



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

VSTUPY A VÝSTUPY PRO MODBUS/TCP SERVER

I/O PERIPHERIES FOR MODBUS/TCP SERVER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matej Mikula

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Macho, Ph.D.

BRNO 2024



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Matej Mikula

ID: 230134

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Vstupy a výstupy pro Modbus/TCP server

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s řídicím systémem Logix.
2. Seznamte se s prototypem komunikačního rozhraní MODBUS/TCP.
3. Navrhněte úpravy desky MODBUS/TCP serveru, aby byly odstraněny nedostatky předchozího návrhu a úpravy realizujte.
4. Navrhněte rozšiřující I/O moduly pro zařízení MODBUS/TCP server, nakreslete schéma zapojení a stanovte hodnoty jednotlivých součástek.
5. Pro rozšiřující moduly navrhněte desky plošných spojů, osadte je součástkami a oživte je.
6. Dle potřeby upravte existující firmware serveru.
7. Vytvořte testovací aplikaci pro PLC a pomocí ní ověřte funkčnost MODBUS/TCP serveru a rozšiřujících I/O modulů.
8. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte případná vylepšení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

EtherNet/IP Socket Interface. Application Technique. Rockwell Automation. ENET-AT002C-EN-P. 2014.

Modbus Messaging Implementation Guide. Modbus Organization. 2006.

https://modbus.org/docs/Modbus_Messaging_Implementation_Guide_V1_0b.pdf.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 22.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Macho, Ph.D.

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 vývojom vstupno-výstupnej periférie pre Modbus TCP server. Jej cieľom je vytvoriť funkčný model zariadenia s analógovými a digitálnymi vstupmi a výstupmi. Zariadenie je schopné komunikácie s PLC Allen-Bradley rady Logix. Dokáže zdieľať stav jeho vstupov a je možné nastaviť hodnotu jeho výstupov.

Funkčnosť navrhnutého zariadenia je overená vytvorením jednoduchšej aplikácie pre PLC.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

MODBUS, TCP/IP, PLC, Logix, Allen-Bradley, vstup, výstup, ethernet

ABSTRACT

The thesis focuses on the development of input-output peripherals for a Modbus TCP server. Its goal is to create a functional model of a device with analog and digital inputs and outputs. The device is capable of communicating with the PLC Allen-Bradley Logix series. It can report the state of its inputs, and it is possible to set the value of its outputs.

The functionality of the proposed device is verified by creating a simple application for the PLC.

KEYWORDS

MODBUS, TCP/IP, PLC, Allen-Bradley, Logix, input, output, ethernet

MIKULA, Matej. *Vstupy a výstupy pro Modbus/TCP server*. Bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2024. Vedúci práce: Ing. Tomáš Macho, Ph.D.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Matej Mikula
VUT ID autora: 230134
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2023/24
Téma záverečnej práce: Vstupy a výstupy pro Modbus/TCP server

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedú-cej/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 bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Tomáš Macho, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
1 Systémy Logix	13
1.1 Komunikačné rozhrania	14
2 Požiadavky na systém	15
3 Komunikačné rozhranie MODBUS/TCP	16
3.1 Client/Server model	16
3.2 Štruktúra správy	16
3.2.1 MBAP Hlavička	17
3.2.2 Kód funkcie	18
3.2.3 Dáta	19
3.3 Priebeh komunikácie	19
4 Pôvodný prototyp MODBUS TCP serveru	20
4.1 Nedostatky pôvodného riešenia	20
4.2 Vylepšenie pôvodného návrhu	20
4.2.1 Vývojové dosky	21
4.2.2 Mechanická pevnosť konektoru RJ45	21
4.2.3 Digitálne výstupy	22
5 Návrh obvodového riešenia zariadenia	23
5.1 Komunikačný modul	25
5.1.1 ESP32	26
5.1.2 USB	28
5.1.3 Voľba IP adresy	28
5.1.4 Napájanie komunikačného modulu	30
5.2 Modul analógových vstupov	32
5.2.1 Napätový vstup	32
5.2.2 Prúdový vstup	36
5.2.3 ADC	37
5.3 Modul digitálnych vstupov a výstupov	43
5.4 IO expandér	44
5.4.1 Voľba I2C adresy IO expandéru	45
5.4.2 Charakteristika výstupov expandéru	46
5.5 Digitálne vstupy	47
5.6 Digitálne výstupy	49

