolo prečerpaných 60 litrov vody. Reálna hodnota bude o niekoľko litrov menšia. Prietok sa prevažne pohybuje v intervale od 3,9 lit/min do 4,1 lit/min, pričom závisí od spôsobu uloženia hadice v zariadení. Po ukončení prečerpávania vody je možné pozorovať opätovný nárast napätia batérie na hodnotu 11,70 V, kedy bolo zariadenie privedené do stavu šetrenia energiou, tzn., že všetky výstupné periférie okrem tlačidla na inicializáciu hnojenia boli vypnuté. Po 770. sekunde prebehlo niekoľko cyklov rýchleho rastu a poklesu hladiny batérie, čo bolo spôsobené vplyvom výkyvov počasia. Približne od 2200. sekundy sa hodnota ustálila a len s menšími výkyvmi postupne narastala až do času 4372 sekúnd od začiatku merania, kedy sa relé modul čerpadla opäť zopol. Podľa nameraných údajov je celkový čas nabíjania batérií rovný približne jednej hodine, z čoho vyplýva, že potenciál IRIS nie je naplno využitý. Jedným z dôvodov skoro o polovicu kratšieho času nabíjania je dotácia energie zo solárneho panelu. Avšak meraním odberového prúdu primárneho čerpadla bolo zistené, že namiesto predpokladaného odberu 5,83 A do čerpadla tečie len 1,85 A, čo je hlavným dôvodom kratšieho času nabíjania batérií, ako aj priemerného prietoku 4 lit/min.

7.2 Test ochrany hlavného čerpadla

Testom ochrany hlavného čerpadla overí funkčnosť programu pri kritických situáciách, ktoré môžu pri bežnom používaní nastať. Jednou z nich je minútie vody v nádrži, čo pri predpokladanom odbere čerpadla 200 až 250 litrov denne, môže nastať v momente, kedy užívateľ zabudne nádrž dopustiť. Existuje viacero spôsobov vykonania tohto testu. Jedným z nich môže byť zapchatie prívodnej alebo vývodovej hadice. Pri tomto variante by mohlo dôjsť k zničeniu čerpadla, ak by mikrokontrolér nevyhodnotil situáciu správne. Bezpečnejším variantom s rovnakým účinkom bude vytiahnutie prívodnej hadice z vody, kedy by čerpadlo malo zvládnuť niekoľko sekúnd behu na prázdno bez poškodenia.

