



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ELEKTRONICKÁ VZDUCHOVKOVÁ STŘELNICE

ELECTRONIC AIR RIFLE RANGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dan Šrámek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej

Baštán

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Dan Šrámek

ID: 240448

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Elektronická vzduchovková střelnice

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vytvořit řídicí jednotku pro elektronickou vzduchovkovou střelnici a implementovat firmware jak pro řídicí, tak i pro terčové jednotky.

1. Seznamte se se stávajícím HW terčové jednotky.
2. Navrhněte koncepci vzduchovkové střelnice.
3. Z dostupných modulů navrhněte a sestavte řídicí jednotku střelnice.
4. Realizujte FW pro terčové moduly.
5. Realizujte FW pro řídicí jednotku.
6. Řešení otestujte a zhodnoťte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

GAJSKI, Daniel D., et al. Embedded system design: modeling, synthesis and verification. Springer Science & Business Media, 2009.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 22.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Baštán

Ing. Miroslav Jirgl, 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

Práca sa zaoberá tvorbou elektronickej vzduchovkovej strelnice. Analyzuje časť hardvéru, ktorý už existuje, popisuje návrh a tvorbu jeho chýbajúcej časti. Tento návrh bol vytvorený s ohľadom na vlastnosti produktov dostupných na trhu. Pre komunikáciu medzi terčovými jednotkami a riadiacou jednotkou strelnice je využívaný modul nRF24L01. Mikrokontrolér ovládajúci každú z terčových jednotiek je ATmega328p, pre riadiacu jednotku bolo vybrané ESP32-S3. V práci je tiež opísaný vývoj firmvéru pre oba spomenuté mikrokontroléry. Celý vytvorený systém strelnice je ovládaný pomocou dotykového HMI od firmy Nextion.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

ATmega, Doska plošných spojov, ESP32, Nextion, nRF24L01, Vzduchovková strelnica

ABSTRACT

The thesis deals with the design of an electronic air rifle range. It analyzes a part of the hardware that already exists, describes the design and creation of its missing part. This design has been created considering the features of the products available in the market. The nRF24L01 module is used for the communication between the target units and the control unit of the air rifle range. The microcontroller controlling each of the target units is ATmega328p, for the control unit ESP32-S3 has been selected. The development of firmware for both mentioned microcontrollers is also described in the paper. The whole developed firing range system is controlled by a touchscreen HMI from Nextion.

KEYWORDS

Airgun shooting range, ATmega, ESP32, Nextion, nRF24L01, Printed circuit board

ŠRÁMEK, Dan. *Elektronická vzduchovková střelnice*. Bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2024. Vedúci práce: Ing. Ondřej Baštán,

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Dan Šrámek
VUT ID autora: 240448
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečnéj práce: Elektronická vzduchovková střelnice

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím 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 vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Ondřejovi Baštánovi za odborné vedenie a konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci. Ďalej by som rád poďakoval elektro sekcii tímu TU Brno Racing za poskytnutie priestorov a vybavenia počas veľmi kritických víkendov.

Obsah

Úvod	10
1 Športová streľba	11
1.1 Disciplíny	11
1.2 Prieskum trhu	11
1.2.1 Seta	12
1.2.2 SQ Air	12
1.2.3 AttackSense	13
1.2.4 Zhrnutie	14
2 Návrh strelnice	15
2.1 Terčová jednotka	16
2.1.1 Napájanie	16
2.1.2 Hlavná procesorová jednotka	17
2.1.3 Komunikačný modul	18
2.1.4 Ostatné periférie	19
2.1.5 Mechanická časť terčovej jednotky	20
2.2 Návrh riadiacej jednotky	21
2.2.1 Centrálna riadiaca jednotka	21
2.2.2 Komunikačný modul	23
2.2.3 HMI	23
2.2.4 Napájanie	24
2.2.5 Periférie	25
2.2.6 Realizácia DPS	25
3 Implementácia kódu	27
3.1 Terčová jednotka	27
3.1.1 Detekcia polohy terča	27
3.1.2 Meranie času a ovládanie servo motora	28
3.1.3 Sériová komunikácia SPI	29
3.1.4 Ovládanie komunikačného modulu	29
3.1.5 Hlavná programová slučka	31
3.2 HMI	33
3.2.1 Popis vytvoreného rozhrania	34
3.3 Kontrolná jednotka	38
3.3.1 Obsluha tlačidiel	39
3.3.2 Meranie napätia na batérii	39

3.3.3	Komunikácia s modulom nRF24L01	40
3.3.4	Komunikácia s HMI Nextion	42
3.3.5	Strelecké programy	43
3.3.6	Komunikácia s terčovými jednotkami	44
3.4	Testovanie	45
Záver		46
Literatúra		47
Zoznam symbolov a skratiek		51
Zoznam príloh		53
A	Terčová jednotka	54
A.1	Elektrotechnická schéma terčovej jednotky	54
A.2	Predná strana DPS terčovej jednotky	55
A.3	Zadná strana DPS terčovej jednotky	56
A.4	Model zostavenej terčovej jednotky	57
B	Riadiaca jednotka	58
B.1	Elektrotechnická schéma riadiacej jednotky	58
B.2	Predná strana navrhutej DPS riadiacej jednotky	59
B.3	Zadná strana navrhutej DPS riadiacej jednotky	60
C	Komunikačný modul nRF24L01	61
C.1	Tabuľka príkazov pre ovládanie modulu nRF24L01	61
C.2	Zoznam funkcií implementovaných knižnicou nRF24L01-avr-bareminimum	61
D	HMI	62
D.1	Tabuľka objektov a ich popis	62
E	EPS32 FreeRTOS	63
E.1	Zoznam využívaných úloh a ich popis	63
E.2	Zoznam využívaných front a ich popis	63

Zoznam obrázkov

1.1	Elektronický terč Seta Score 10 [2]	12
1.2	Obrazovky výberov streleckých programov systému SQ Air [3]	13
1.3	Terčová jednotka systému AttackSense [4]	13
2.1	Diagram modulov systému a ich prepojenia	15
2.2	Diagram komponentov terčovej jednotky a ich prepojení	16
2.3	Schéma elektrického zapojenia Step-up	17
2.4	Komunikačný modul nRF24l01+PA+LNA s externou anténou [12]	18
2.5	Nákres typického využitia TCRT5000 [13]	19
2.6	Pohľady sprava, spredu a zľava na mechaniku terčovej jednotky	20
2.7	Diagram komponentov riadiacej jednotky a ich prepojení	21
2.8	Diagram funkčných modulov EPS32 [14]	22
2.9	Štandardné zapojenie MT3608 [8]	25
2.10	Schéma zapojenia pomocného obvodu pre meranie napätia na batérii	26
3.1	Vývojový diagram prerušovacej rutiny IR senzorov	27
3.2	Diagram popisujúci dátový prenos pomocou SPI	29
3.3	Zloženie jedného packetu podľa protokolu Enhanced Shockburst™	30
3.4	Vývojový diagram hlavného programového cyklu terčovej jednotky	31
3.5	Stránka HMI s názvom MainMenu	34
3.6	Stránka HMI s názvom ModeSelect	34
3.7	Stránka HMI s názvom Timers	35
3.8	Stránka HMI s názvom Settings	35
3.9	Stránka HMI s názvom ChannelChange	36
3.10	Stránka HMI s názvom CountdownChange	36
3.11	Stránka HMI s názvom FoundTargets	37
3.12	Vývojový diagram popisujúci obsluhu tlačidiel	39
3.13	Vývojový diagram popisujúci periodické čítanie napätia na batérii	39
3.14	Vývojový diagram ukazujúci úlohu NRF Interaction	40
3.15	Vývojový diagram popisujúci proces párovania terčových jednotiek	41
3.16	Vývojový diagram popisujúci úlohu Nextion-Set-Get	42
3.17	Vývojový diagram popisujúci úlohu Countdown	43
3.18	Vývojový diagram popisujúci úlohu Time Writer	43
3.19	Diagram opisujúci testovací scenár	45

Úvod

Už od prvého momentu, keď boli vytvorené strelné zbrane si ľudia pomeriavali svoje schopnosti v strelbe. Porovnávali sa v presnosti a rýchlosti strelby, vzdialenosti na ktorú dokázali stieľať a rôznych iných disciplínach. Neskôr boli vytvorené vzduchové zbrane, ktoré nevyužívali pušný prach, boli bezpečnejšie a športová strelba dostala zasa nové možnosti rozvoja. Ako prišla doba elektronizácie adaptovali sa aj terče. Prešlo sa z mechanicky ovládaných terčov ku terčom, ktoré je možné zdvihnúť stlačením jedného tlačidla. Namiesto papierových terčov sa začali používať rôzne elektronické metódy vyhodnotenia založené na optických či vibračných princípoch.

Táto práca sa zaoberá tvorbou elektronickej strelnice. Pôjde o systém zložený z piatich terčových jednotiek a jednej ovládacej jednotky. Bude umožňovať dynamické rozostavenie terčov v rôznych vzdialenostiach nezávisle od seba, užívateľovi ponúkne výber až z troch streleckých režimov zameraných na jeho rýchlosť strelby a postreh.

1 Športová strelba

Športová strelba je okruh športov zameriavajúcich sa na využitie strelných zbraní rôznych druhov pre účely súťaženia. Medzi najbežnejšie používané patria vzduchové pištole a pušky, malokalibrové zbrane a brokovnice. Súťažiaci je hodnotený na základe rýchlosti a presnosti strelby. Súťažné kategórie kladú na tieto schopnosti rôzny dôraz.

1.1 Disciplíny

V kategóriách zameraných najmä na presnosť súťažiaci strieľajú na terč, ktorý je rozdelený kružnicami s rôznymi polomerami na bodové oblasti (spravidla je najmenší kruh hodnotený desiatimi bodmi). Veľkosť terčov, ich bodových oblastí a vzdialenosť terča od strelca sa líši s ohľadom na využívanú zbraň a súťažnú disciplínu. Najbežnejšími disciplínami sú:

- vzduchová puška na 10 metrov,
- vzduchová pištoľ na 10 metrov,
- pištoľ na 25 metrov,
- puška na 50 metrov,
- pištoľ na 50 metrov,
- puška na 300 metrov.

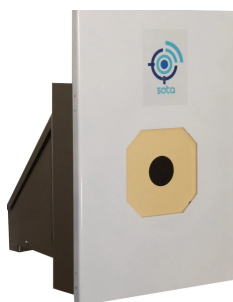
Pre rýchlostné kategórie je hodnotenie zamerané na schopnosť súťažiaceho reagovať na novo vzniknuté podnety vo forme objavujúcich sa terčov. Terče sú spravidla menšie a nie sú rozdelené na bodovacie sekcie. Vzdialenosť medzi strelcom a terčom je rozdielna na základe súťažnej disciplíny. Hlavným parametrom hodnotenia týchto disciplín je čas dokončenia disciplíny a počet zasiahnutých terčov. Do tejto kategórie patria najmä disciplíny zamerané na strelbu z brokovnice. [1]

1.2 Prieskum trhu

Pretože sa práca zameriava na vytvorenie vzduchovkovej strelnice, prieskum trhu v tejto kapitole úplne vynecháva strelnice využiteľné pre brokovnice, malorážky alebo zbrane využívajúce ostrú muníciu. Prieskum trhu zameraný na elektronicky ovládané strelnice pre vzduchové pištole a pušky ukázal, že existuje niekoľko typov produktov tohoto druhu.

1.2.1 Seta

Seta je spoločnosť ponúkajúca elektronické terčové zariadenia určené na strelbu zo vzduchových zbraní. Pre tieto účely sú vybavené lapačom s tlmiacim gélom, ktorý redukuje zvuk nárazu a množstvo kovového prachu vypusteného do vzduchu pri náraze diabolky alebo broku na kov lapača. Spoločnosť Seta ponúka dva modely: Seta Score 10 a Seta Score 25/50; číselné označenie v názve určuje streleckú vzdialenosť disciplíny, na ktorú je terč veľkostne prispôsobený. Oba terče si vyžadujú stabilné ukotvenie do podlahy alebo na stenu. Cena Seta Score 10 je 1 300€, pre model Seta Score 25/50 je cena 2 300€.



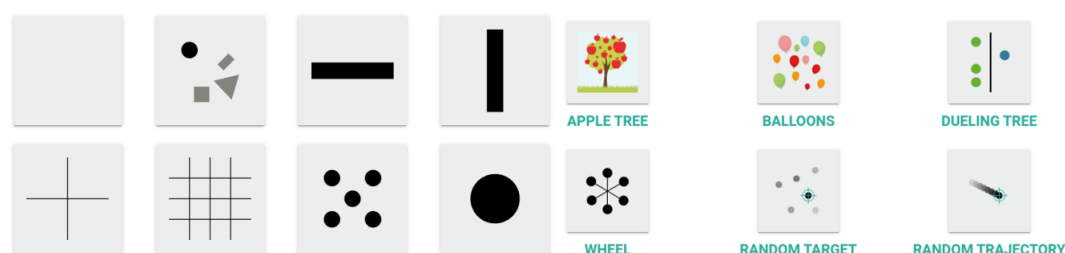
Obr. 1.1: Elektronický terč Seta Score 10 [2]

Terč vyhodnotí miesto zásahu pomocou ultrazvukových snímačov; tento typ detekcie polohy zásahu je medzi elektronickými terčmi najbežnejší. Súčasťou systému je taktiež softvér kompatibilný s počítačom alebo tabletom fungujúcim na operačnom systéme Windows 10, s terčom komunikuje káblovým prepojením alebo bezdrôtovou sieťou. Pomocou softvéru strelec môže vidieť bodové ohodnotenie jeho streľby a pozície zásahov. [2]

1.2.2 SQ Air

SQ Air je produkt od spoločnosti Sport Quantum. Je to elektronický terč určený na strelbu na vzdialenosť 10 metrov. SQ Air sa od konkurencie odlišuje svojou konštrukciou a interaktivitou. Bežne využívaný papierový terč je nahradený odolným displejom. Pomocou dodávaného softvéru (navrhnutého pre operačný systém Android) užívateľ môže meniť zobrazovaný terč, parametre displeja ako napríklad pozadie terča, jas, atď... alebo simulovať požadovanú vzdialenosť. Komunikácia medzi ovládacím zariadením a terčom je bezdrôtová. V ponuke streleckých programov sa nachádzajú štandardné kruhové terče rôznych veľkostí, terče atypický tvarov (výseky rôznych geometrických útvarov), pohybujúce sa terče, ako aj programy zamerané na postrehové a časové disciplíny.

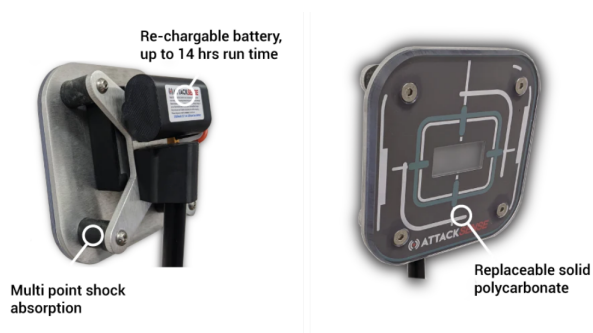
Detekcia miesta nárazu je realizovaná spojenou sústavou nárazovej a meracej platne. Projektil narazí do prvej z nich, tým vyvolá mechanické vibrácie na meracej platni, na ktorej sú umiestnené piezoelektrické snímače. Na základe výstupných signálov týchto snímačov systém vyhodnotí polohu zásahu. Kvôli povahe tejto konštrukcie je maximálna odporúčaná energia projektilu 7,5 joulu. Tak ako vyššie spomenutý Seta Score, aj tento elektronický terč vyžaduje pevné ukotvenie do podlahy alebo steny. Cena SQ Air 10 je 3 400€. [3]



Obr. 1.2: Obrazovky výberov streleckých programov systému SQ Air [3]

1.2.3 AttackSense

AttackSense je produkt od rovnomennej firmy, ktorý sa zameriava na reakčnú strelbu. Systém je konštruovaný z terčových jednotiek o veľkosti 15x15 cm a ovládacieho zariadenia (viď Obr.1.3). Terčové jednotky vyhodnocujú zásah dvoj-stavovo (trafil/netrafil), nedokážu vyhodnotiť polohu zásahu na terči. V ich strede sa nachádza RGB svietidlo, ktoré je využívané pre signalizáciu zásahu.



Obr. 1.3: Terčová jednotka systému AttackSense [4]

Systém podporuje prepojenie až 86 terčových jednotiek formou Leader-Follower (starým názvom Master-Slave). Terčová jednotka, ktorá je zapnutá ako prvá, sa správa ako Leader pre všetky ostatné terčové jednotky. Leader jednotka vytvorí wi-fi sieť, pomocou ktorej systém komunikuje s ovládacím zariadením. Ovládanie

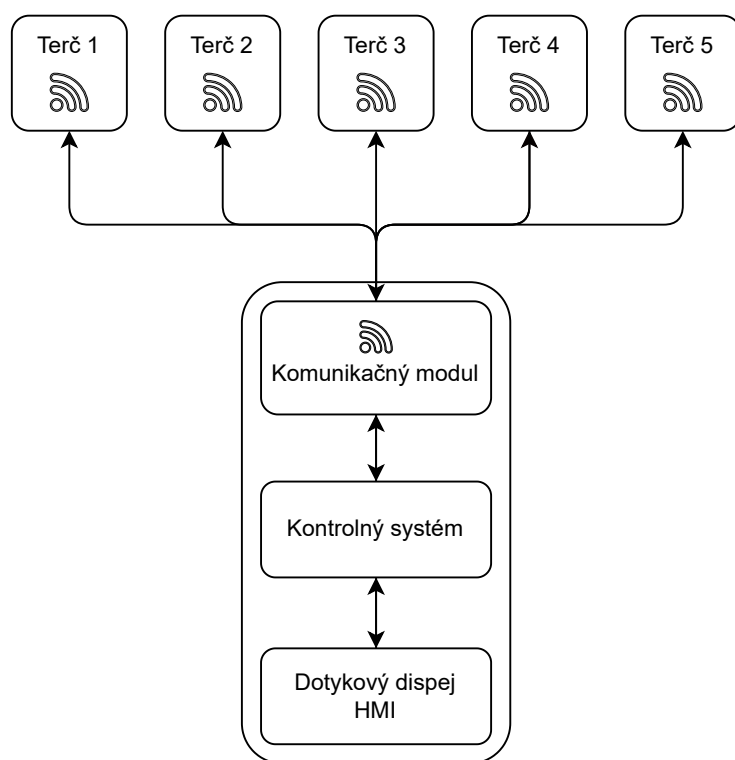
funguje pomocou aplikácie pre systémy android. V aplikácii môže užívateľ nastaviť farbu RGB svetidla jednotlivých terčov, poradie ich aktivácie a jej dĺžku. Užívateľ si taktiež môže vybrať z niekoľkých výrobcov vytvorených disciplín ako napríklad spínanie náhodného terča alebo súťaž dvoch strelcov. Terčové jednotky sa upevňujú do požadovanej polohy nasúvacím mechanizmom. Nástavec na nasunutie je možné ukotviť do steny alebo uchytiť na prenosný stojan. Cena za balenie troch terčových jednotiek je 500€, balenie šiestich terčových jednotiek 975€. [5]

1.2.4 Zhrnutie

Na trhu sa nachádzajú rôzne produkty zamerané na strelbu zo vzduchových zbraní. Najpodstatnejšou výhodou systémov dostupných na trhu je schopnosť presne a rýchlo vyhodnocovať polohu nárazu projektilu na základe snímačov či elektromechanických princípov. Medzi najčastejšie nevýhody patrí nutnosť ukotvenia, vysoká cena, nemožnosť adaptovať systém na rôzne disciplíny a potreba ovládacieho zariadenia, ktoré nie je súčasťou dodaného systému.