5.6.1	Spôsob zapojenia digitálnych výstupov	51
5.7	Napájanie modulu digitálnych vstupov a výstupov	51
5.8	Modul digitálnych výstupov	52
6	Firmware	54
6.1	Arduino IDE	54
6.2	I2C	55
6.3	Nastavenie IP adresy	56
6.4	Pripojenie ku sieti ethernet	57
6.5	Pripojenie prostredníctvom Wifi	57
6.6	Modbus server	57
7	Overenie funkčnosti Modbus TCP serveru	59
7.1	Nastavenie pripojenia	59
7.2	Overení funkcie čítania a zápisu	60
7.2.1	Nastavenie digitálnych výstupov	61
8	Testovacia aplikácia pre PLC	63
	Záver	66
	Literatúra	68
	Zoznam symbolov a skratiek	71
	Zoznam príloh	72
A	Schéma zapojenia navrhnutých modulov	73
B	Súbory návrhu v programe Eagle	78
C	Firmware	79
D	3D model predných panelov	80
E	Testovací program pre PLC	81
F	Chyba merania napätia	82
G	Modbus TCP server	84

Zoznam obrázkov

1.1	Ukážka systémov ControlLogix 5800 a GuardLogix5800 [2]	13
3.1	Príklad zapojenia zariadení v MODBUS TCP/IP sieti [3]	16
3.2	Client/Server model komunikácie MODBUS [4]	16
3.3	MODBUS Žiadosť/Odpoveď cez TCP/IP [4]	17
4.1	Bloková schéma prototypu Modbus/TCP serveru	20
4.2	Riziko mechanickej námahy vývojovej dosky OLIMEX	22
5.1	Bloková schéma návrhu Modbus/TCP serveru	23
5.2	Modbus TCP server (Príloha F)	24
5.3	Predný panel komunikačného modulu	25
5.4	Bloková schéma zapojenia komunikačného modulu	25
5.5	Vývojová doska LILYGO T-ETH-Lite-ESP32-S3	27
5.6	Spôsob zapojenia vývojovej dosky ESP32	27
5.7	Schéma zapojenia USB rozhrania	28
5.8	Zjednodušená blokovaná schéma pripojenia BCD prepínačov	29
5.9	Schéma zapojenia BCD prepínačov	30
5.10	Schéma zapojenia 3,3V napäťového regulátoru	31
5.11	Predný panel modulu analógových vstupov	32
5.12	Blokovaná schéma zapojenia modulu analógových vstupov	32
5.13	Schéma zapojenia analógového vstupu	33
5.14	Zjednodušená schéma vstupného deliča napätia	34
5.15	Blokovaná schéma analógového vstupu	35
5.16	Blokovaná schéma merania zosilnenia analógového vstupu	35
5.17	Merané zosilnenie analogového vstupu	36
5.18	Prepojenie svoriek pre voľbu prúdového vstupu kanálu 1	37
5.19	Schéma zapojenia ADC	38
5.20	Predný panel modulu digitálnych vstupov a výstupov	44
5.21	Blokovaná schéma zapojenia modulu digitálnych I/O	44
5.22	Schéma zapojenia IO expandéru	45
5.23	Schéma zapojenia digitálneho vstupu	47
5.24	Prechodová charakteristika digitálneho vstupu	49
5.25	Schéma zapojenia výstupného obvodu	50
5.26	Spôsob zapojenia digitálneho výstupu	51
5.27	Predný panel modulu digitálnych výstupov	52
5.28	Blokovaná schéma zapojenia modulu digitálnych výstupov	53
6.1	Nastavenie Arduino IDE	55
7.1	Nastavenie pripojenia v programe Modbus Poll	59
7.2	Voľba cifier IP adresy BCD prepínačmi	60