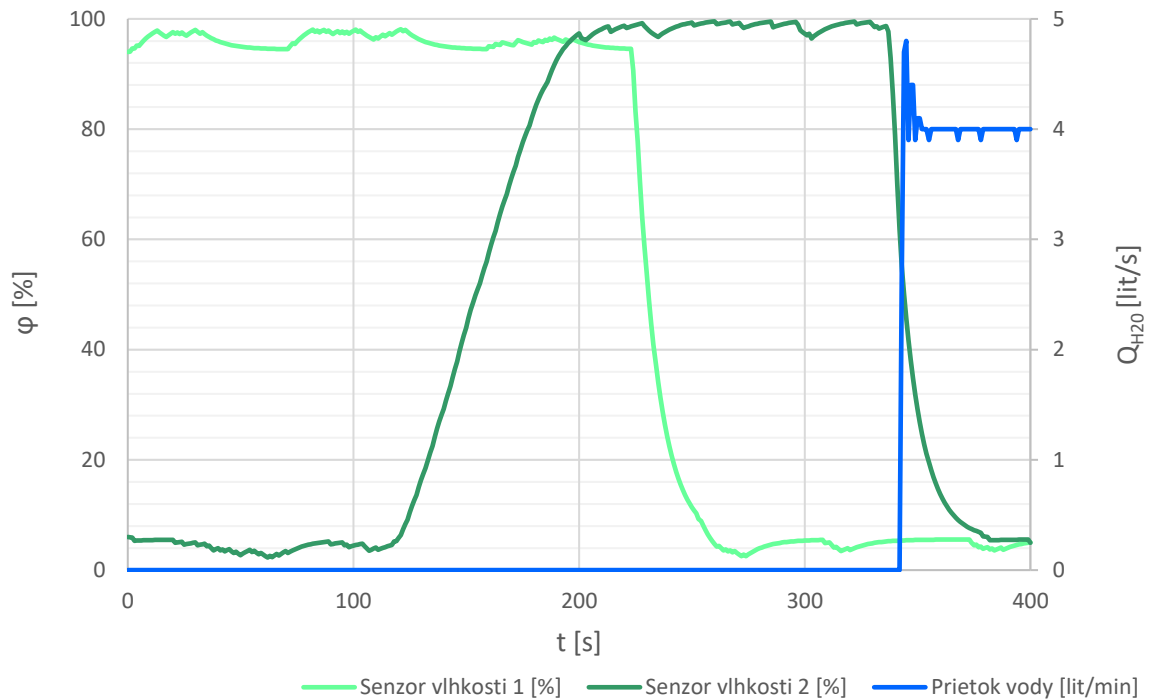


Obrázok 49 Graf závislosti napätia batérie a prietoku vody od času, test kritických podmienok

Na obrázku 49 je možné pozorovať, že batéria dosiahla požadované napätia v čase 62 sekúnd od začiatku merania. Pár sekúnd na to zaznamenal prietokomer prvé hodnoty prietoku vody. Čerpadlo bolo napojené na vodu až do času 105 sekúnd od začiatku testu, čo činí 38 sekúnd v zapnutom stave. Potom bola prívodná hadica vytiahnutá z vody, čo je možné pozorovať rýchlym poklesom prietoku z priemerných 4 litrov za minútu na nulu v priebehu piatich sekúnd. V momente poklesu prietoku je možné pozorovať zvýšenie napätia úrovne batérie, čo je spôsobené znížením veľkosti záťaže s nasledovným, pomerne rýchlym nabitím na počiatočnú hodnotu. Opätovné nabitie batérií značí zastavenie napájania čerpadla, čiže zariadenia s najväčším prúdovým odberom, a privedenie zariadenia do stavu nutného reštart pre opätovné spustenie časovaného zavlažovania.

7.3 Test ochrany pred prepolievaním

Pri časovanom zavlažovaní môže bez externej kontroly vlhkosti pôdy dôjsť k prepolievaniu rastlín. IRIS tento problém rieši dvomi senzormi vlhkosti pôdy, ktorých signály spracúva na dvoch zo svojich troch ADC vstupov.



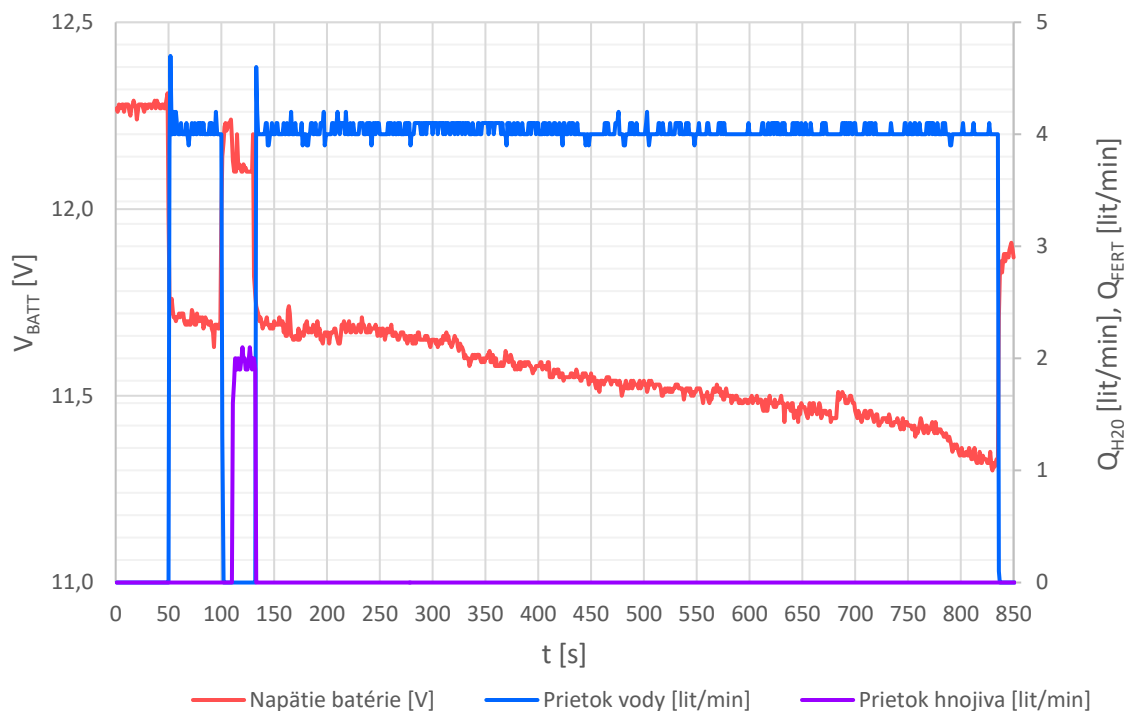
Obrázok 50 Graf závislosti vlhkosti okolia a prietoku vody od času, testovanie ochrany pred prepolievaním