2 Návrh strelnice

Systém strelnice bude navrhnutý tak, aby zodpovedal požiadavkám na rekreačnú formu strelby zo vzduchovej pušky a pištole. Systém nebude obsahovať elektronickú detekciu polohy dopadu (hardvér terčovej jednotky na to nie je prispôsobený). Systém bude schopný komunikovať na akúkoľvek užívateľom požadovanú vzdialenosť medzi kontrolnou jednotkou a terčmi v rozsahu 10 - 50 m. Nerovnomerné rozloženie terčov by taktiež nemalo vytvárať problém pre funkčnosť systému. Kontrolná jednotka bude zodpovedná za komunikáciu s terčovými jednotkami a jej spracovanie. Na kontrolnej jednotke sa bude nachádzať interaktívny displej slúžiaci na ovládanie systému a zobrazenie relevantných dát. Pre splnenie týchto požiadaviek bol vytvorený nasledujúci diagram popisujúci rozloženie modulov strelnice:

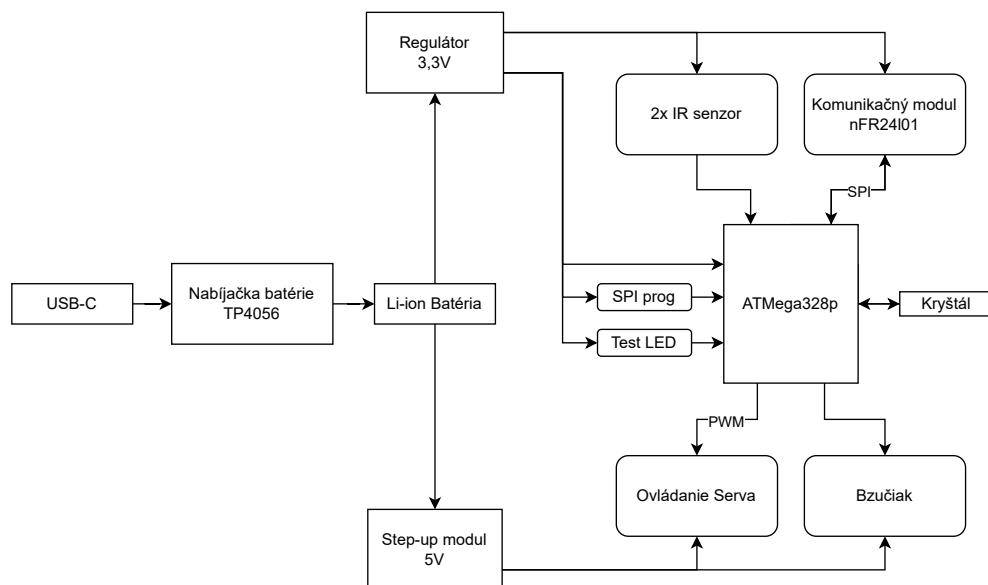


Obr. 2.1: Diagram modulov systému a ich prepojenia

Na diagrame je vidieť, že terčové jednotky (označené len ako Terč) sú bezdrôtovo prepojené s komunikačným modulom. Komunikačný modul odovzdáva informácie kontrolnému systému, ktorý podnety od jednotlivých terčových jednotiek spracuje a adekvátne na ne reaguje. Celý systém je ovládaný užívateľom pomocou rozhrania človek - stroj vo forme dotykového displeja. Jednotlivé časti systému budú postupne analyzované a navrhnuté v nasledujúcich kapitolách práce.

2.1 Terčová jednotka

Hardvér terčovej jednotky bol dodaný so zadaním práce. Táto kapitola bude analyzovať komponenty terčovej jednotky a popíše jej funkcie. Pre prehľadnosť bol vytvorený nasledujúci diagram, ktorý zobrazuje komponenty spolu s ich vzájomnými prepojeniami. Elektrická schéma zapojenia sa nachádza v prílohe A.1. Obe strany dosky plošných spojov sa nachádzajú v prílohách: A.2, A.3. Model terčovej jednotky sa nachádza v prílohe A.4. Všetky tieto prílohy sa taktiež nachádzajú aj v elektronických prílohách práce.



Obr. 2.2: Diagram komponentov terčovej jednotky a ich prepojení

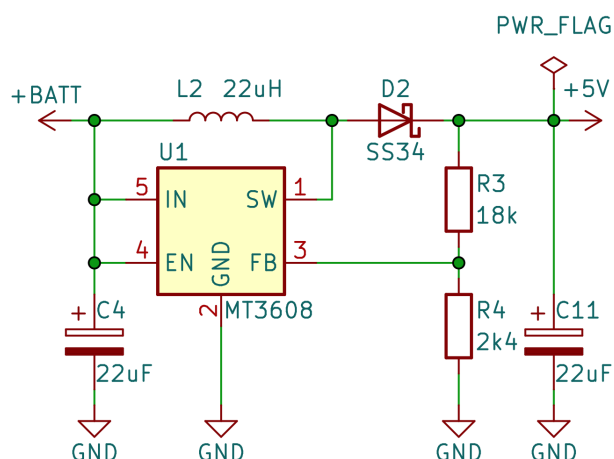
2.1.1 Napájanie

Napájanie terčovej jednotky je riešené pomocou nabíjateľnej li-ion batérie NCR18650B od spoločnosti Panasonic s nominálnym napätím 3,6 V a kapacitou 3350 mAh [6].

Na terčovej jednotke je prítomný nabíjací obvod. Využíva integrovaný obvod TP4056 (schématické označenie U3) určený pre lineárne nabíjanie li-ion batérií pri konštantnom napätí a prúde. Nabíjanie je indikované červenou LED; ak je batéria nabitá, LED nesvieti. Nabíjací obvod je napájaný 5V napätím pomocou USB-C konektoru. [7]

Komponenty a ich periférie si pre napájanie vyžadujú napäťové úrovne 3,3 V a 5 V. Preto sa na doske nachádzajú dva obvody zodpovedné za zmenu napätia batérie na požadované úrovne.

Step-up na 5 V je tvorený spínaným zdrojom pomocou integrovaného obvodu MT3608 (schématické označenie U1). MT3608 mení pomocou cievky stabilné



Obr. 2.3: Schéma elektrického zapojenia Step-up

vstupné napätie batérie na napätové špičky, ktoré sú následne pomocou diódy usmernené a vyhladené kondenzátorom. Integrovaný obvod pre reguláciu výstupného napätia využíva vstup FB, na ktorom svojím pôsobením udržiava napätie 0,6 V. Tento princíp fungovania umožňuje jednoduché nastavenie požadovaného výstupného napätia pomocou napätového deliča z rezistorov. [8]

Lineárny regulátor napätia MCP1703A (schématické označenie U2) je zodpovedný za reguláciu vstupného napätia na 3,3V napätie na výstupe. Pre indikáciu aktívneho výstupu regulátora je využitá zelená LED; ak svieti, výstup je aktívny. [9]

2.1.2 Hlavná procesorová jednotka

Srdcom terčovej jednotky je ATmega328P. Ide o 8-bitový mikrokontrolér z rodiny AVR mikrokontrolérov od spoločnosti Atmel (dnes už začlenená pod spoločnosť Microchip Technology Incorporated). Medzi najväčšie výhody patrí:

- redukovaná inštrukčná sada,
- nízka spotreba energie,
- periférie kontroléra.

Redukovaná inštrukčná sada tvorená z 131 inštrukcií, ktorých väčšina je realizovaná počas jedného taktu, umožňuje značnú mieru optimalizácie výkonu a spotreby energie. Výber z niekoľko rôznych režimov spánku, počas ktorých je možné kontrolér zobudiť pomocou prerušenia alebo zmeny stavu na kontakte, predstavuje ďalšiu možnosť ako znížiť spotrebu.

ATmega328P disponuje širokou ponukou vstupno - výstupných periférii. Pre danú aplikáciu sú relevantné najmä: čítače (dva 8-bitové, jeden 16-bitový) so samostatnými deličkami frekvencie a porovnávacím módom, hodiny reálneho času, výstup

PWM, programovateľný USART, rozhranie SPI. [10]

Programovanie mikrokontroléru je riešené pomocou externého programátora rozhraním ISP. Pripojenie programátora na dosku je realizované skrz konektor so schematickým označením J2. Pre vyššiu presnosť signálu určujúceho takt procesora je využívaný externý zdroj vo forme kryštálu s frekvenciou 16 kHz.

2.1.3 Komunikačný modul

Bezdrôtovú komunikáciu terčovej jednotky zaisťuje 2,4 GHz transciever nRF24l01 od firmy Nordic Semiconductor (viď Obr.2.4). Na posilnenie dosahu je využívaný modul s implementovaným výkonovým zosilňovačom pre využitie vo vysielacom móde, a nízkošumovým zosilňovačom pre mód prijímača (označenie nRF24l01+PA+LNA). Na prenos dát využíva frekvenčnú moduláciu, konkrétne Gaussovú frekvenčnú moduláciu (známu pod skratkou GFSK - Gauss Frequency-Shift Keying). Vďaka tejto metóde je modulácia signálu plynulejšia a miera tvoreného rušenia sa zníži. Prenos dát môže prebiehať rýchlosťami 250 kb/s, 1 Mb/s alebo 2 Mb/s. Užívateľ si môže vybrať z 125 rôznych frekvenčných kanálov (rozdiel medzi dvoma kanálmi je 1 MHz), pričom na jednom kanáli môže vďaka adresovaniu fungovať šesť vysieláčov a jeden prijímač¹. Výstupný výkon vysielача je referencovaný k výkonu 1 mW, je možné ho nastaviť na 0dBm, -6dBm, -12dBm, -18dBm.

Modul je napájaný napätím 3,3 V a pri najvyššom požadovanom výkone odoberá prúd 12 mA. S CPU komunikuje pomocou sériovej komunikácie SPI (schematické označenie konektora U5). Ide o synchronnú sériovú komunikáciu realizovanú štyrmi základnými signálmi SCK - určenie taktu komunikácie, MISO - prenos dát z followera do leadera, MOSI - prenos dát z leadera do followera, CSN - výber followera na zbernici. Pomocou SPI komunikácie je možné nastaviť všetky už spomínané parametre modulu. [11]



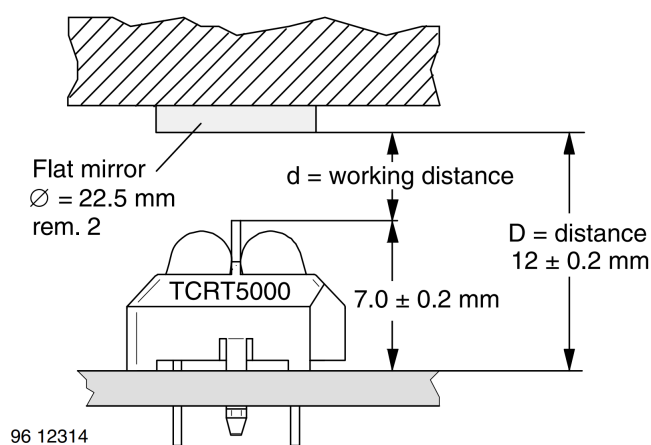
Obr. 2.4: Komunikačný modul nRF24l01+PA+LNA s externou anténou [12]

¹Tento mód je tiež nazývaný Multiciever Network; **M**ultiple Transmitter, **S**ingle Receiver.

2.1.4 Ostatné periférie

Na doske terčovej jednotky sa nachádzajú ďalšie periférie. Pre testovanie alebo signalizáciu stavov sa na doske nachádzajú dve firmvérom **ovládateľné LED** bez špecifického účelu, napájané napätím 3,3 V. Na doske sa taktiež nachádza firmvérom ovládateľný **bzučiak** s napájacím napätím 5 V. Bzučiak sa ovláda nepriamo pomocou N-MOS tranzistora. **Servomotor**, ktorý slúži na zdvíhanie terča, je ovládaný PWM signálom z CPU pripojeným na bázu N-MOS tranzistora. Týmto spôsobom dochádza k vytvoreniu invertovaného PWM signálu na napäťovej úrovni 5 V, ktorá je pre napájanie a ovládanie motora nutná. **Infračervené snímače polohy** slúžia k detekcii polohy terča (hore/dolu). Reflexný optočlen TCRT5000 sa skladá z infračervenej diódy a fototranzistora citlivého na tento typ žiarenia. Miesto prieniku žiarenia z diódy von je pomocou optickej prekážky oddelené od plochy prieniku žiarenia na fototranzistor². K zopnutiu tranzistora môže prísť iba v prípade, ak sa pred senzorom nachádza materiál schopný odrazu infračerveného žiarenia. Typická pracovná vzdialenosť optočlena je $(5,0 \pm 0,4)\text{mm}$ (viď Obr.2.5). [13]

Pri testovaní infračervených snímačov polohy bolo zistené, že tienenie od výrobcu nie je dostatočné pre úplne vyfiltrovanie slnečného žiarenia napríklad počas slnečných dní. V takomto prípade dôjde ku saturácii výstupného napätia optočlena, čo efektívne znemožní využitie tohoto komponentu ako detektora polohy terča.



Obr. 2.5: Nákres typického využitia TCRT5000 [13]

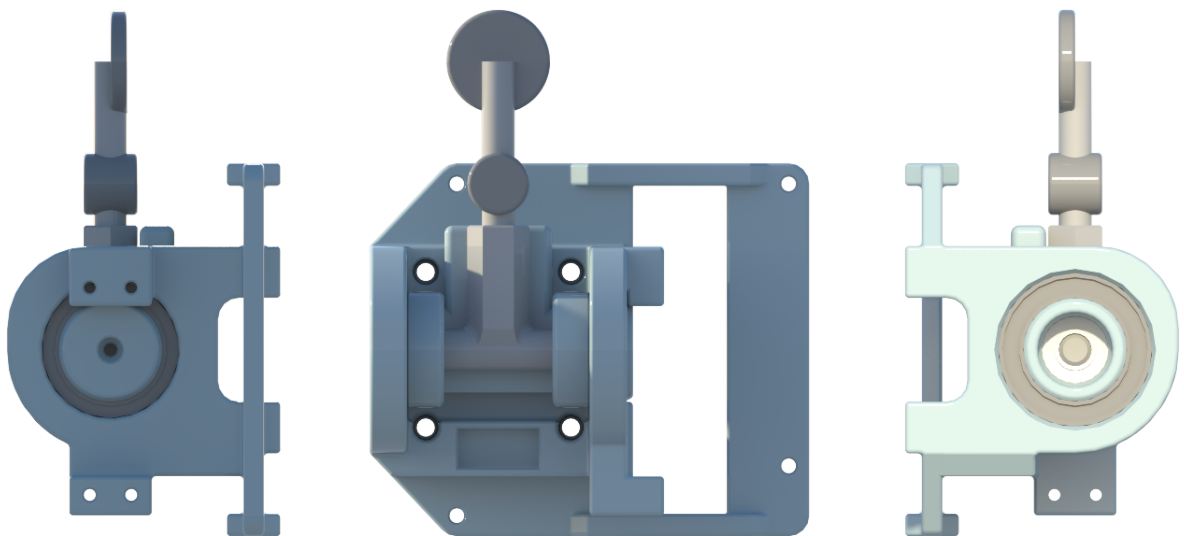
²Plochy prepúšťajúce žiarenie sú povrchovo upravené pre odčistenie slnečného žiarenia.

2.1.5 Mechanická časť terčovej jednotky

S elektronickou časťou hardvéru terčovej jednotky bol dodaný aj funkčný mechanizmus terčov. Jedná sa o zostavu zloženú z 3 hlavných častí:

- Púzdro dosky plošných spojov a baterky
- Magnetický podávač s uchytením servo motora
- Kovový držiak terča

Na obrázku 2.6 je vidieť predný a dva bočné pohľady na mechaniku terčovej jednotky. Na pohľade zľava je možné si povšimnúť, že princíp pohybu terča je založený na dvoch súosých guľôčkových ložiskách, ktoré sú pohybom na sebe nezávislé. Na vnútornom ložisku je uchytená os, na ktorej je navlečený kovový držiak v tvare písmena T. Na držiak sa terč pripevní pomocou skrutky. Na vonkajšom ložisku je uchytený podávač s dvoma magnetmi; jeho základná poloha je hore. Pri zostrelení terča sa jeho držiak otočí okolo osi vnútorných ložísk na polohu dole, podávač zostáva v polohe hore. Pre zdvihnutie je podávač servom natočený do polohy dole (držiak terča sa naň uchyťí pomocou magnetov) a následne do polohy hore. Púzdro na dosku je vytvorené tak, aby bolo možné dosku uložiť aj s batériou do polohy v ktorej infračervené senzory polohy detekujú rozšírenú časť uchytenia terča. Súbor s modelom mechanickej sústavy sa nachádza len na fyzickom nosiči priloženom k tlačenej forme práce.



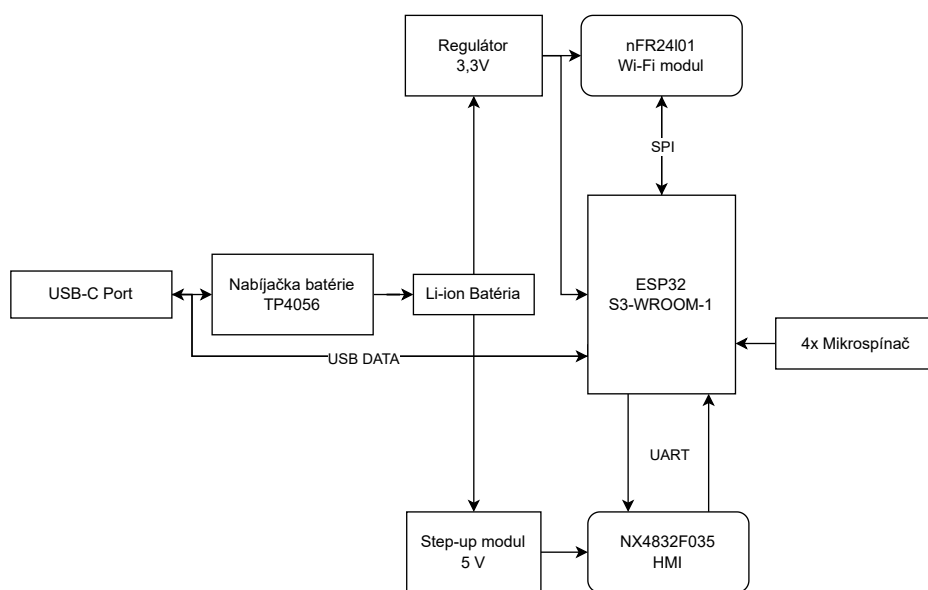
Obr. 2.6: Pohľady sprava, spredu a zľava na mechaniku terčovej jednotky

2.2 Návrh riadiacej jednotky

Následujúca časť práce hovorí o návrhu riadiacej jednotky a výbere využitých komponentov. Odôvodní za akým účelom boli komponenty vybrané a ich možné využitie pre implementáciu ďalších funkcionalít v budúcnosti. Súčiastky boli vyberaté z ponuky firmy JLCPCB, u ktorej bude doska vyrobená a osadená.

Požiadavky na riadiacu jednotku

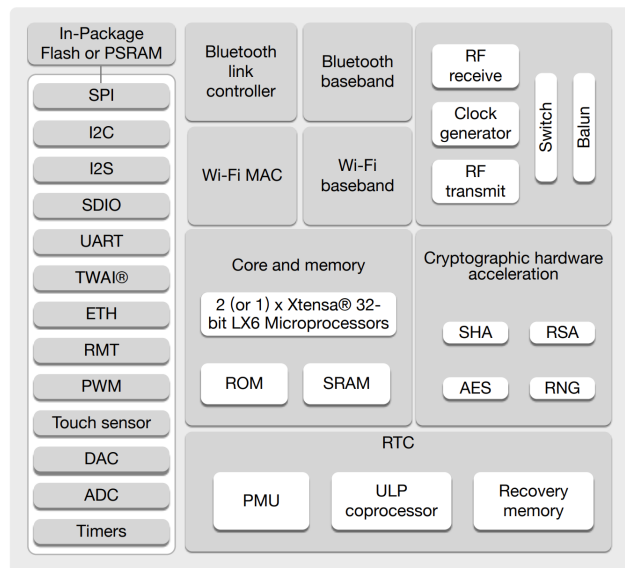
Od riadiacej jednotky sa očakáva, že bude schopná pomocou komunikačného modulu ovládať terčové jednotky a taktiež bude schopná spracovať prichádzajúcu komunikáciu. Ďalšou požiadavkou bude schopnosť jednoducho odovzdávať užívateľovi informácie o stave riadiacej jednotky aj terčových jednotiek. Systém strelnice by mal byť plne ovládateľný pomocou rozhrania na riadiacej jednotke. Riadiaca jednotka bude konštruovaná tak, aby bola dodržaná požiadavka na prenosnosť celého systému strelnice. Použité funkčné celky a ich prepojenia sú zobrazené na nasledujúcom diagrame.



Obr. 2.7: Diagram komponentov riadiacej jednotky a ich prepojení

2.2.1 Centrálna riadiaca jednotka

Ako riadiaca jednotka bol vybraný procesor z rodiny ESP32. Ide o čipy s rozsiahlou ponukou funkčných modulov ako sú napríklad: Bluetooth Link, Wi-Fi base-band, Rádiofrekvenčný modul, Hodiny reálneho času, rôzne komunikačné rozhrania atď. . . Diagram všetkých funkčných modulov EPS32 je zobrazený na Obr. 2.8.



Obr. 2.8: Diagram funkčných modulov EPS32 [14]

Pre aplikáciu bol vybraný modul ESP32-S3-WROOM-1-N16, ktorý obsahuje čip Xtensa LX7 Processor. Xtensa LX7 Processor je dvoj-jadrový procesor s upravitelným taktom na rozsahu 40-240 MHz. Modul WROOM k čipu pridáva QSPI flash pamäť s veľkosťou 16 MB, rádiový PCB anténu a 40MHz kryštál. [15]

Programovanie

Pre nahranie programu do čipu je využívané rozhranie USB serial, ktoré je integrované priamo v CPU module. Pripojenie USB rozhrania je realizované pomocou diferenciálneho páru signálov D+ a D- USB-C konektora. Signály VBUS, D+ a D- sú chránené pred elektrostatickým prepätím pomocou TVS diódy SP0503BAHT.

Aby bolo možné týmto spôsobom nahrávať do mikrokontroléra je najprv potrebné ho nakonfigurovať nahratím základného firmvéru. Preto sme na dosku ovládacej jednotky umiestnili Tag-Connect konektor (sú na neho privedené signály EN, Prog_TX, Prog_RX, GPIO0, 3V3, GND); ide o iný typ JTAG konektora. Konektor je napojený na tzv. "strapping piny". Pretože je pin GPIO46 prirodzene uzemnený, na konektore sa nachádza len signál pre pin GPIO0. Pri zapnutí procesor zaznamená úroveň napätia na týchto pinoch a na základe nich vyhodnotí, ktorý z bootovacích režimov bude spustený (kombinácií úrovní môžeme vidieť v tabuľke 2.1). SPI Boot je mód, v ktorom dôjde ku načítaniu programu z flash pamäte. V móde Download Boot procesor stiahne dáta z pinov U0TXD a U0RXD pomocou UART protokolu. Pre nahranie programu je potrebná časovo korektná sekvencia spustenia procesora v Download Boot móde, nahratia programu, vypnutie procesora a jeho spustenie v SPI Boot móde. Túto sekvenciu zabezpečuje externý programátor pomocou signálu EN.

Tab. 2.1: Konfigurácia bootovacieho módu na základe strapping pinov

Boot mód	GPIO0	GPIO46
Default	1 (Pull-up)	0 (Pull-down)
SPI Boot	1	-
Download Boot	0	0

2.2.2 Komunikačný modul

Pre komunikáciu s terčmi je na riadiacej jednotke využitý rovnaký komunikačný modul ako na terčovej jednotke. Princípy fungovania a konštrukcia modulu sú popísané v kapitole 2.1.3.

2.2.3 HMI

Pre zobrazovanie informácií o stave systému a jeho ovládanie bolo vybrané HMI vo forme dotykového displeja od spoločnosti Nextion. Konkrétny model NX4832F035 zo série produktov Discovery sa vyznačuje svojou nízkou spotrebou. Pri 100% jasú displeja (svetivosť 300 nit) vo funkčnom móde je odoberaný prúd 120 mA. HMI disponuje dvoma spánkovými režimami, pri ktorých je odoberaný prúd znížený na 4,25 mA (normálny spánkový režim) alebo až na 0,25 mA (režim hlbokého spánku)³. Napájacie napätie 5 V je rovnaké pre všetky tri režimy fungovania. Veľkosť uhlopriečky obrazovky je 3,5", čo zodpovedá veľkosti displeja 73.44×48.96 mm, a jeho rozlíšenie je 480x320 pixelov. Pre detekciu dotyku je využívaný rezistívny typ dotykovej obrazovky.

Ďalšou výhodou je prítomnosť samostatného procesora a pamätí pre uloženie a zobrazovanie užívateľského rozhrania a spracovanie podnetov od užívateľa; nedôjde k zbytočnej záťaži procesora riadiacej jednotky. HMI obsahuje flash pamäť s veľkosťou 16 MB pre uloženie fontov a obrázkov a 4MB RAM pamäť pre uloženie premenných. Užívateľského rozhranie je vytvorené pomocou softvéru pre Nextion Editor dodávaného výrobcom (softvér je dostupný pre operačný systém Windows). Nahrané do HMI je pomocou SD karty.

Komunikácia medzi CPU a HMI prebieha pomocou sériovej komunikácie prispôbenej pre 3,3V napäťovú úroveň. Ide o asynchrónnu komunikáciu s využitím dvoch vodičov: Rx, Tx (tiež známa ako UART). Prenášané inštrukcie sú založené

³Nevýhodou režimu hlbokého spánku je dlhší čas zobudenia, počas ktorého môže prísť ku strate dát.

na ASCII znakoch, čo znamená jednoduchú implementáciu softvéru pre ovládanie zobrazovaného UI aj spracovanie prijímaných podnetov. [17]

2.2.4 Napájanie

Rovnako ako terčové jednotky je riadiaca jednotka napájaná li-ion batériou s nominálnym napätím 3,6 V. Nabíjanie li-ion batérie je riešené pomocou IO TP4056. Zapojenie tohto nabíjacieho obvodu bolo prebraté z elektrickej schémy terčovej jednotky. Pre napájanie komponentov na doske riadiacej jednotky sú potrebné dve napäťové úrovne: 3,3 V a 5 V.

Napájacia úroveň 3,3 V je tvorená LDO regulátorom XC6210B332MR s pevným výstupným napätím. Očakávaná prúdová záťaž tohto regulátora sa pohybuje v okolí 35mA (tento odhad bol založený na katalógových hodnotách typického prúdového odberu komunikačného modulu a ESP32 modulu). [11] [14] Očakávané úbytkové napätie pri tomto prúde je na základe katalógového listu približne 18 mV, čo je vzhľadom ku batériou napájanému dizajnu kontrolnej jednotky vyhovujúce. Na jeho výstup bola umiestnená zelená LED pre indikáciu funkčnosti regulátora. Na vstup aj výstup regulátora boli umiestnené 10 μ F filtračné kondenzátory. [18]

Napájacia úroveň 5 V je tvorená spínaným zdrojom s pomocou IO MT3608. Pre správnu funkčnosť zapojenia boli dodržané odporúčania výrobcu na použité komponenty. Výrobca IO udáva, že použitá cievka by mala mať indukčnosť 4,7 - 22 μ H vzhľadom na priestorové možnosti aplikácie, preferujúc vyššie hodnoty. Nakoľko sú rozmery cievky pre danú aplikáciu zanedbateľné bola využitá cievka s hodnotou 22 μ H. Pre výber diódy bolo potrebné určiť maximálny možný prúdový odber. Pretože jediný komponent využívajúci 5V sieť je HMI s najvyšším možným odberom 120 mA, môžeme využiť už otestovanú shotkyho diódu z dosky terčovej jednotky. Na vstup aj výstup IO boli umiestnené 22 μ F keramické kondenzátory. Pre určenie výstupného napätia je potrebné vytvoriť napäťový delič pre pin FB tak, aby na ňom bolo napätie 0,6 V⁴; tento vzťah je definovaný rovnicou:

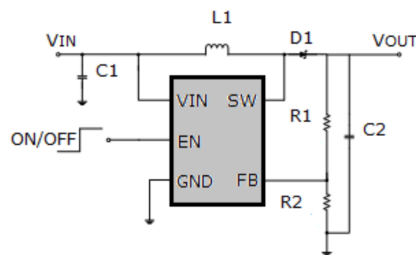
$$V_{out} = V_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (2.1)$$

Pre minimalizáciu prúdu na pin FB bol rezistor R_1 zvolený na hodnotu 18 k Ω . Odpor rezistora R_2 bol dopočítaný vyjadrením zo vzťahu 2.1:

$$R_2 = \frac{R_1}{\frac{V_{out}}{V_{ref}} - 1} = \frac{18000}{\frac{5}{0,6} - 1} = 2454 \approx 2400 \Omega \quad (2.2)$$

⁴V dokumentácii IO hodnota V_{ref} označuje napätie potrebné na pine FB, teda 0,6 V

Vypočítaný odpor bol zaokrúhlený na najbližšiu štandardne vyrábanú hodnotu. Výstupné napätie sa dôsledkom zaokrúhlenia zmení z požadovaných 5 V na 5,1 V; táto zmena nevytvára pre funkčnosť HMI žiaden problém. [8]



Obr. 2.9: Štandardné zapojenie MT3608 [8]

Medzi vstupmi obvodov upravujúcich napätie na požadované úrovne a výstupom batérie sa nachádza mechanický spínač, určený pre zapínanie zariadenia.

2.2.5 Periférie

Pre získanie informácie o stave zostávajúcej napätia na batérii bol na dosku pridaný tranzistorový obvod; Obr. 2.10. Toto zapojenie umožňuje pomocou firmvéru prepustiť napätie z batérie na AD prevodník ESP modulu [19]. Očakávaný rozsah meraných napätí je (3,4-4) V. AD prevodník EPS32-S3 má referenčné napätie 1,1 V, a teda napätie na batérii by nebol schopný odmerať. [20] Preto bude napätie z batérie upravené dvoma spôsobmi. Napäťový delič, ktorý upraví merané napätia na ich polovičnú hodnotu, rozsah bude (1,7-2) V. A následne pomocou firmvérom nastaviteľného útlmu na vstupe AD prevodníka o hodnote 11dB. Výhodou zapojenia využívajúceho unipolárne tranzistory je zanedbateľný prúd do hradla; nedochádza k úbytku napätia na batérii.

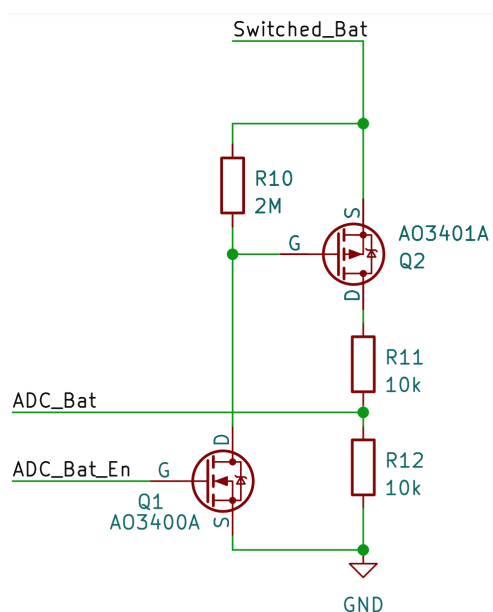
Na dosku riadiacej jednotky boli umiestnené štyri mikrosplínače, z dôvodu potenciálneho rozšírenia funkčností a zlepšenia možností ovládania pri vývoji firmvéru.

2.2.6 Realizácia DPS

Elektrická schéma a návrh DPS dosky riadiacej jednotky boli vytvorené pomocou softvéru KiCad. Ide o open-source softvér, ktorý umožňuje tvorbu elektrických schém, knižníc komponentov, návrhu DPS, knižníc footprintov a 3D modelov [21]. Vytvorená elektrická schéma je dostupná v prílohe B.1.

Doska bola navrhnutá na základe výrobných možností JLCPCB [22]. Na navrhovanej dvoj-vrstvej doske plošných spojov je väčšina súčiastok uchytená SMD technológiou. Pomocou THT sú na dosku umiestnené: mikrosplínače, USB-C konektor,

prepínač, držiak pre batériu a rozhrania pre prepojenie komunikačného modulu a HMI s CPU. Vo voľných priestoroch bola na obe strany DPS vyliata medená vrstva napojená na signál GND. Vyliate medené vrstvy boli v pravidelných rozstupoch prepojené prekovenými dierami. Takto vytvorené medené vrstvy prispievajú k redukcii vplyvov elektromagnetického rušenia na signály. Oblasť pod anténou modulu ESP32-WROOM bola vynechaná pri vedení vodivých ciest signálov, aj pri vylievaní medených vrstiev, aby neprišlo k rušeniu pri prípadnom využití. Navrhnutá DPS sa nachádza v prílohách: B.2, B.3. Návrh DPS sa taktiež nachádza aj v elektronických prílohách.



Obr. 2.10: Schéma zapojenia pomocného obvodu pre meranie napätia na batérii

3 Implementácia kódu

V tejto kapitole budú ukázané a popísané programové riešenia, ktoré boli v práci implementované na terčové jednotky, kontrolnú jednotku a HMI.

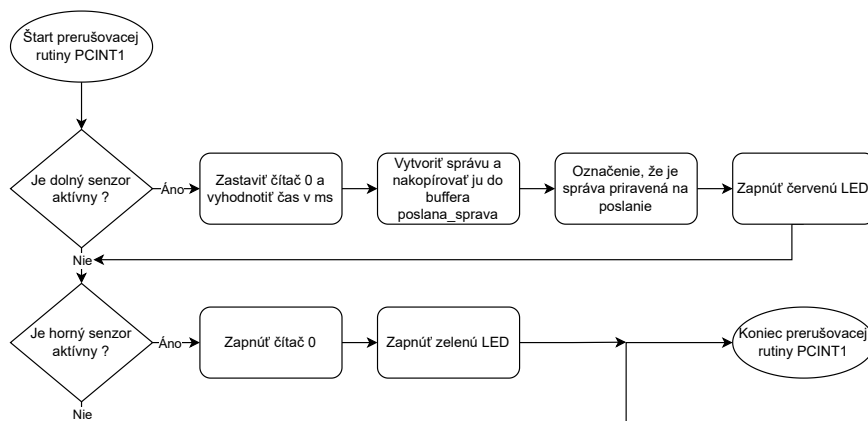
3.1 Terčová jednotka

Ako už bolo spomínané CPU na terčovej jednotke je ATmega328p. Pre programovanie firmvéru tohoto procesora bolo vybrané IDE s názvom **Microchip studio**. Jedná sa o vývojové prostredie od spoločnosti Microchip určené priamo pre programovanie procesorov z rodiny AVR. Dovoľuje jednoduchú implementáciu kódu a využitie externých programátorov. [23] Pre nahrávanie firmvéru do procesora bol využívaný programátor AVRISP mkII. Pre funkčnosť terčovej jednotky bolo na doske potrebné implementovať 4 podstatné komponenty:

- Detekcia polohy terča na základe IR senzorov
- Ovládanie servo motora
- Meranie času
- Ovládanie komunikačného modulu pomocou SPI

3.1.1 Detekcia polohy terča

Ako už bolo spomínané pri popise hardvéru terčovej jednotky, na jej doske plošných spojov sú umiestnené dva infračervené senzory určené na detekciu polohy terča. Oba snímače nachádzajú na porte B procesora. Preto mohla byť pre detekciu využitá rutina prerušenia zmeny napätovej úrovne na tomto porte. Prerušenie sa teda spustí v prípade ak terč zmení svoju polohu hore alebo dole. Popis rutiny je vyobrazený na obr. 3.1.