Test začal s nabitými batériami, čím bola splnená jedna z troch podmienok pre začatie procesu zavlažovania. Druhou a treťou podmienkou je vlhkosť pôdy nižšia ako 50 %. V čase 0 sekúnd už bol prvý senzor vlhkosti ponorený do vody, tento senzor je zobrazovaný tyrkysovým priebehom na obrázku 48. Kvôli detekcii hodnoty prvého senzoru bolo po čas 155 sekúnd zavlažovanie odkladané. V tomto čase namerá aj druhý senzor hodnotu vlhkosti okolia vyššiu ako 50 %, čím neboli splnené dve z troch podmienok. Čas nábehu druhého senzoru z hodnoty 10 % na 90 % trval približne 60 sekúnd, čo predstavuje pomerne dlhé časové okno. Avšak v praxi bude len čas medzi dvoma cyklami zavlažovania rovný dvom hodinám, z čoho vyplýva, že senzory budú mať dostatok času na nameranie správnej hodnoty. Zostup meranej vlhkosti po vytiahnutí prvého senzoru z vody už trval výrazne kratšiu dobu. Podobný časový interval to zabralo aj druhému senzoru, ktorý pri dosiahnutí hodnoty nižšej ako 50 % spustil proces zavlažovania. Spustenie sa nachádza v 343. sekunde, kedy hodnota prietokomeru prudko vyrástla na 4,8 litra za sekundu a následne sa ustálila na hodnote 4 lit/s.

7.4 Test hnojenia

Aditívny proces hnojenia je druhou inováciou zaužívaného spôsobu solárneho zavlažovania. Ak je zariadenie zapnuté, tak je možné inicializovať tento proces stlačením tlačidla. Potvrdenie inicializácie je signalizované rozsvietením zelenej LED diódy na 2 sekundy. Proces inicializácie je možné zrušiť opätovným stlačením tlačidla, kedy sa potvrdenie signalizované rozsvietením červenej LED diódy na dobu 2 sekundy.

Po prechode z manuálneho na solárne zavlažovanie je pre plné pokrytie všetkých procesov súvisiacich s manuálnym zavlažovaním nevyhnutné, aby zariadenie bolo schopné vykonávať proces hnojenia.



Obrázok 51 Graf závislosti napätia batérie a prietoku oboch kvapalín na čase, test hnojenia

Meranie opäť začalo s nabitými batériami, pričom zavlažovanie bolo spustené v 50. sekunde. Tak, ako to značí algoritmus hnojenia na obrázku 43, sekundárne čerpadlo bolo spustené v 110 sekunde, čiže 60 sekúnd po spustení hlavného čerpadla. Sekundárne čerpadlo svojou konštrukciou dovoľuje prechod vody aj z výstupu na vstup v čase, keď nie je zapnuté. Pri maximálnom výkone 1,5 W toto čerpadlo nie je schopné prekonať tlak vody v rozvodoch zariadenia v čase, keď je hlavné čerpadlo zapnuté. Tým pádom by nebolo schopné prečerpať hnojivo do hlavného toku, čo je dôvodom, prečo je potrebné v čase hnojenia hlavné čerpadlo vypnúť. Hlavné čerpadlo sa vypne v nastavenom čase 10 sekúnd pred začatím hnojenia. Desať sekundový časový interval bol zvolený z dôvodu ustálenia vody v hadiciach. So zapnutím sekundárneho čerpadla sa automaticky zopne aj ventil, ktorý dovoľí prechodu hnojiva do hlavnej vetve rozvodu vody skrz senzor prietoku.