Obr. 3.1: Vývojový diagram prerušovacej rutiny IR senzorov

3.1.2 Meranie času a ovládanie servo motora

Meranie času medzi vztýčením terča a jeho zostrelením je realizované pomocou čítača. Pre meranie času je využívaný 8-bitový čítač číslo 0. Čítač nemá zapnutý frekvenčný delič, číta teda na frekvencii taktu procesora, čo zodpovedá 16 MHz. Ku pretečeniu čítača príde za čas vypočítaný nasledovne:

$$\Delta t = \frac{Max}{f} = \frac{2^8}{16 \cdot 10^6} = 16 \mu s \quad (3.1)$$

Na základe tejto hodnoty je možné dopočítať aký počet pretečení bude zodpovedať 1 ms reálneho času:

$$c_{1ms} = \frac{1ms}{\Delta t} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 10^{-6}} = 62,5 [-] \quad (3.2)$$

Ako je vidieť, výsledok nie je v celom čísle, čo môže spôsobovať problémy. Preto bolo prejdené na metódu v ktorej sa počíta každých 125 cyklov ako 2 ms. Pri vypnutí čítača dôjde ku spätnému vyhodnoteniu počtu prebehnutých cyklov, a teda prípadnému pripočítaniu 1 ms ku hodnote.

Podobne ako čítanie času je aj riadenie servo motora riešené pomocou hardvérového čítača. Pretože sa na jeho ovládanie využíva PWM signál s periodou 20 ms je potrebné využívať 16-bitový čítač číslo 1. V tomto prípade bol využitý frekvenčný delič s pomerom 1:256, frekvencia čítača sa vďaka tomu zmenila na 62500 Hz a mód FastPWM s invertovaným výstupom. Na základe tejto frekvencie bola dopočítaná maximálna hodnota čítača pre vytvorenie potrebnej periódy Výpočet pre overenie periódy PWM:

$$Max = f \cdot T = 62500 \cdot 0,02 = 1250 [-] \quad (3.3)$$

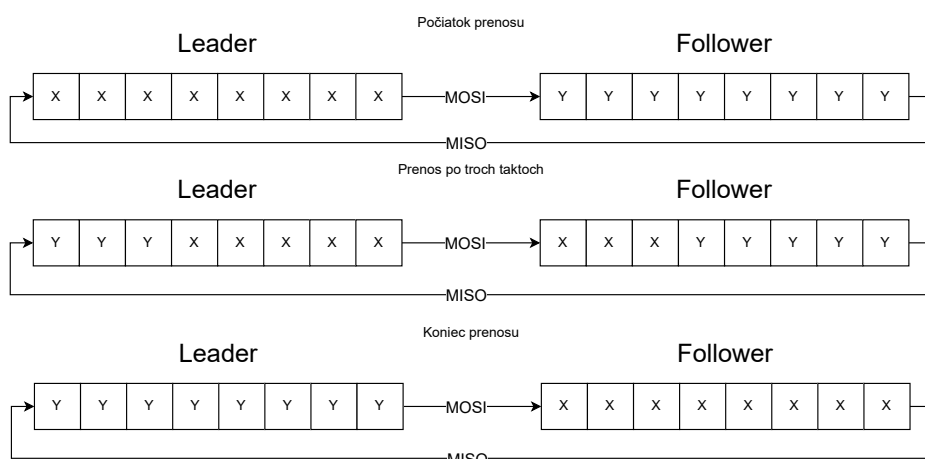
Pre samotné ovládanie uhlu natočenia serva je potrebné meniť striedu signálu. Na koľko výrobca v katalógovom liste neuvádza striedy potrebné na polohovanie motora, bola informácia získaná na internetových fórach. [24] Na tabuľke 3.1 sú definované polohy terča a ku nim odpovedajúce hodnoty. Stĺpec Match vyjadruje hodnotu potrebnú zapísať do parametru Compare Match čítača pre adekvátnu dĺžku striedy.

Tab. 3.1: Hodnoty definujúce riadenie servo motora

Poloha	Uhol natočenia [°]	Strieda [ms]	Match [-]
Dole	0	0,5	32
-	90	1,5	94
Hore	180	2,5	156

3.1.3 Sériová komunikácia SPI

Pre posielanie príkazov komunikačnému modulu slúži SPI. SPI je jednoduchý typ sériovej komunikácie, ktorej hardvérové riešenie bolo popísané v kapitole 2.1.3. Zásadnou výhodou je jej synchrónnosť a možnosť realizácie bez špecializovaných vstupno/výstupných periférií komunikujúcich čipov. Komunikácia je založená na princípe výmeny jedného bytu medzi leaderom a followerom. Znamená to, že pri komunikácii dochádza k paralelnému prenosu dát z leadera do followera ale aj naopak. Toto môže byť zásadnou výhodou pri aplikovaní metódy dotazovania odpovede od periférie, pretože dochádza ku oneskoreniu len o dobu jedného prenosu¹.



Obr. 3.2: Diagram popisujúci dátový prenos pomocou SPI

Rýchlosť komunikácie je udávaná signálom CLK. V prípade implementácie na doske terčovej jednotky je využívaná frekvencia oscilátora delená frekvenčnou deličkou s pomerom 1:16. Komunikácia má rýchlosť prenosu 1 Mb/s. Počiatok komunikácie a jej trvanie je followerovi signalizované pomocou povoloacieho signálu CSN, ktorý sa považuje za aktívny v nule. [25]

3.1.4 Ovládanie komunikačného modulu

Komunikačný modul nRF24l01 je ovládaný pomocou príkazov definovaných v katalógovom liste od výrobcu. Majú štandardizovanú dĺžku 8 bitov a ich formát je: **0bxxxyyyyy**, kde **xxx** vyjadruje príkaz a **yyyyy** adresu pre ktorú je príkaz vykonaný. V prípade ak je na základe príkazu očakávaná ďalšia informácia (napríklad v prípade zápisu do registra, jeho hodnota), je poslaná v nasledujúcom byte. Ak je informácia rozložená na viacero bytov, prvý prichádzajúci byte je interpretovaný

¹Tento predpoklad je platný v prípade ak objem prenášaných dát je jeden byte

ako LSB. Najviac využívané príkazy pri implementácii boli zaznamenané do tabuľky v prílohe C.1. Zásadnou výhodou využitia tohto komunikačného modulu je jeho funkcia Enhanced Shockburst™. Táto funkcia sa stará o dodržiavanie mnohých štandardov komunikačných protokolov a celkové zjednodušenie použitia tohto modulu.

Preambula 1 byte	Adresa 3-5 bytov	Info. o packete 9 bitov	Správa 0-32 bytov	CRC 1-2 byte
------------------	------------------	-------------------------	-------------------	--------------

Obr. 3.3: Zloženie jedného packetu podľa protokolu Enhanced Shockburst™

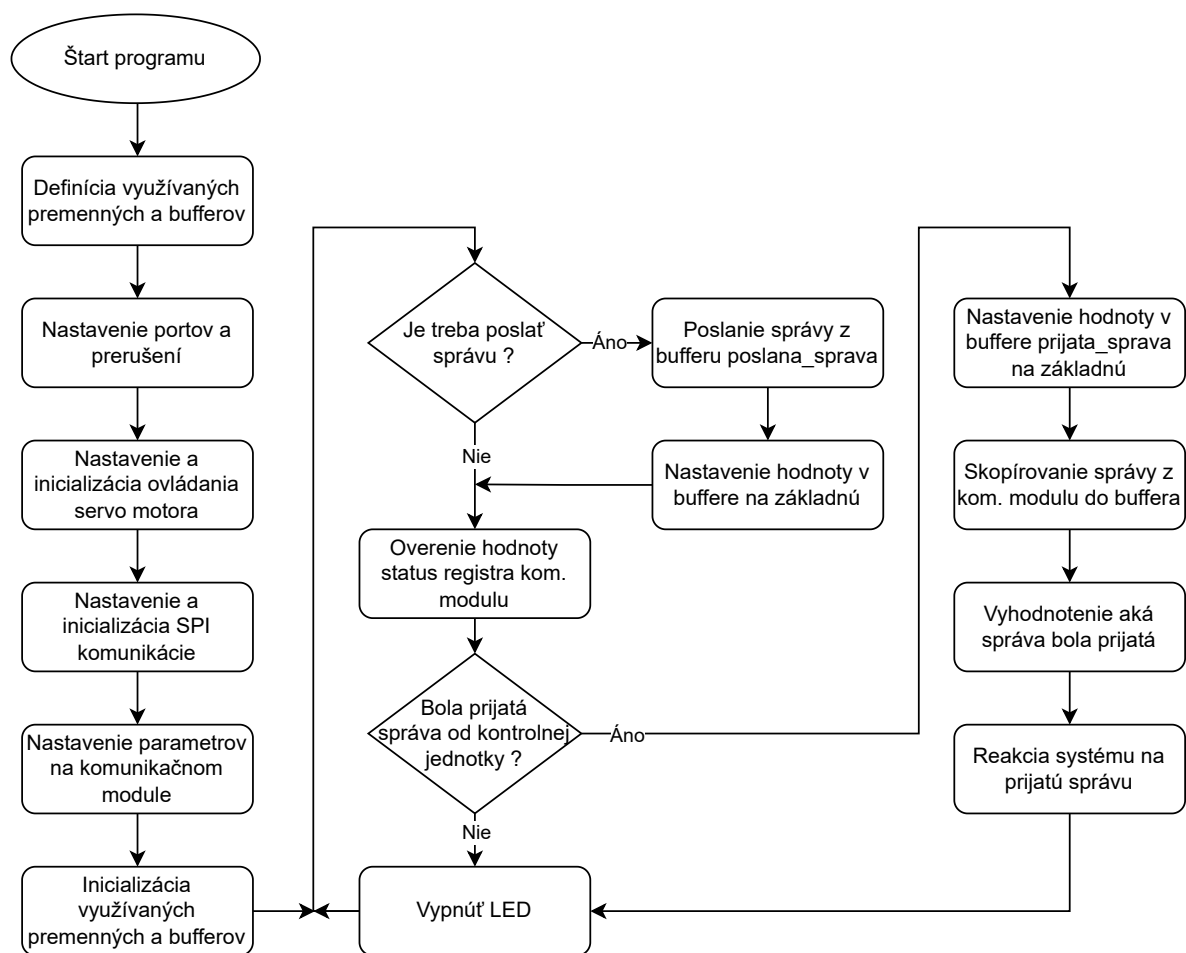
Preambula je sekvencia striedajúcich sa 0 a 1, na základe ktorých dôjde ku synchronizácii demotulátora prijímača. **Adresa** obsahuje 3 až 5 bytov označujúcich adresu na ktorú je správa posielaná. Časť **informácie o packete** sa skladá z troch častí. Prvých 6 bitov označuje dĺžku prichádzajúcej správy², ďalšie 2 bity nesú informáciu o tom, či ide o správu poslanú poprvé, alebo správu poslanú znova pomocou funkcie automatického znovu-poslania. Posledný bit tejto časti môže byť využitý na označenie správy ako *no acknowledgment*, čo znamená, že po prijatí nebude naspäť odosielateľovi automaticky zaslaná správa o potvrdení prijatia. **Správa** obsahuje užívateľom zaslanú správu o dĺžke 0 až 32 bytov. **CRC** alebo Cyclic Redundancy Check je kontrolná časť packetu, ktorá má na starosti overiť nedeformovanosť prijatej správy na základe výpočtu hodnoty zo zaslanej správy. Ďalšou výhodnou funkciou, ktorá bola využitá je možnosť automatického potvrdenia prijatia správy a na ňu nadväzujúca funkcia automatického znovu-poslania v prípade ak nedošlo ku potvrdeniu prijatia. [11]

Pre implementáciu funkčností ako sú konfigurácia, čítanie správ a posielanie správ bola využitá knižnica nRF24L01-avr-bareminimum, ktorá je modifikáciou knižnice RF24 [27]. Modifikovaná knižnica ponúka výrez najpodstatnejších funkcií a umožňuje rozsiahle možnosti konfigurácie využívaných pinov a nastavenia parametrov komunikačného modulu nRF24L01. Pri implementácii firmvéru boli nájdené chyby, ktoré spôsobovali nefunkčnosť komunikácie v okrajových prípadoch; tieto chyby boli opravené. Obsah knižnice nebol pre niektoré interakcie dostatočný, preto do nej boli pridané ďalšie funkcie. Zoznam funkcií sa nachádza v prílohe C.2. Správne fungovanie knižnice bolo pred jej implementáciou do programu po častiach overené ako na hardvérovej úrovni pomocou osciloskopu, tak na softvérovej úrovni pomocou testovacích správ. [26]

²Prítomnosť tejto informácie v poslanej správe umožňuje využitie funkcie dynamickej veľkosti posielanej správy.

3.1.5 Hlavná programová slučka

Firmvér je realizovaný ako nekonečná slučka, tiež nazývaná aj superloop. Ide o princíp v ktorom sa neustále dookola vykonáva určitá postupnosť funkcií. Táto postupnosť môže byť prerušená funkciami, ktoré sú považované za prioritné a sú realizované pomocou prerušovacích rutín. Ako už bolo spomenuté v tomto prípade sú prerušovacie rutiny využívané pre dva účely: riešenie pretečenia čítača zodpovedného za meranie času zostreľu a detekcie zmeny polohy terča. Pôvodným zámerom bolo pomocou prerušení reagovať aj na prijatie správy do komunikačného modulu, avšak po odskúšaní tejto metódy bolo od nej upustené. Dochádzalo pri nej ku problémom na hardvérovej úrovni a celkovo nebola spoľahlivá. Informácia o prijatí správy je teda získaná pomocou dotazovania sa na Status register komunikačného modulu a jeho vyhodnotenia. Nakoľko sa dotazovanie realizuje pomocou SPI komunikácie je negatívny dopad na výkon a oneskorenie prijatia správy minimalizovaný. [28] Celý beh programu zložený z inicializácie a hlavnej slučky je vyobrazený na vývojovom diagrame na obrázku 3.4.



Obr. 3.4: Vývojový diagram hlavného programového cyklu terčovej jednotky

Správy

Ako už bolo spomenuté program terčovej jednotky je schopný prijímať a posielat správy. Informácia o potrebe poslania správy alebo jej prijatí je predávaná v podobe globálnych premenných typu bool, tiež nazývaných aj flagy. Prijatie správy modulom firmvér overuje v bloku *Overenie hodnoty Status registra komunikačného modulu*. Rozhodnutie o poslaní správy môže byť vytvorené na dvoch miestach v programe. Prvé z nich je vyobrazené na diagrame na obr. 3.1 a teda sa nachádza v prerušení. V tomto prípade je odoslaná správa vo formáte: **DOWN,z**, kde **z** predstavuje čas medzi zdvihnutím a zhodením terča v milisekundách. Druhé miesto sa nachádza v hlavnom programovom cykle ako reakcia na prijatie konkrétnej správy. Všetky správy, na ktoré je modul schopný reagovať sa nachádzajú v tabuľke 3.2³.

Tab. 3.2: Zoznam akceptovaných správ

Správa	Reakcia
UP	Terč sa presunie do polohy hore a zapne zelenú LED
DOWN	Terč sa presunie do polohy dole a zapne červenú LED
PING	Jednotka odpovie správou PONG a zapne obe LED
CHXX	Jednotka zmení kanál na ktorom vysiela/prijíma správy na XX
PWY	Jednotka zmení zosilnenie vysielača na Y

Ihneď po spracovaní požiadavky na odoslanie správy alebo spracovanie prijatej správy je flag označený ako neaktívny.

Všetok implementovaný softvér sa nachádza v elektronických prílohách.

³Hodnota XX je celočíselná hodnota v rozsahu 1-99, hodnota Y je celočíselná hodnota v rozsahu 1-3, kde 1 predstavuje najnižší výkon a 3 najvyšší.

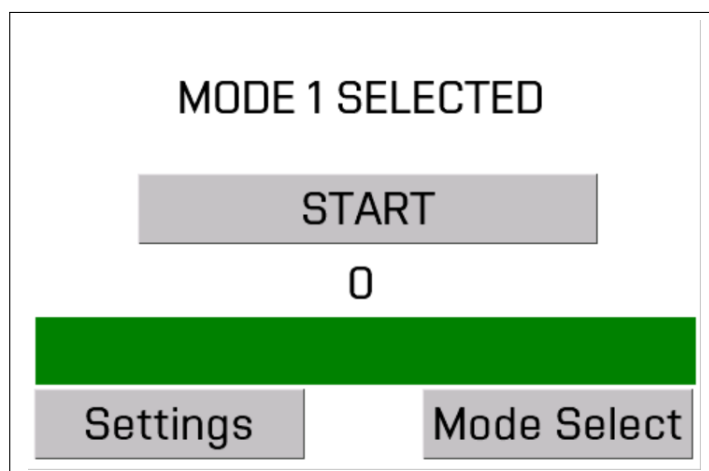
3.2 HMI

Ako už bolo spomenuté v kapitole 2.2.3, užívateľské rozhranie dotykového displeja je tvorené pomocou softvéru Nextion editor. Pri tvorbe jednotlivých stránok HMI bol braný ohľad na dodržanie zásad užívateľsky prívetivého UI. Napr. dostatočne veľký, čitateľný text; rozmiestnenie tlačidiel tak, aby nedochádzalo k neúmyselným interakciám s inými komponentmi, logické prepojenie medzi stránkami, atď... Každý z využitých komponentov má atribúty, ktoré je možné meniť pri behu rozhrania a atribúty, ktoré je potrebné nakonfigurovať pri tvorbe rozhrania. Typickými atribútmi, ktoré môžeme meniť za behu sú zobrazovaný text alebo číselná hodnota, zakázanie interakcie a viditeľnosť komponentu. Medzi nemeniteľné patria napríklad veľkosť a poloha objektov alebo maximálny počet zobrazených znakov v textovom objekte. Príkazy posielené pomocou rozhrania UART sú ASCII znaky interpretované dátovým typom string.⁴ Príkaz sa skladá z viacerých častí ktoré sa všeobecne dajú popísať formátom: **NázovObjektu.CielenýAtribút = Hodnota**. Parameter názvu objektu sa vždy skladá z označenia jedným písmenom, špecifickým pre typ objektu, a čísla označujúceho číslovanie objektu na danej stránke; zoznam značení relevantných objektov sa nachádza v prílohe D.1. Atribúty sú špecifické pre jednotlivé objekty a je možné ich dohľadať v softvéri na tvorbu HMI Nextion Editor. Príkladom môže byť príkaz pre zmenenie textu v objekte textové pole: **t0.txt="Hello World!"**. Každá komunikácia s HMI musí byť ukončená poslaním série znakov: **0xFF,0xFF,0xFF**. Pre každé z tlačidiel, ktoré je využívané pre spúšťanie funkcií, bola zaškrtnutá možnosť "Send Component ID" v kolónke "Touch Press Event". Znamená to, že pri stlačení týchto objektov dôjde k poslaniu ID daného komponentu pomocou UART do CPU. [29]

⁴V prípade implementácie pomocou programovacieho jazyka C je využívané pole typu char (znak), alebo je využitá štandardná knižnica string.

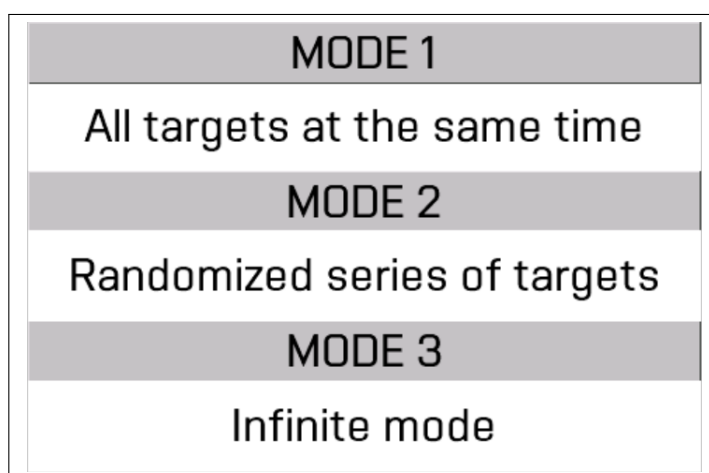
3.2.1 Popis vytvoreného rozhrania

V tejto kapitole postupne prejdeme všetky stránky HMI, ktoré boli implementované. Stránka MainMenu sa zobrazuje užívateľovi ako prvá pri spustení.



Obr. 3.5: Stránka HMI s názvom MainMenu

Jedná sa o hlavné menu ovládania. Na vrchu stránky sa nachádza nápis, ktorý označuje aký z 3 módov bude spustený. Tlačidlo **START** po stlačení zapne odpočet, ktorý bude vyobrazený číselne, na mieste kde sa momentálne nachádza číslo 0, a aj v percentuálnej forme pomocou ukazateľa postupu pod ním. Po uplynutí odpočtu bude začatý strelecký program. Pre výber streleckého programu slúži tlačidlo **Mode Select**, ktoré užívateľa presunie na stránku s výberom módov a ako posledné tlačidlo **Settings** presunie užívateľa na stránku s nastaveniami.



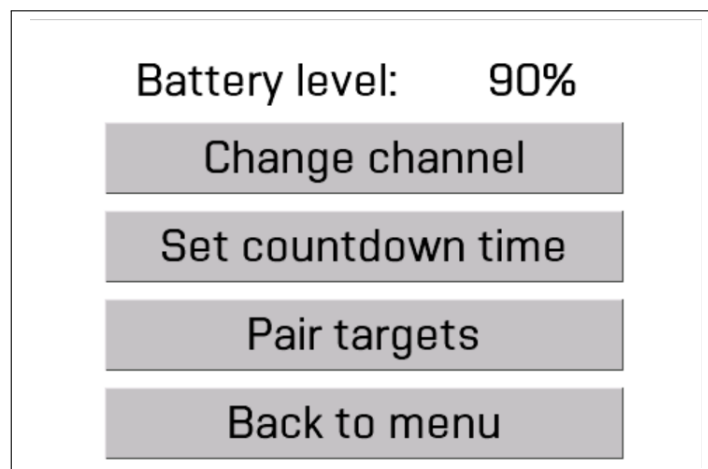
Obr. 3.6: Stránka HMI s názvom ModeSelect

Na tejto stránke s názvom ModeSelect si užívateľ vyberie jeden z 3 módov streleckého programu stlačením príslušného tlačidla.



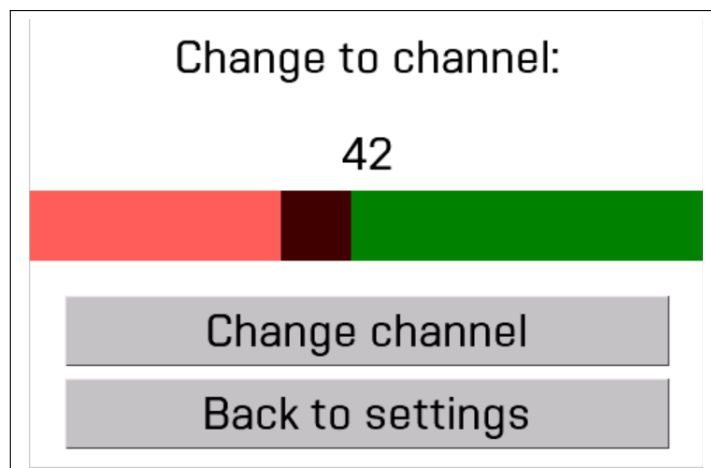
Obr. 3.7: Stránka HMI s názvom Timers

Stránka Timers sa zobrazí užívateľovi po započatí streleckého programu a slúži pre zobrazenie času zostrelenia terča. Časy sa zobrazujú na mieste, kde sa nachádza nápis **NO TIME**. Tlačidlo **Abort** slúži pre zrušenie streleckého programu, všetky terče sa automaticky presunú do polohy dole. Tlačidlo **Back to menu** navráti užívateľa na stránku hlavného menu.



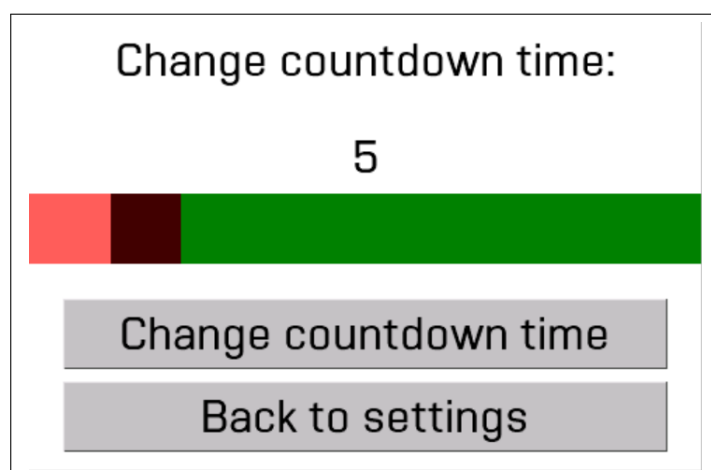
Obr. 3.8: Stránka HMI s názvom Settings

Na stránke Settings slúžiacej ako rozcestník pre viacero stránok a funkčností. Úplne hore na stránke vidíme stav batérie kontrolnej jednotky. Pod ním sa nachádza tlačidlo **Change channel**, ktoré nás preniesie na stránku s rovnakým názvom. Nasleduje tlačidlo **Set countdown time**, ktoré nám umožní zmeniť čas odpočítania pri začatí streleckého programu. Tlačidlo **Pair targets** slúži na spárovanie kontrolnej jednotky a terčových jednotiek.



Obr. 3.9: Stránka HMI s názvom ChannelChange

Stránka ChannelChange umožní užívateľovi pomocou posuvníka zvoliť číslo kanálu, na ktorom prebieha komunikácia systému strelnice. Nastavenie potvrdí pomocou tlačidla **Change Channel** a následne sa môže pomocou tlačidla **Back to settings** vrátiť na stránku s nastaveniami.



Obr. 3.10: Stránka HMI s názvom CountdownChange

Stránka CountdownChange je koncipovaná úplne rovnako ako predchádzajúco spomenutá stránka na zmenu kanálu. Posuvníkom je nastavená doba odpočítania pred započatím streleckého programu, pomocou tlačidla **Change countdown time** je voľba potvrdená a pomocou tlačidla **Back to settings** sa užívateľ môže vrátiť naspäť na stránku s nastaveniami.



Obr. 3.11: Stránka HMI s názvom FoundTargets

FoundTargets je stránka, ktorá sa zobrazí po napárovaní terčov. Jej účelom je užívateľovi predať informáciu o tom, koľko z terčov bolo na ovládaciu jednotku napárovaných. Každý z spárovaných terčov sa zobrazí ako čierny štvorec pod príslušným označením. Pomocou tlačidla **Back to settings** sa užívateľ vráti na stránku s nastaveniami.

Súbor s vytvoreným rozhraním sa nachádza v elektronických prílohách.

3.3 Kontrolná jednotka

V kapitole 2.2.1 bolo spomenuté, že ako mikrokontrolér ovládajúci kontrolnú jednotku bolo využité ESP32, konkrétne modul ESP32-S3-WROOM-1. Pre implementáciu kódu, jeho nahratie a odladenie bolo využité IDE **Visual Studio Code**, tiež známe ako VS Code. Ide o veľmi modifikovateľné IDE, ktorého výhoda sa nachádza práve v možnosti využitia rozšírení. V tomto prípade bolo využité rozšírenie ESP-IDF. Jedná sa o rozšírenie priamo od spoločnosti Espressif a do VS Code pridáva možnosti vytvorenia, nastavenia, konfigurácie a nahratia projektu do modulov od tejto firmy. Rozšírenie taktiež so sebou prináša prístup ku API ESP-IDF. [30]

Spomenuté aplikačné rozhranie ESP-IDF je neoddeliteľnou súčasťou tvorby akéhokoľvek projektu na tejto platforme. Ide o rozsiahle rozhranie, ktoré vytvára značnú mieru abstrakcie pre ovládanie a využitie jednotlivých funkčností modulov ESP. [31]

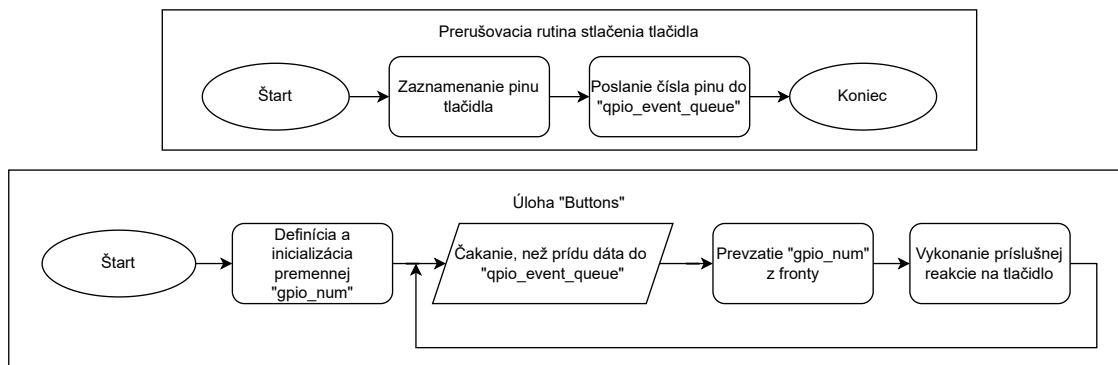
Pri implementácii bol využitý operačný systém FreeRTOS pracujúci v reálnom čase, ktorý je voľne dostupný na trhu. RTOS systém sa vyznačuje tým, že plánovaní poradia funkcií, ktoré musia byť vykonané, plánovač musí dodržiavať pevne dané časové termíny do ktorých musí daný proces prebehnúť. Zásadnými výhodami pri využití sú: rýchla reakcia systému na podnety užívateľa a možnosť rozdeliť program do viacerých častí fungujúcich nezávisle na sebe. V prípade ESP32 v kombinácii s FreeRTOS jednotlivé procesy môžu bežať dokonca paralelne, nakoľko ide o viac-jadrový procesor. Z FreeRTOS boli využité moduly Task a Queue. Modul Task umožňuje vytvorenie úlohy, ktorá bude zaregistrovaná pre plánovač. Každá takto vytvorená úloha musí mať samostatne alokovanú pamäť a udanú prioritu pre plánovač. Zoznam všetkých využívaných úloh a ich popis je v prílohe E.1. Modul Queue slúži na predávanie informácií medzi samostatne fungujúcimi úlohami pomocou fronty. Pri vytvorení fronty je potrebné zadať iba jej maximálny počet prvkov a dátovú veľkosť jedného takéhoto prvku. Zoznam všetkých využívaných front a ich popis sa nachádza v prílohe E.2.[32]

Podobne ako pri implementácii firmvéru na doske terčovej jednotky bolo potrebné vytýčiť jednotlivé funkčné celky, otestovať ich a následne implementovať do finálnej verzie firmvéru. Ide o nasledujúce komponenty:

- Obsluha tlačidiel
- Meranie napätia na batérii
- Komunikácia s nRF24L01
- Komunikácia s HMI Nextion
- Strelecké módy

3.3.1 Obsluha tlačidiel

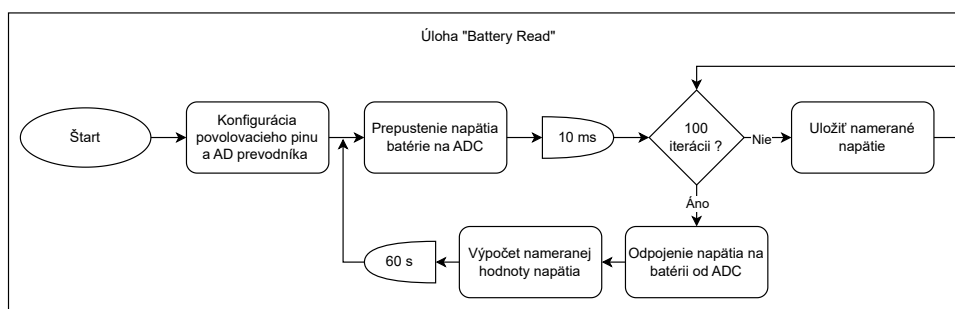
Ako býva zvykom je obsluha tlačidiel riešená pomocou prerušení reagujúcich na klesajúcu hranu signálu. Pre všetky tlačidlá je vytvorená len jedna obslužná rutina. V tej je zaznamenané, ktoré z tlačidiel bolo stlačené a táto informácia je predaná do fronty s názvom "gpio_event_queue". Po predaní dát do fronty si úloha **Buttons** z nej prevezme dáta a spracuje ich.



Obr. 3.12: Vývojový diagram popisujúci obsluhu tlačidiel

3.3.2 Meranie napätia na batérii

Meranie napätia na batérii je realizované každú minútu. Nastavenie AD prevodníka a jeho referenčné napätie už boli vysvetlené v kapitole 2.2.5. Výsledná hodnota je tvorená ako priemer 100 tesne po sebe idúcich meraní napätia. Táto metodika bola zvolená na základe doporučenia výrobcu v API AD prevodníka [31]. Nameraná hodnota je uchovávaná a vyobrazená vždy, keď sa na HMI zobrazí stránka Settings. Experimentálne bola určená hodnota maximálneho napätia na 3,65 V (100%). V prípade dolnej hranice (0% nabitia) budeme uvažovať 3,4 V⁵.



Obr. 3.13: Vývojový diagram popisujúci periodické čítanie napätia na batérii

⁵Ide o hranicu vyplývajúcu z ubýtkového napätia na lineárnom regulátore pre 3,3V sieť

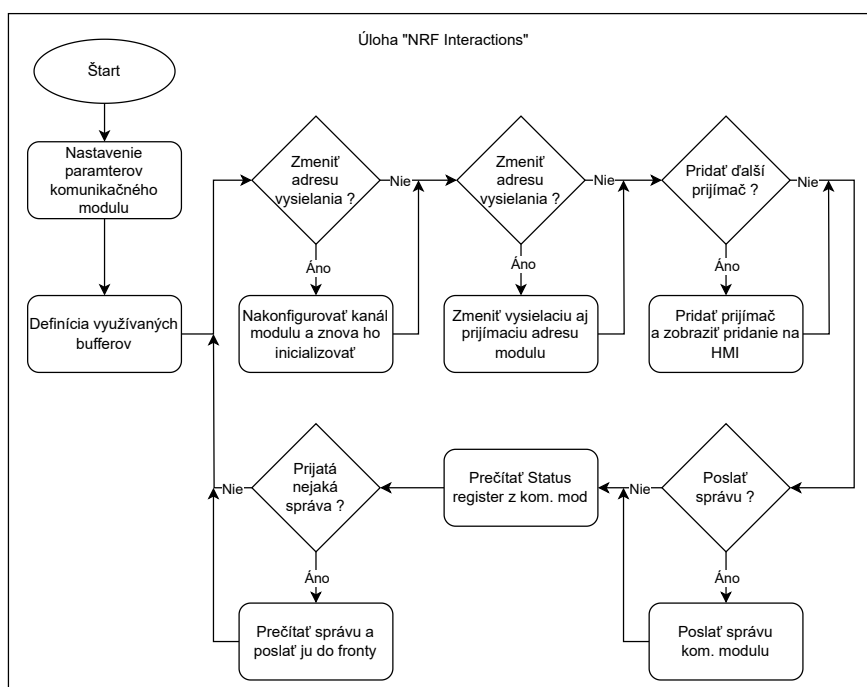
3.3.3 Komunikácia s modulom nRF24L01

Podobne ako v prípade terčovej jednotky bola aj na kontrolnej jednotke pre implementáciu SPI komunikácie s komunikačným modulom nRF24L01 využitá knižnica, konkrétne `esp-idf-mmio`. Narozdiel od knižnice využitej na terčovej jednotke pri testovaní funkčností neboli odhalené žiadne chyby alebo nedostatky a knižnica preto nemusela byť upravovaná. Knižnica implementuje rozsiahle množstvo funkcií, ktoré pokrývajú všetky funkcionality potrebné pre implementáciu konfigurácie modulu, posielanie či prijímanie správ. Pre prijímanie správ z viacerých terčových jednotiek súčasne je využitá tzv. Multiciever Network. Pri prijatí správy je komunikačný modul schopný rozlíšiť z akej adresy mu bola správa doručená.