Senzor prietoku zaznamenával hodnoty od 1,8 do 2,1 lit/min, čo činí priemer 1,99 lit/min. Po skončení hnojenia bolo prečerpaných 0,86 litra hnojiva. Celkový prečerpaný objem vody bol rovný 60,66 litra. Vydelením objemu vody a objemu hnojiva získame koeficient pomeru 70,53. Dodržaním pomeru 1 lit na 15 ml, by bol koeficient rovný 66,67. Pri zohľadnení faktu, že prečerpaný objem vody bude vzhľadom na prvotné hodnoty po zapnutí čerpadla o niečo nižší, a taktiež, že konečný rozdiel koeficientov nie je výrazný, bol proces hnojenia vyhovujúci požiadavkám.

8. ZÁVER

Stanoveným cieľom tejto práce bolo zoznámenie sa s problematikou solárneho zavlažovania s nasledovným navrhnutím, zostrojením a otestovaním zariadenia tohto typu s možnosťou rozšírenia o ďalšie funkcie.

Začiatok práce sa venuje analýze produktov firmy Irrigatia, ktorá dominuje na trhu so solárnym zavlažovaním. Vlastné riešenie ponúka inováciu v tejto oblasti, pričom sa odráža od zaužívaných princípov ukladania a využívania slnečnej energie pre solárne zavlažovanie. Inovácia spočíva v aditívnej funkcii hnojenia, ktoré je inicializované stlačením tlačidla, a taktiež ochranou čerpadiel pred samo-zničením a meraním vlhkosti pôdy, vďaka čomu sa zvýši ekologickosť systému spojená so správnou reguláciou a šetrením vody.

Po návrhu vlastného riešenia boli pre správny výber súčiastok rozobrané jednotlivé okruhy solárneho zavlažovania. Výber okruhov sa odrážal od primárnych komponentov tohto systému. Prvým komponentom rozboru boli solárne panely, pričom vybraný bol polykryštalický solárny panel 12 V/10 W. Nadväzne boli analyzované batérie vo funkcii úložiska elektrickej energie, kde boli vďaka hustote energie, miere samo-vybíjania a absencii pamäťového efektu vybrané lítium-iónové batérie typu 18650 s nominálnym napätím 3,7 V a kapacitou 2600 mAh. Ďalší okruh sa zaoberal membránovým čerpadlom vody. Vybraný bol typ FL-3308, s príkonom 70 W pri 12 V a prietokom 4 – 6 lit/min. Ako posledný hlavný komponent bol určený mikrokontrolér vo funkcii riadiacej jednotky, a to Raspberry Pi Pico.

Následujúca časť bakalárskej práce sa venuje navrhovaniu a zostrojovaniu zariadenia. Prvým krokom boli výpočty, ktoré sa odrážali od objemu vody, ktorú je potrebné prečerpať pre zavlaženie priemernej záhrady pri opakovanom zavlažovaní viac krát denne. Ak je objem určený na 50 litrov, tak jedna perióda zavlažovania by pri slnečnom počasí nemala trvať dlhšie ako 2 hodiny. Návrh pokračoval vytvorením blokovej schémy, ktorá je na najvyššej úrovni tvorená správou napájania, riadiacou jednotkou a výstupnými perifériami. Z blokovej schémy vychádza elektrický návrh, ktorý zahrňuje aj vytvorenie DPS. Následne bol vytvorený model zariadenia s definovaním jeho názvu, IRIS (integrováný zavlažovací systém). Pred vytvorením modelu bol ako základný pilier návrhu určený minimalizmus a jednoduchosť. Model bol navrhnutý v programe SolidWorks, a je tvorený vonkajšou a vnútornou časťou. Návrh bol ukončený zapojením a osadením súčiastok do dvoch základných panelov, prepojenia súčiastok boli realizované na ich zadnej strane, zatiaľ čo prepoj medzi panelmi je tvorený zbernicou.

Záver práce sa venuje testovaniu IRIS. Prvým testom bola perióda zavlažovacieho cyklu, kedy po prečerpaní 60-tich litrov vody bolo zavlažovanie opätovne spustené po jednej hodine. Ďalej bol prevedený test ochrany zariadenia, kedy po vytiahnutí prívodnej hadice z vody systém detegoval chybu a zariadenia vypol. Test pred prepolievaním spoľahlivo spustil zavlažovanie až v momente namerania správnych hodnôt vlhkosti.

V poslednom teste bolo inicializované hnojenie, kde bol počas zapnutia sekundárneho čerpadla prečerpaný taký objem hnojiva, aby bol dodržaný stanovený pomer.