Princípy implementovanej komunikácie SPI boli vysvetlené v kapitole 3.1.3 a ovládanie modulu nRF24L01 zasa v kapitole 3.1.4. Ďalej v tejto kapitole budú postupne vysvetlené jednotlivé úlohy využívajúce túto komunikáciu. [33]

SPI komunikácia s modulom nRF24L01

Táto úloha realizuje všetku komunikáciu pomocou SPI s komunikačným modulom. Je schopná pomocou front prijímať požiadavky na nastavenie určitých parametrov komunikačného modulu, poslať a prijímať správy⁶.



Obr. 3.14: Vývojový diagram ukazujúci úlohu NRF Interaction

⁶Rovnako ako v prípade terčovej jednotky je prijatie správy overované pomocou dopytovania

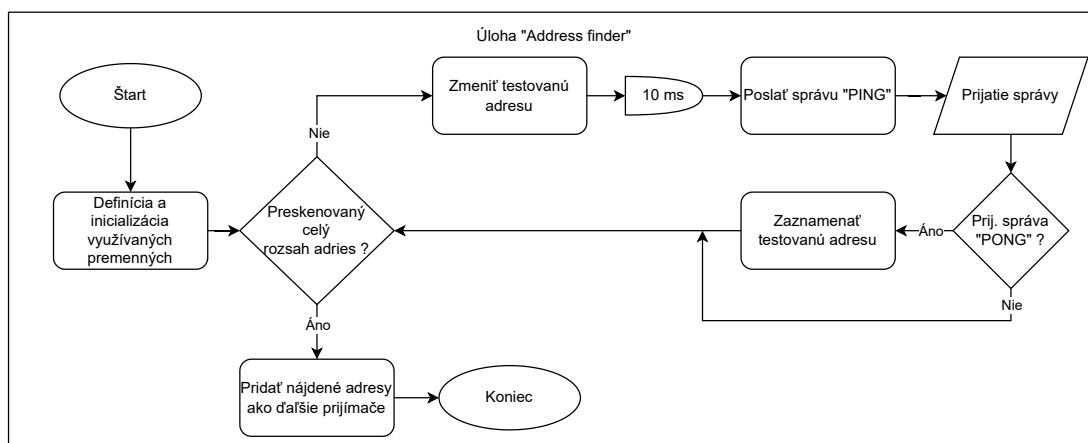
Address Finder

Ide o úlohu slúžiacu na vyhľadanie terčových jednotiek a následné zaznamenanie ich adries. Priebeh celej úlohy je vyobrazený na obrázku 3.15. Adresa každého komunikačného modulu má päť bytov. Komunikačné moduly terčových jednotiek sa odlišujú vo svojich adresách len jedným bytom. Je tomu tak, z dôvodu možnosti implementácie Multiciever Network. Príkladom môže byť tabuľka 3.3.

Tab. 3.3: Príklad variácie adries komunikačných jednotiek v systéme

Jednotka	Adresa
Kontrolná	0xe7,0xe7,0xe7,0xe7,0xe7
Terč 1	0xaa,0xe7,0xe7,0xe7,0xe7
Terč 2	0xab,0xe7,0xe7,0xe7,0xe7
Terč 3	0xac,0xe7,0xe7,0xe7,0xe7

Pri hľadaní terčových jednotiek je teda potrebné variovať len jeden byte adresy. Adresy zaznamenané pomocou tejto funkcie sú uložené a využívané pri komunikácii s jednotlivými terčovými jednotkami.



Obr. 3.15: Vývojový diagram popisujúci proces párovania terčových jednotiek

Posielanie správ viacerým terčovým jednotkám

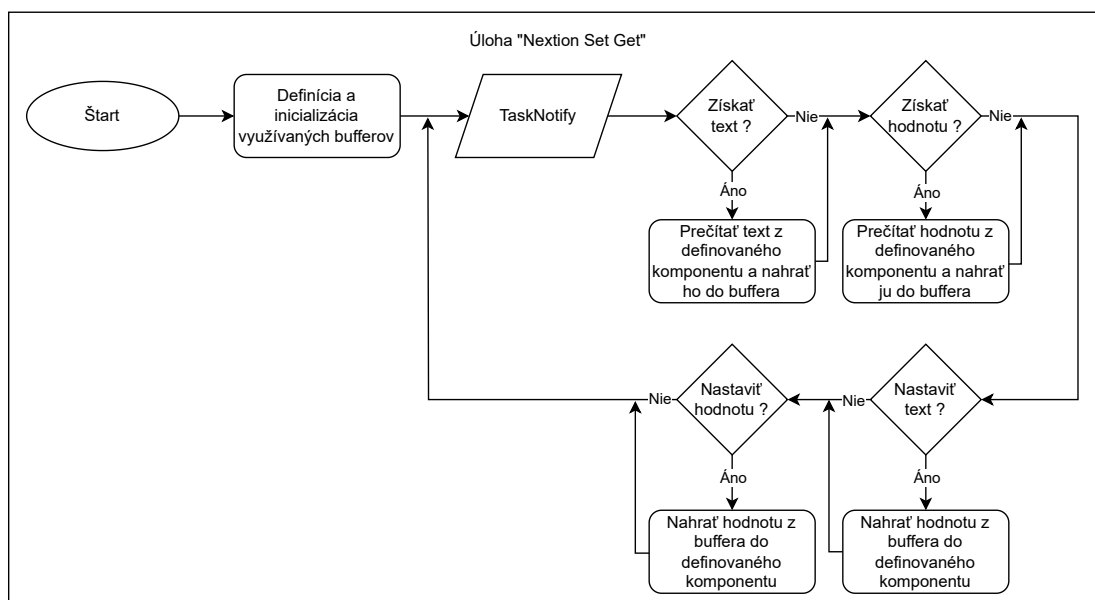
V prípade, keď je potrebné poslať jednu správu viacerým terčovým jednotkám, napr. správu pre zdvihnutie terčov, je využitý zoznam nájdených adries terčových jednotiek a správa je postupne rozoslaná princípom: zmena adresy, poslanie správy, zmena adresy, poslanie správy,..., až pokiaľ správa nebola poslaná všetkým registrovaným terčovým jednotkám.

3.3.4 Komunikacia s HMI Nextion

Všeobecný popis komunikácie s HMI Nexion bol popísaný v kapitole 3.2. Pre implementáciu komunikácie bola využitá knižnica ESP32-Driver-Nextion. Knižnica si vyžaduje použitie operačného systému FreeRTOS, pretože spravuje komunikáciu s HMI pomocou vytvorenia úlohy. Pri stlačení niektorého z aktívnych tlačidiel dôjde ku zaznamenaní ID objektu a stránky na ktorom sa objekt nachádza. Vyhodnocovacia funkcia overí tieto dve hodnoty a na základe nich vyvolá v systéme adekvátnu reakciu.

Zápis a čítanie hodnôt HMI

Pre zápis a čítanie hodnôt je potrebná samostatná úloha s názvom Nextion-set-get. Ide o implementáciu vytvorenú na základe požiadaviek knižnice.

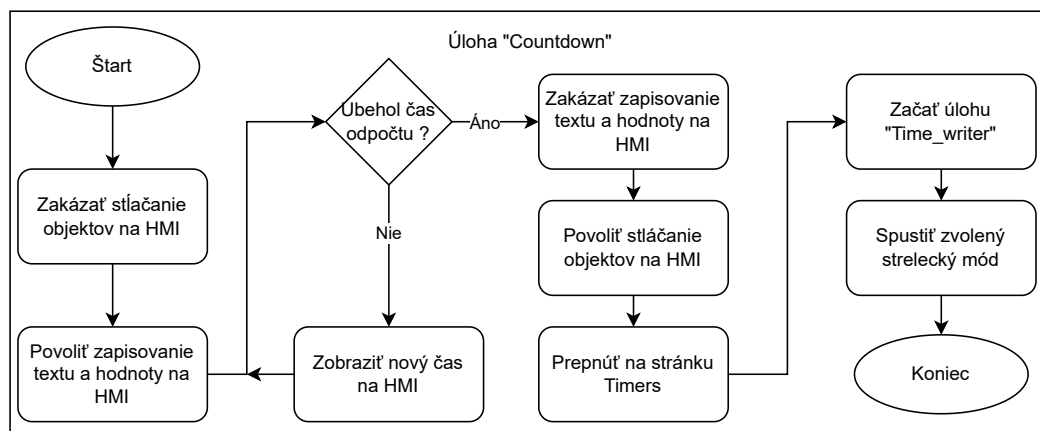


Obr. 3.16: Vývojový diagram popisujúci úlohu Nextion-Set-Get

Ako je vidieť na diagrame na obrázku 3.16 úloha čítania očakáva povolenie z externého zdroja pomocou funkcie TaskNotify. Po povolení funkcia zbehnú jeden krát a zostane visieť na tomto bode. Pri jej behu je funkcia schopná zapisovať a čítať hodnoty a text. Kvôli využitiu spoločných bufferov pre označenie komponentu funkcia dokáže interagovať vždy iba s jedným komponentom pre hodnotu a jedným pre text. Napriek tomu, že sa nejedná o ideálnu metódu implementácie, umožňuje zápis a čítanie hodnôt z akejkoľvek inej úlohy v programe.

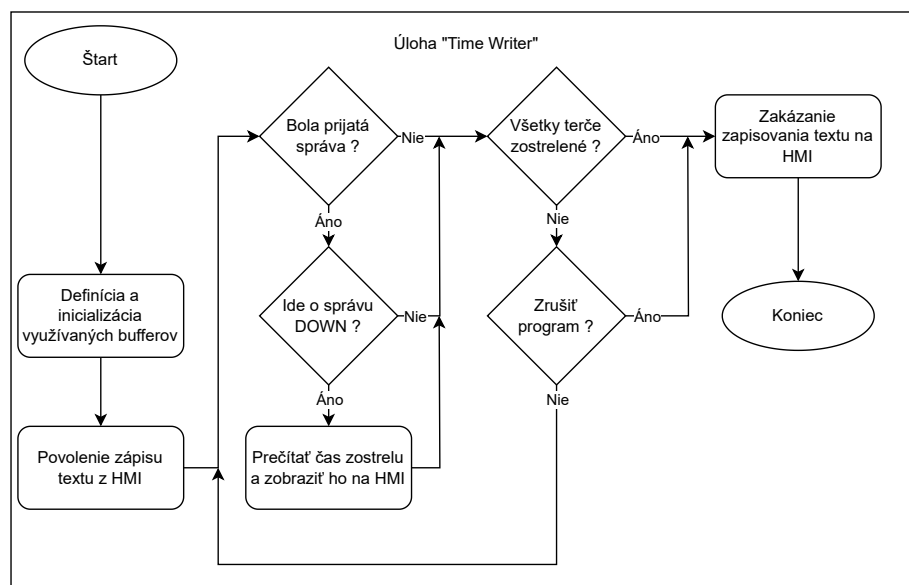
3.3.5 Strelecké programy

Pri spustení streleckého programu nastáva odpočet, ktorý súťažiacemu vytvorí priestor na prípravu sa na strelbu. Priebeh odpočtu je vyobrazený na obrázku 3.17.



Obr. 3.17: Vývojový diagram popisujúci úlohu Countdown

Ako je vidieť po uplynutí odpočtu je spustená úloha Time Writer, ktorá je zodpovedná za spracovanie prijatých správ a vyobrazenie časov zostrelenia na HMI. Táto úloha môže byť ukončená dvoma spôsobmi. Prvým je zostrelenie všetkých terčov, druhým je zrušenie stlačením tlačidla Abort. Priebeh úlohy Time Writer je vyobrazený na obrázku 3.18.



Obr. 3.18: Vývojový diagram popisujúci úlohu Time Writer

Strelecké módy

Pri vývoji boli implementované tri strelecké módy. **Prvý strelecký mód** je najjednoduchším z nich. Po štarte sú všetky terče naraz zdvihnuté, mód sa končí zostrelením všetkých z nich, alebo stlačením tlačidla Abort. **Druhý strelecký mód** funguje tak, že po štarte je náhodne zamiešané poradie zdvihnutia terčov⁷. Následne sa v tomto vytvorenom poradí, s časovým rozostupom 2,5 sekundy, terče zdvihnú. Mód sa končí zostrelením všetkých terčov, alebo stlačením tlačidla Abort. **Tretí strelecký mód** je nekonečný mód, ktorý náhodne zdvíha terče. V tomto prípade sa mód ukončuje výhradne len stlačením tlačidla Abort.

3.3.6 Komunikácia s terčovými jednotkami

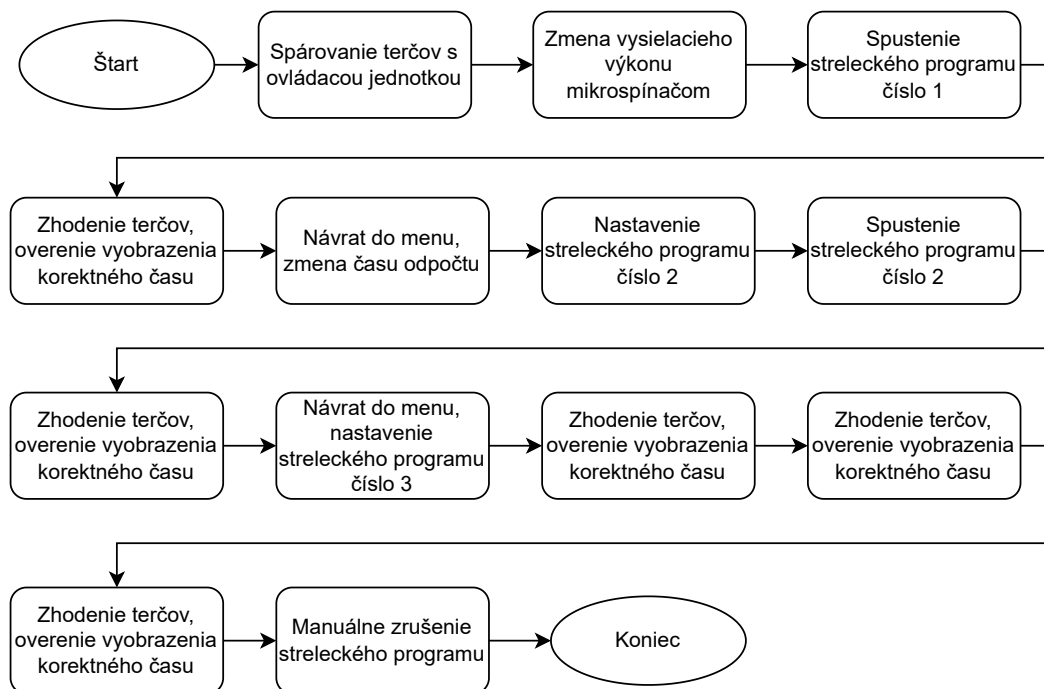
Na dosku kontrolnej jednotky boli implementované funkcie posielania a prijímania správ tak, aby vytvárali protiklad správam, ktoré je terčová jednotka schopná prijímať a posilať. Tieto správy sú vysvetlené v kapitole 3.1.5. Znamená to, že doska kontrolnej jednotky je schopná posilať správy vypísané v tabuľke 3.2 a prijímať správu **DOWN,z** ako je popísaná v už spomutej kapitole.

Implementovaný softvér sa nachádza v elektronických prílohách práce.

⁷miešanie poradia je realizované Fisher-Yates algoritmom

3.4 Testovanie

Pre otestovanie funkcií bol navrhnutý testovací scenár, ktorý mal za úlohu simulovať bežné použitie systému strelnice. Scenár je opísaný na obrázku 3.19.



Obr. 3.19: Diagram opisujúci testovací scenár

Scenár zahŕňa v sebe využitie takmer všetkých funkcií strelnice. Pre overenie presnosti času zhodenia terčov boli využité manuálne ovládané stopky. Po porovnaní časov, došlo ku vyhodnoteniu, že systém strelnice je dostatočne presný v meraní času na to, aby bol využitý na rekreačné účely, pre ktoré bol navrhnutý. Už spomenutou vynechanou funkciou z testovania bola funkcia zmeny vysielacieho kanálu. K jej vyradeniu prišlo, pretože spôsobovala nekonzistentné správanie niektorých terčových jednotiek. Po dôkladnom preverení firmvéru a ďalšom testovaní bol pôvod týchto nedostatkov prisúdený neobjavenej chybe na hardvérovej úrovni terčových jednotiek.

Záver

Cielom bakalárskej práce bolo vyvinúť riadiacu jednotku elektronickej vzduchovkovej strelnice. Nakoľko so zadáním práce bol doručený už vytvorený hardvér terčových jednotiek bolo najprv potrebné ho analyzovať.

Analýza objasnila aké periférie môžu byť využité pri realizácii systému strelnice a súčasne poukázala na ich limity. Napríklad to, že terčové jednotky nemajú spôsob ako vyhodnocovať miesto dopadu streli na terč alebo fakt, že infračervené snímače nie sú usposobené na fungovanie počas slnečných dní vo vonkajšom prostredí.

Následne bol urobený prieskum trhu, ktorý objasnil, aké sú všeobecné požiadavky na systémy rovnakej povahy. S prihliadnutím na tieto novo získané poznatky a výsledky už spomenutej analýzy bol navrhnutý celkový koncept strelnice ako systému. Koncept bol predstavený v kapitole 2. Definuje z akých častí sa systém bude skladať, ukazuje informačné toky medzi nimi a popisuje očakávané funkčnosti.

V rámci celkového konceptu strelnice boli definované aj časti ovládacej jednotky. Návrh dosky plošných spojov je bližšie opísaný v kapitole 2.2. Pri návrhu boli využité aj komponenty a zapojenia z DPS terčových jednotiek, pre zjednodušenie prípadnej opravy a zachovanie kompatibility komunikácie. Doska plošných spojov bola po návrhu vyrobená a čiastočne osadená firmou JLCPCB. Po dodaní boli chýbajúce súčiastky, ktoré neboli osadené u výrobcu z ekonomického hľadiska, osadené ručne. Pre ovládanie kontrolnej jednotky bolo vybrané dotykové HMI od firmy Nexion, bližšie popísané v kapitole 2.2.3.

Pri vývoji firmvéru terčových jednotiek došlo viac-krát ku objaveniu chyby na hardvérovej úrovni. Chybné komponenty boli vymenené. Firmvér terčových jednotiek bol vytvorený tak, aby podliehal štandardom nastaveným celkovým konceptom. Celkový popis firmvéru je v kapitole 3.1.

Bolo navrhnuté užívateľské rozhranie pre HMI, tak aby užívateľovi umožňovalo nastavenie všetkých relevantných parametrov riadiacej jednotky, prípadne terčových jednotiek. Popis navrhnutého UI sa nachádza v kapitole 3.2.1.

Ako posledný bol vyvinutý firmvér riadiacej jednotky. Zameriava sa na spracovanie podnetov od užívateľa a riadenie viacerých terčových jednotiek. Jeho popis a podrobnosti návrhu sú zaznamenané v kapitole 3.3.

Po dokončení vývoja strelnice boli otestované navrhnuté funkčnosti. Ovládacia jednotka je schopná sa prepojiť až s piatimi terčovými jednotkami. Je schopná komunikovať so všetkými jednotkami súčasne, ale aj adresovať jednotlivé z nich. Terčové jednotky komunikáciu spracovávajú a reagujú na ňu pohybom terčov. Po zostrelení terča príde ku zaznamenaní času a jeho následnému poslaniu späť na ovládaciu jednotku. Ovládacia jednotka prijatú správu spracuje a čas zostrelenia vyobrazí na HMI. Bližší popis metodiky testovania sa nachádza v kapitole 3.4.

Literatúra

- [1] *OFFICIAL STATUTES, RULES AND REGULATIONS*. Online. International Shooting Sport Federation. 2009. Dostupné z: https://www.issf-sports.org/getfile.aspx?mod=docf&pane=1&inst=455&file=ISSF_Rule_Book_2023_V_02.pdf. [cit. 2023-12-22].
- [2] *Operating Instructions for electronic scoring SETA SCORE10*. Online. SETA elektronische Scheibe Schießstand Trefferauswertung DSB. 2018. Dostupné z: https://cdn.website-editor.net/90516910252b45ac95beaf7182ac7be5/files/uploaded/SETA_SCORE10_V20_2_engl_BDA.pdf. [cit. 2023-12-22].
- [3] *SQ10-UserManual*. Online. SportsQuantum. 2018. Dostupné z: <https://sportquantum.com/wp-content/uploads/SQ10-UserManual-201906.pdf>. [cit. 2023-12-22].
- [4] *Terčová jednotka systému AttackSense*. Online. In: AttackSense. 2020. Dostupné z: <https://shop.attacksense.com/products/airgun-paint-ball-small-range-starter-pack>. [cit. 2024-01-04].
- [5] *AttackSense manual*. Online. Attacksense. 2020. Dostupné z: <https://attacksense.com/manual/>. [cit. 2023-12-22].
- [6] *NCR18650B Li-ion battery Datasheet*. Online. TME - Transfer Multisort Elektronik. 2007. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/3e0170a1e089819f286f7066e69035b4/NCR18650B.pdf>. [cit. 2023-12-25].
- [7] *TP4056 1A Standalone Linear Li-lon Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8 Datasheet*. Online. Sparkfun. 2003. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/assets/c/b/9/f/0/TP4056_Datasheet.pdf?_gl=1*n47a36*_ga*MzcwMzQ1MTYxLjE2OTY3NzYyMjU.*_ga_T369JS7J9N*MTcwMzQ5Njc0Mi41LjEuMTcwMzQ5Njc3OC4yNC4wLjA.. [cit. 2023-12-25].
- [8] *MT3608 1.2MHz 2A Step Up Converter Datasheet*. Online. Olimex LTD. 1998. Dostupné z: <https://www.olimex.com/Products/Breadboarding/BB-PWR-3608/resources/MT3608.pdf>. [cit. 2023-12-25].
- [9] *LDO Regulator MCP1703A Datasheet*. Online. Microchip Technology. 1996. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005122B.pdf>. [cit. 2023-12-25].

- [10] *ATmega328P Datasheet*. Online. Microchip Technology. 1996. Dostupné z: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. [cit. 2023-12-24].
- [11] *Module nRF24L01 Datasheet*. Online. Mouser Electronics Europe. 1996. Dostupné z: https://www.mouser.com/datasheet/2/297/nRF24L01_Product_Specification_v2_0-9199.pdf. [cit. 2023-12-25].
- [12] *Komunikačný modul nRF24l01+PA+LNA*. Online. In: Last Minute Engineers. 2018. Dostupné z: <https://lastminuteengineers.com/nrf24l01-arduino-wireless-communication>. [cit. 2024-01-04].
- [13] *Reflective Optical Sensor with Transistor Output Datasheet*. Online. TME - Transfer Multisort Elektronik. 2007. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/8f77cbb7f04f5c580c19383843c700ae/tcrt5000.pdf>. [cit. 2023-12-25].
- [14] *ESP32 Series Datasheet*. Online. Espressif Systems. 2011. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. [cit. 2023-12-27].
- [15] *ESP32-S3-WROOM-1 ESP32-S3-WROOM-1U Datasheet*. Online. Espressif Systems. 2021. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3-wroom-1_wroom-1u_datasheet_en.pdf. [cit. 2024-05-09].
- [16] *ESP32 DevKit Schematic*. Online. Espressif Systems. 2011. Dostupné z: https://dl.espressif.com/dl/schematics/esp32_devkitc_v4-sch.pdf. [cit. 2023-12-28].
- [17] *NX4832F035 HMI Datasheet*. Online. Nextion. 2019. Dostupné z: <https://nextion.tech/datasheets/nx4832f035/>. [cit. 2023-12-28].
- [18] *XC6210 Datasheet*. Online. Torex Product Site. 2023. Dostupné z: <https://product.torexsemi.com/system/files/series/xc6210.pdf>. [cit. 2024-05-11].
- [19] *Measure Lithium ion battery voltage*. Online. Electrical Engineering Stack Exchange. 2009. Dostupné z: <https://electronics.stackexchange.com/questions/39412/measure-lithium-ion-battery-voltage-thus-remaining-capacity>. [cit. 2024-01-03].

- [20] *ESP32-S3 ADC Documentation*. Online. ESP-IDF Programming Guide. 2022. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.4/esp32s3/api-reference/peripherals/adc.html>. [cit. 2024-05-11].
- [21] *About KiCad*. Online. KiCad EDA. 2012. Dostupné z: <https://www.kicad.org/about/kicad/>. [cit. 2024-01-04].
- [22] *JLCPCB Capabilities*. Online. JLCPCB. 2011. Dostupné z: <https://jlcpcb.com/capabilities/pcb-capabilities>. [cit. 2023-12-28].
- [23] *Microchip Studio for AVR® and SAM Devices*. Online. Microchip. 1996. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/develop/microchip-studio#Key%20Features>. [cit. 2024-05-11].
- [24] *Interface MG995 Servo Motor with Arduino – Example Code*. Online. Microcontrollerslab. 2014. Dostupné z: <https://microcontrollerslab.com/mg995-servo-motor-pinout-interfacing-with-arduino-features-examples/>. [cit. 2024-05-12].
- [25] LEDIN, Jim. *Architecting High-Performance Embedded Systems*. Packt Publishing, 2021. ISBN 978-1-78995-596-5.
- [26] ADAMS, Helvijs. *NRF24L01-avr-bareminimum*. Online. GitHub. 2008. Dostupné z: <https://github.com/thehelvijs/nRF24L01-avr-bareminimum>. [cit. 2024-05-13].
- [27] *RF24*. Online. GitHub. 2008. Dostupné z: <https://github.com/nRF24/RF24>. [cit. 2024-05-13].
- [28] *Software Engineering for Embedded Systems - Methods, Practical Techniques, and Applications*. 2013. Elsevier, 2013. ISBN 978-0-12-415917-4.
- [29] *Nextion Instruction Set*. Online. Nextion. 2019. Dostupné z: <https://nextion.tech/instruction-set/>. [cit. 2024-05-16].
- [30] *Visual Studio Code ESP-IDF extensions*. Online. Visual Studio Code. 2015. Dostupné z: <https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=espressif.esp-idf-extension>. [cit. 2024-05-17].
- [31] *ESP-IDF API reference*. Online. Espressif Technical Documentation. 2020. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32s3/api-reference/index.html>. [cit. 2024-05-17].

- [32] *About FreeRTOS*. Online. FreeRTOS – Market Leading RTOS (Real Time Operating System) for embedded systems with Internet of Things extensions. 2009. Dostupné z: <https://www.freertos.org/about-RTOS.html>. [cit. 2024-05-17].
- [33] *Esp-idf-mirf*. Online. GitHub. 2008. Dostupné z: <https://github.com/nopnop2002/esp-idf-mirf/tree/master>. [cit. 2024-05-18].
- [34] *ESP32-Driver-Nextion*. Online. GitHub. 2008. Dostupné z: <https://github.com/gfurtadoalmeida/esp32-driver-nextion/tree/master>. [cit. 2024-05-18].

Zoznam symbolov a skratiek

API	Aplikačné rozhranie – Application interface
CPU	Centrálna procesorová jednotka – Central Processing Unit
CSN	Chip Select Not
DPS	Doska plošných spojov
HMI	Rozhranie človek-stroj – Human-Machine Interface
IDE	Integrované vývojové prostredie – Integrated Development Enviroment
IO	Integrovaný obvod
LED	Luminiscenčná dióda – Light Emitting Diode
Li-ion	Lítium-iónový
LSB	Least significant byte
MISO	Master in Slave out – novým Leader in Follower out
MOSI	Master out Slave in – novým Leader out Follower in
MSB	Most significant byte
PWM	Modulácia šírkou pulzu – Pulse Wide Modulation
RTOS	Operačný systém v reálnom čase – Real-time operating system
SCK	Serial Clock
SMD	Zariadenie pre povrchovú montáž – Surface mount device
SPI	Serial Peripheral Interface
THT	Osadenie pomocou drátových vývodov – Through-hole technology
TVS	Tlmič prechodného napätia – Transient Voltage Supressor
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UI	Užívateľské rozhranie – User Interface
USART	Synchrónne/Asynchrónne sériové rozhranie – Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter

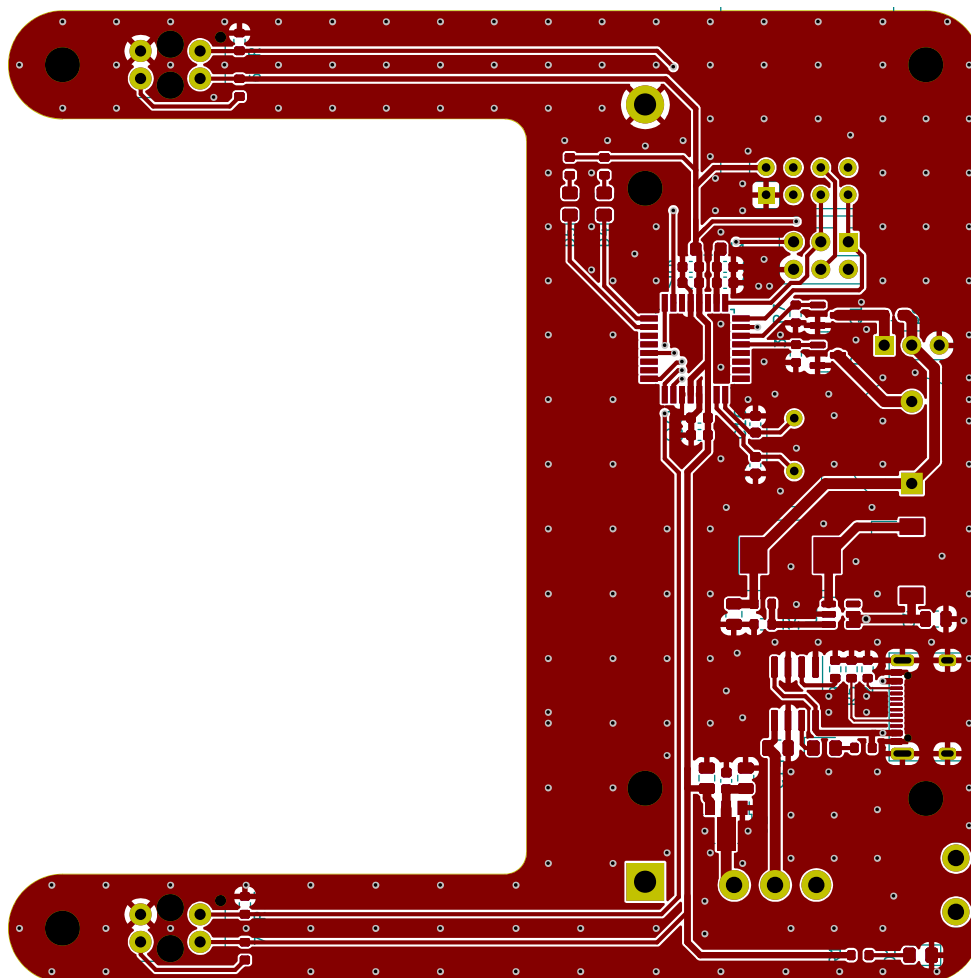
USB

Univerzálna sériová zbernica – Universal Serial Bus

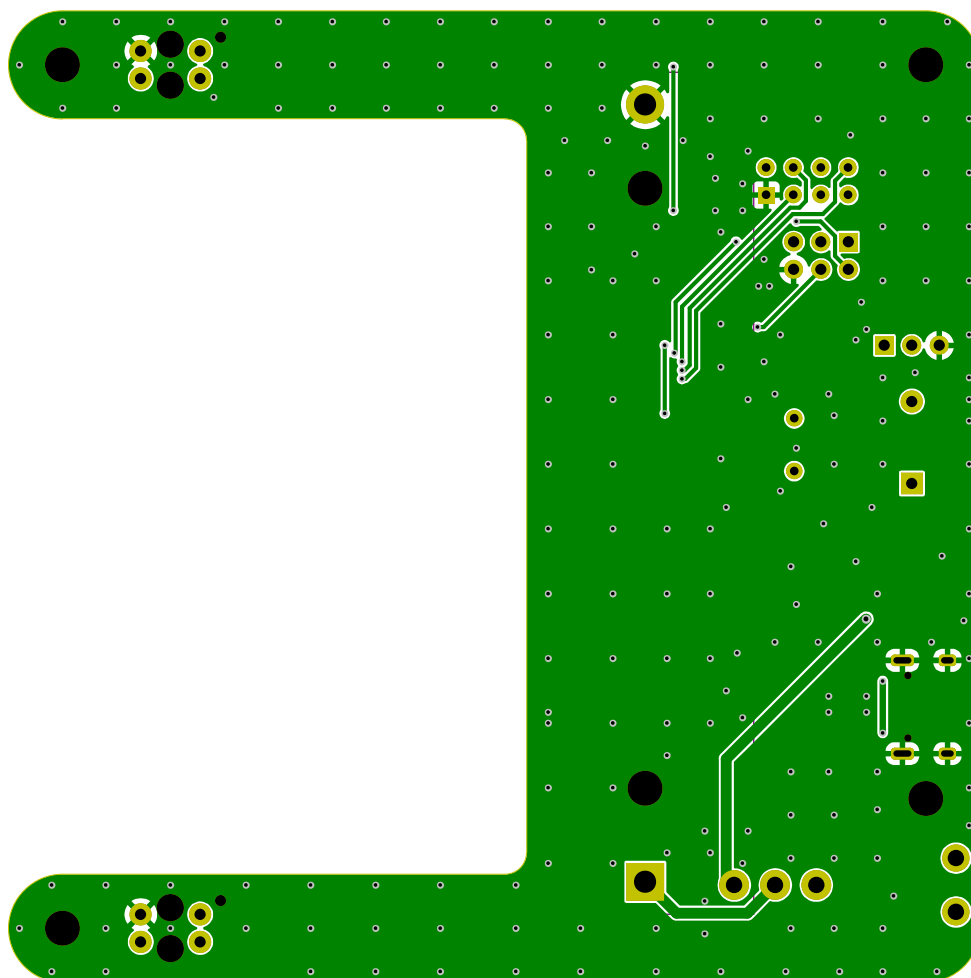
Zoznam príloh

A	Terčová jednotka	54
A.1	Elektrotechnická schéma terčovej jednotky	54
A.2	Predná strana DPS terčovej jednotky	55
A.3	Zadná strana DPS terčovej jednotky	56
A.4	Model zostavenej terčovej jednotky	57
B	Riadiaca jednotka	58
B.1	Elektrotechnická schéma riadiacej jednotky	58
B.2	Predná strana navrhutej DPS riadiacej jednotky	59
B.3	Zadná strana navrhutej DPS riadiacej jednotky	60
C	Komunikačný modul nRF24L01	61
C.1	Tabuľka príkazov pre ovládanie modulu nRF24L01	61
C.2	Zoznam funkcií implementovaných knižnicou nRF24L01-avr-bareminimum	61
D	HMI	62
D.1	Tabuľka objektov a ich popis	62
E	EPS32 FreeRTOS	63
E.1	Zoznam využívaných úloh a ich popis	63
E.2	Zoznam využívaných front a ich popis	63