Hlavné výhody IRIS spočívajú v eliminácii manuálnej námahy pri zavlažovaní rastlín, ich ochrane pred prepolievaním, ktoré môže byť spôsobené automaticky nastaveným zavlažovacím systémom alebo vplyvom ľudského faktoru. Použitím recyklovateľného materiálu, kvapôčkovej závlahy a ochrany pred prepolievaním je dosiahnutá vysoká úroveň ekologickosti zariadenia. Ochrana čerpadiel pred samo-zničením môže predĺžiť životnosť, zatiaľ čo aditívna funkcia hnojenia prispieje k pokrytiu všetkých procesov spojených so zavlažovaním.

I keď zariadenie bolo navrhnuté tak, aby odolávalo externým podmienkam, tak ho nebolo možné proti vonkajším vplyvom dlhodobo testovať. Najväčšou nevýhodou je náročnosť opravy, ktorá je spôsobená priestorovým umiestnením súčiastok z prednej strany základného panelu a ich spojov zo strany zadnej. Ako zjednodušenie opravy boli do zariadenia pridané kontrolné LED diódy, vďaka ktorým bude možné jednoduchšie lokalizovať poruchu.

IRIS predstavuje kompaktný systém solárneho zavlažovania, ktorý disponuje viacerými prídavnými funkciami. Jej funkčnosť, tak ako aj funkčnosť prídavných funkcií, bola otestovaná s vyhovujúcimi výsledkami. Ciele práce boli splnené.

LITERATÚRA

- [1] L., Lawrence a KAZMERSKI. Photovoltaics: A review of cell and module technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Elsevier Science, 1997, 1997(3), 71-170 [cit. 2021-10-9]. ISSN 1364-0321. 1364-0321(97)00002-6. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032197000026>
- [2] *The Nobel Prize: Physics* [online]. Stockholm, Sweden: The Nobel Foundation, 2021 [cit. 2021-10-9]. Dostupné z: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/summary/>
- [3] Jan Czochralski—father of the Czochralski method. *Journal of Crystal Growth* [online]. E, 2002, March 2002, (236), 1-4 [cit. 2021-10-9]. ISSN 0022-0248. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022024801021959>
- [4] Fotovoltaika. MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. s. 59. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 256 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [5] *Our World in Data: Solar PV module prices* [online]. England and Wales: Global Change Data Lab, 2019 [cit. 2021-10-9]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices>
- [6] *Photoelectric effect* [online]. London: Encyclopædia Britannica, 2021 [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/photoelectric-effect>
- [7] *Periodic Table* [online]. London: The Royal Society of Chemistry, 2021 [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: <https://www.rsc.org/periodic-table>
- [8] NAVE, R. *P-N Junction* [online]. Atlanta, Georgia: Georgia State University, 2017 [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/pnjun.html>
- [9] Princip funkce fotovoltaického článku. MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. 62 - 65. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 256 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [10] JORDAN, Dirk a Sarah KURTZ. *Overview of Field Experience - Degradation Rates & Lifetimes* [online]. National Renewable Energy Laboratory of the U.S. Department of Energy, 14.09.2015, s.13. [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/65040.pdf>
- [11] Sustainable solutions and the SDGs. *Eco-Business* [online]. Singapore, 9.3.2020 [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: https://www.eco-business.com/news/the-elephant-in-the-room-can-the-solar-industry-go-circular/?fbclid=IwAR2wEb4wYEEY16ntJLi7MHGf4UshRbY2K08kEZ0xNV5KB1pVyNx_CcvRyhnI
- [12] HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. *IV CURVE: Photovoltaics Education Website* [online]. Arizona: Arizona State University, 2019 [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>
- [13] SUGIANTO, Sugianto. Comparative Analysis of Solar Cell Efficiency between Monocrystalline and Polycrystalline. *Department of Electrical Engineering* [online].