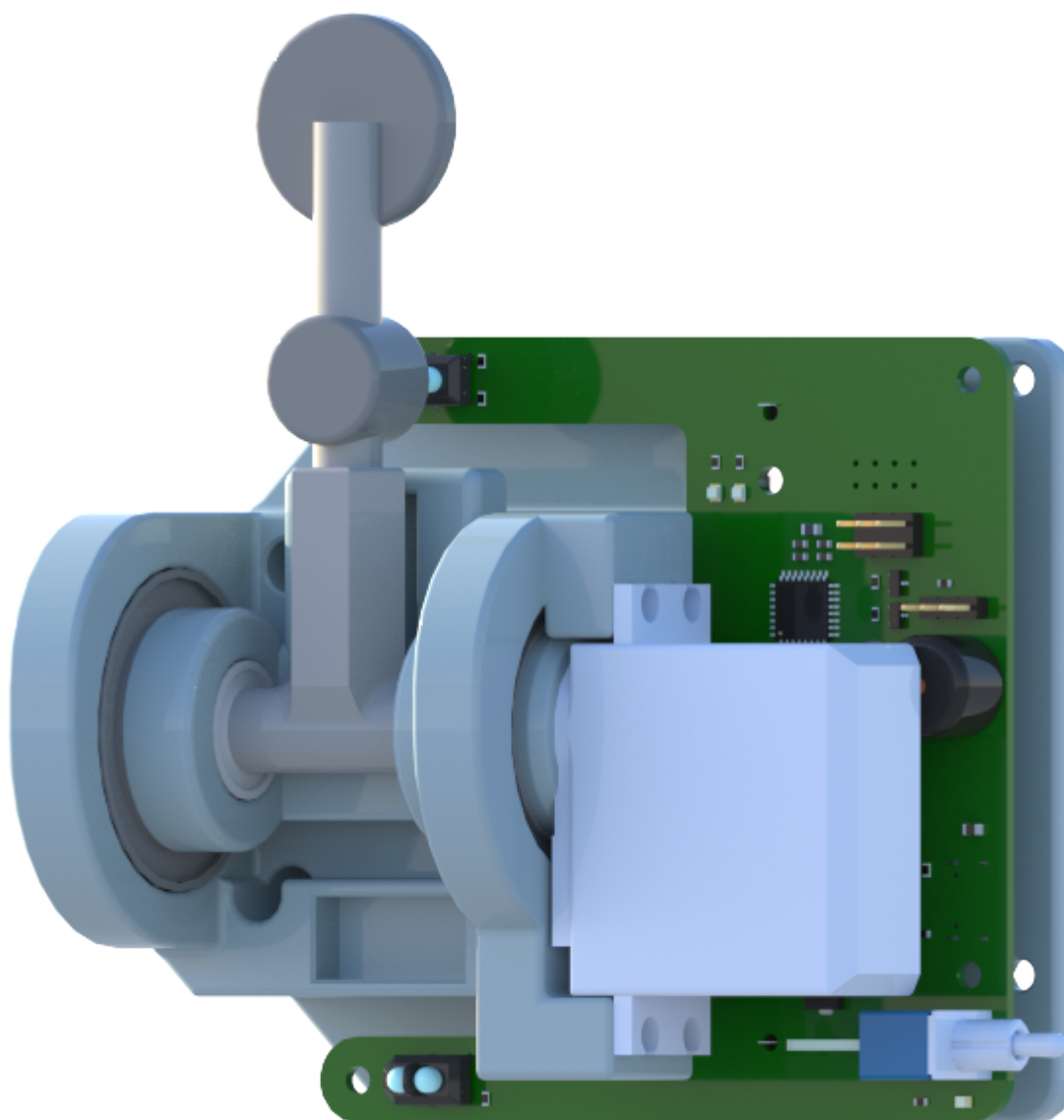
A.2 Predná strana DPS terčovej jednotky



A.3 Zadná strana DPS terčovej jednotky

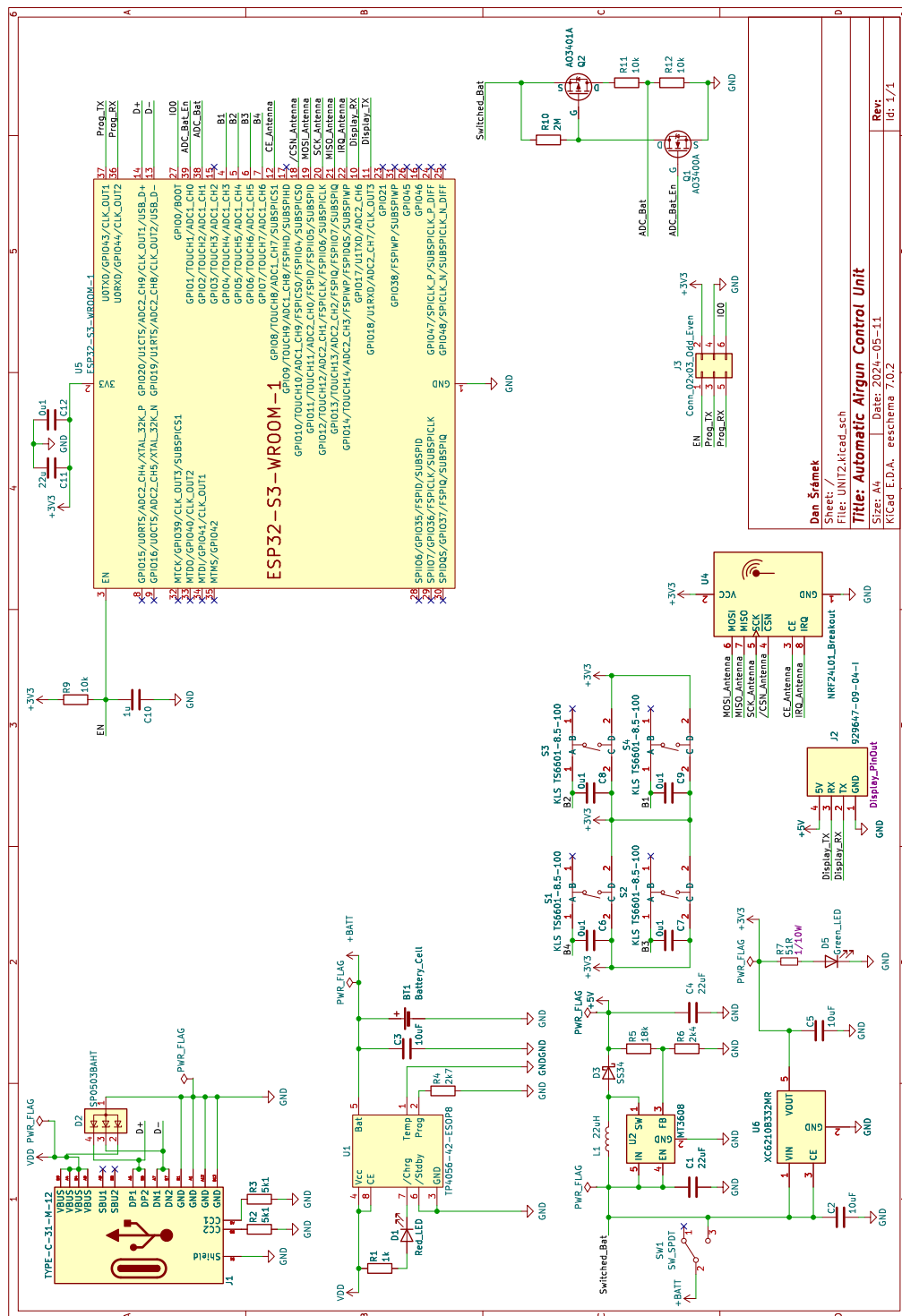


A.4 Model zostavenej terčovej jednotky

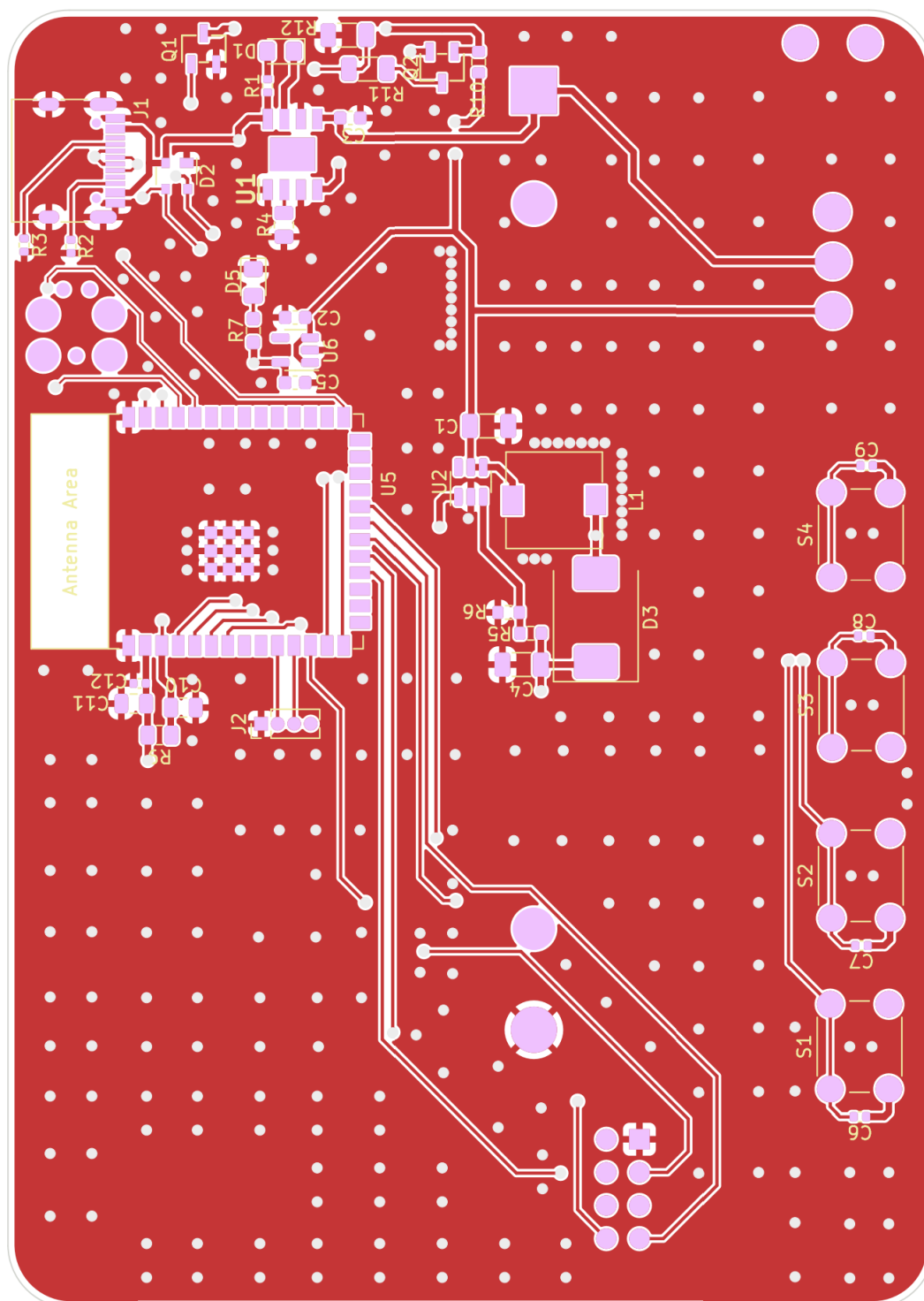


B Riadiaca jednotka

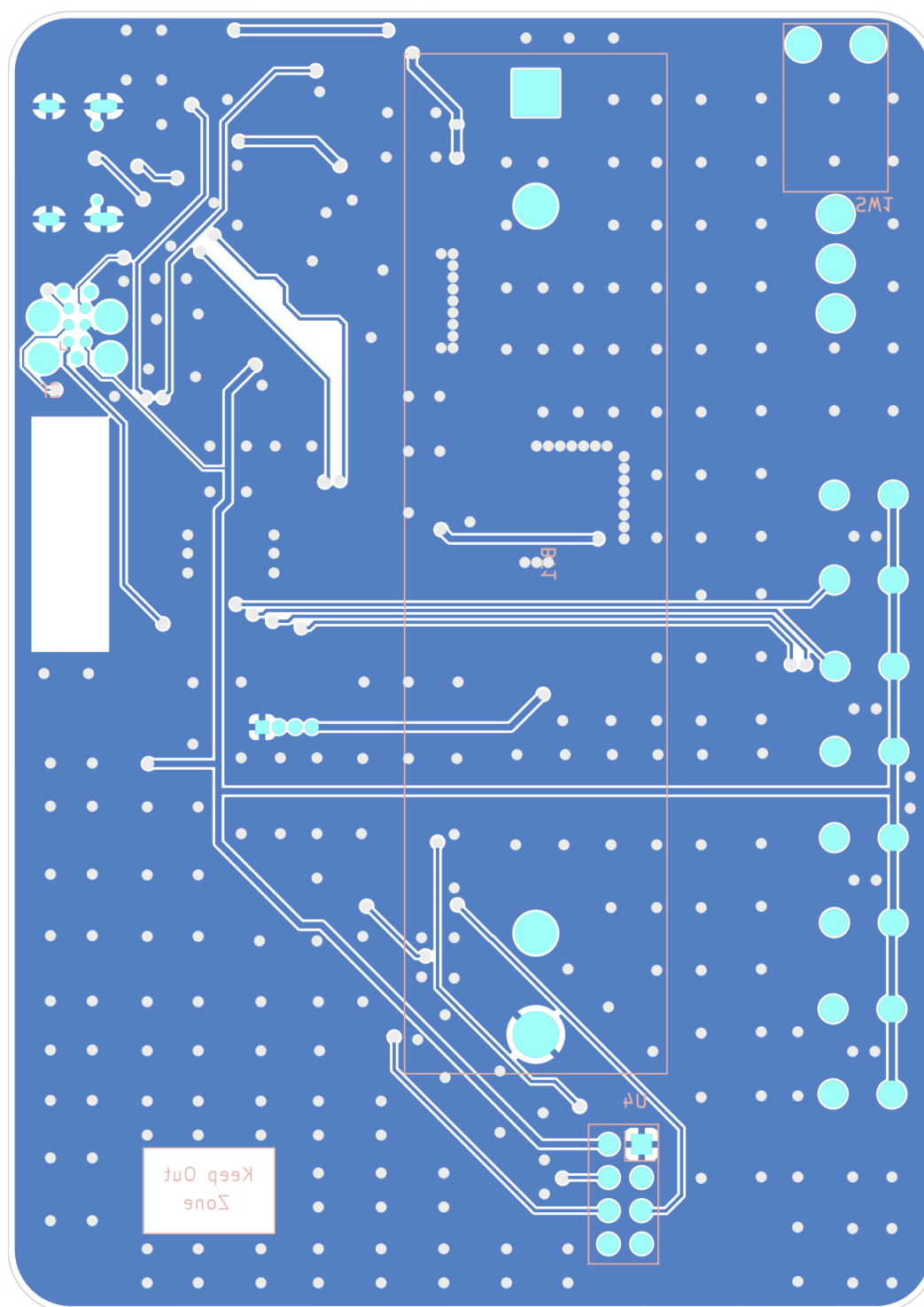
B.1 Elektrotechnická schéma radiacej jednotky



B.2 Predná strana navrhnutej DPS riadiacej jednotky



B.3 Zadná strana navrhnutej DPS riadiacej jednotky



C Komunikačný modul nRF24L01

C.1 Tabuľka príkazov pre ovládanie modulu nRF24L01

Príkaz	Príkaz (binárna forma)	Počet možných nasledujúcich bytov	Popis
R_Register	000A AAAA	1-5	Čítanie príkazových registrov a status registra.
W_Register	001A AAAA	1-5	Zápis do príkazových registrov a status registra.
R_RX_Payload	0110 0001	1-32	Čítanie registra prichádzajúcich správ. Správa je po prečítaní z registra odstránená. Využívané v prijímacom móde.
W_TX_Payload	1010 0000	1-32	Zápis do registra odchádzajúcich správ. Správa je po úspešnom odoslaní z registra odstránená. Využívané v odosiacom móde.
Flush_TX	1110 0001	0	Vyprázdenie TX FIFO registra
Flush_RX	1110 0010	0	Vyprázdenie RX FIFO registra
NOP	1111 1111	0	Žiadna operácia. Môže byť využité pre čítanie status registra

Označenie AAAAA v tabuľke značí adresu registra na ktorý je príkaz cielený.
[11]

C.2 Zoznam funkcií implementovaných knižnicou nRF24L01-avr-bareminimum

- nRF24 Available – zistenie, či bola prijatá správa
- nRF24 Init – inicializácia modulu, nastavenie parametrov prenosu
- nRF24 Read message – prečítanie prijatej správy z modulu
- nRF24 Send message – poslanie správy pomocou modulu
- nRF24 Set channel (pridaná) – zmena kanálu na ktorom modul vysiela/prijíma správy
- nRF24 Set power (pridaná) – zmena výkonu vysielacieho zosilovača
- nRF24 Start listening – nastavenie modulu do stavu príjmania správy
- nRF24 State – zistenie v akom zo stavov automatu sa modul nachádza
- Read – čítanie hodnoty z registra modulu
- Write – zápis hodnoty do registra modulu

D HMI

D.1 Tabuľka objektov a ich popis

Značenie	Objekt	Popis
t	Text	Objekt zobrazujúci text
q	Scrolling Text	Objekt zobrazujúci animáciu posúvajúceho sa textu
n	Number	Objekt zobrazujúci celé číslo
x	Float	Objekt zobrazujúci desatinné číslo
c	CheckBox	Objekt zobrazujúci binárnu hodnotu
b	Button	Tlačidlo
bt	Dual-State Button	Dvojpohodové tlačidlo
j	Progress bar	Ukazateľ postupu 0-100%
p	Picture	Obrázok

E EPS32 FreeRTOS

E.1 Zoznam využívaných úloh a ich popis

- Address Finder – skenovanie nastaveného kanálu a spárovanie nájdených terčových jednotiek
- Battery Read – čítanie napätia na batérii
- Buttons – spracovanie podnetov z tlačidiel
- Cancel – vypnutie streleckého programu a sklopenie terčov
- Countdown – odpočet začiatku streleckého programu a jeho následné spustenie
- NRF Interaction – komunikácia s komunikačným modulom nRF24L01
- Set Channel – zmena komunikačného kanálu všetkých spárovaných terčových jednotiek a kontrolnej jednotky na základe vstupu z HMI
- Set Countdown – zmena dĺžky odpočtu pred začiatkom streleckého programu na základe vstupu z HMI
- Shooting M1 – úloha zodpovedná za priebeh streleckého módu 1
- Shooting M2 – úloha zodpovedná za priebeh streleckého módu 2
- Shooting M3 – úloha zodpovedná za priebeh streleckého módu 3
- Time Writer – vyobrazenie času zostrelu na HMI na základe informácie prijatej z terčovej jednotky

E.2 Zoznam využívaných front a ich popis

- Address Change Queue – prenos adresy pre zmenu vysielacej adresy kontrolnej jednotky
- Channel Change Queue – prenos čísla kanálu pre zmenu kanálu terčových jednotiek a kontrolnej jednotky
- GPIO Event Queue – prenos čísla pinu tlačidla, ktoré bolo stlačené
- Receiver Add Queue – prenos nájdenej adresy na pridanie ďalšej prijímacej adresy na kontrolnej jednotke
- RX Messages Queue – prenos odosielanej správy na komunikačný modul
- TX Messages Queue – prenos prijatej správy z komunikačného modulu