- Indonesia: Muslim University Indonesia, 2020, , 3 [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/347350127_Comparative_Analysis_of_Solar_Cell_Efficiency_between_Monocrystalline_and_Polycrystalline
- [14] *Thin-Film Solar Panels* [online]. Boulder, Colorado: American Solar Energy Society, 2021 [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: <https://ases.org/thin-film-solar-panels/>
- [15] L. BERTRAND, Gary. *About Batteries: Missouri's Technological University* [online]. Rolla: University of Missouri-Rolla, 2021 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <http://www.chemistry.wustl.edu/~coursedev/Online%20tutorials/Redox.htm>
- [16] ARORA, Pankaj a Zhengming (JOHN) ZHANG. Battery Separators: Introduction and Scope. *Chemical Reviews* [online]. 2004, 13.10.2004, 2004(10), 2 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/cr020738u#>
- [17] *Nickel-Cadmium Battery* [online]. Brusel: European Association for Storage of Energy, 2016, 1 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE_TD_Electrochemical_NiCd.pdf
- [18] *Nickel-Metal Hydride Battery* [online]. Brusel: European Association for Storage of Energy, 2016, 1 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_NiMH.pdf
- [19] *Lithium-Ion Battery* [online]. Brusel: European Association for Storage of Energy, 2016, 1 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_LiIon.pdf
- [20] *Diaphragm Pump* [online]. Japan: TACMINA [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://www.tacmina.com/learn/basics/01.html>
- [21] *Raspberry Pi Pico Tech Specs* [online]. Cambridge: Raspberry Pi Foundation, 2021 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberrypi-pico/specifications/>
- [22] *Půdní vlhkoměr analogový s antikorozní sondou V1.2* [online]. Havlíčkův Brod: drátek.cz, 2021 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://dratek.cz/docs/produkty/1/1432/1531824339.pdf>
- [23] *Bipolární tranzistor, NPN, THT, 45V, 0,1A, 0,625W, TO92 BC547A BULK* [online]. Dobrovíz: GMElectronic, 2021 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.210-025.1.pdf>
- [24] *Půdní vlhkoměr včetně sondy HW-390, antikorozní* [online]. Ostrava: Hadex, spol. s r.o., 2021 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/spec/m446.pdf>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

2CO	Oxid uhoľnatý
ABS	Akrylonitrilbutadiénstyrén
ADC	Analog to Digital Converter
ALU	Arithmetic Logic Unit
C	Uhlík
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CPU	Central Processing Unit
DPS	Doska Plošných Spojov
DPS	Doska Plošných Spojov
DRAM	Dynamic Random Access Memory
EVA	Ethylene Vinyl Acetate
FDM	Fused filament fabrication
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
GP	General Purpose I/O
I/O	Input/Output
I2C	Inter-Integrated Circuit
IMPP	Current at Maximum Power Point
IRIS	Integrated Irrigation System
ISC	Short Circuit Current
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	Light Emitting Diode
LED	Light Emitting Diode
Li-ion	Lítium-ión
MPPT	Maximum Power Point Regulator
NiCd	Nikel-kadmium
NiMH	Nikel-metal-hybrid
PET	Polyetyléntereftalát
PLA	Polymliečna Kyselina
PMPP	Power at Maximum Power Point
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
Si	Kremík
SiO ₂	Oxid kremičitý
SOC	State of Charge
SRAM	Static Random Access Memory
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UMPP	Voltage at Maximum Power Point

UOC	Open Circuit Voltage
USB	Universal Serial Bus
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Symboly:

c	rýchlost' svetla	(m/s)
DoD	State of Discharge, stav vybitia	(%)
E	energia	(J)
f	frekvencia	(Hz)
h	Planckova konštanta	(-)
I	elektrický prúd	(A)
P	výkon	(W)
Q	elektrický náboj	(C)
R	elektrický odpor	(Ω)
SoS	State of Charge, stav nabitia	(%)
t	čas	(s)
U	napätie	(V)
λ	vlnová dĺžka	(m)

ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA A. ELEKTRONICKÁ PRÍLOHA	83
--	-----------

Príloha A. Elektronická príloha

Elektronická príloha obsahuje dokumentáciu elektrického zapojenia vytvorenú v programe CadSoft Eagle 7.7.0.

Taktiež obsahuje všetky 3D modely vytvorené v programe SolidWorks 2020. Formát modelov je SLDPRT, kompletná zostava má formát SLDASM.

Ďalej je priložený súbor obsahujúci zdrojový kód so všetkými použitými funkciami. Súbor bol vytvorený vo vývojovom prostredí Visual Studio Code.

Posledným súborom sú namerané dáta testovania vynesené do programu Excel, z balíku Microsoft Office 2016. Uložené sú vo formáte xlsx. Údaje boli získavané pomocou UART komunikácie mikrokontroléru s konzolou Raspberry Pi 3 Model B.