7.3	Čítanie a zápis vstupov a výstupov v prostredí Modbus Poll	61
7.4	Nastavenie cievok 29,30 a 31	62
7.5	LED 2, 3 a 4 na cievkach 29, 30 a 31	62
8.1	Použitie Modbus TCP client Add-on inštrukcie	63
8.2	Nastavenie pripojenia k Modbus serveru	63
8.3	Nastavenie cievok signálnych LED	64
8.4	Čítanie hodnoty digitálnych vstupov	64
8.5	Čítanie hodnoty analógových vstupov	64
8.6	Grafické prostredie testovacej aplikácie	65
8.7	Grafické prostredie testovacej aplikácie pri zapnutí digitálnych výstupov	65
F.1	Absolútna chyba merania analógových vstupov	82
F.2	Relatívna chyba merania analógových vstupov	82

Zoznam tabuliek

3.1	Obsah MBAP hlavičky [4]	17
3.2	Definícia kódu funkcie [3]	18
3.3	Prvky dátového modelu [3]	19
4.1	Maximálne hodnoty spínacích kontaktov relé SRD-12VDC-SL-C [5]	22
5.1	Porovnanie ESP32-S3-WROOM-1 a ESP32-WROOM-32E [8, 7]	26
5.2	Výstup BCD prepínača	29
5.3	Prúdový odber komponentov komunikačného modulu [8, 9]. $U_S = 3.3 V$	31
5.4	Parametre regulátoru R-78B3.3-2.0 [10]	31
5.5	Módy nastavenia ADC [11]	38
5.6	Voľba adresových bitov I2C podľa nastavovacích pinov [11]	39
5.7	Adresové bity ADC	39
5.8	Hodnota 7 bitov I2C adresy ADC podľa adresových bitov	39
5.9	Chyba merania napätia analógovým vstupom CH4	41
5.10	Chyba merania prúdu analógovým vstupom CH4	43
5.11	Zahájenie I2C komunikácie	45
5.12	Hodnota adresy I2C na základe zvolených adresových bitov [13]	46
5.13	Hodnota 7 bitov adresy I2C podľa adresových bitov	46
5.14	Prúdová zaťažiteľnosť výstupov IO expandéru [13]	47
5.15	Odporúčané limity napätových úrovní vstupu IO expandéru [13]	48
5.16	Odporúčané limity napätových úrovní digitálneho vstupu modulu	49
5.17	Porovnanie vhodných MOSFET relé [15, 16, 17]	50
5.18	Prúdový odber komponentov digitálneho IO modulu. $U_S = 3.3 V$	52
F.1	Chyba merania napätia modulu analógových vstupov	83

Úvod

Táto práca sa zaujíma o návrh a následnú realizáciu vstupno-výstupných periférií pre Modbus TCP server. Cieľom je vytvorenie zariadenia, ktoré dokáže pomocou Modbus TCP komunikovať s PLC, rady Logix, od spoločnosti Allen-Bradley. Súčasťou práce je vytvorenie firmvéru a testovacej aplikácie pre PLC.

Na FEKT VUT v Brne ÚAMT boli vytvorené modely pre laboratórnu úlohu riadenia križovatiek v predmete BPC-PGA. Tieto modely disponujú väčším množstvom binárnych vstupov a výstupov. Pre riadenie modelu je použité PLC Allen-Bradley rady Logix, ktoré disponuje nedostatočným počtom binárnych vstupov a výstupov. Preto vznikla potreba vyvinúť zariadenie s dostatočným počtom vstupov a výstupov s možnosťou pripojenia a komunikácie s PLC.

Ako najvhodnejší protokol pre komunikáciu s PLC sa javí protokol Modbus TCP. Preto bude v ďalších častiach textu toto zariadenie označované ako Modbus TCP server.

V minulosti bola už téma Modbus TCP serveru viackrát riešená na ÚAMT v rámci niekoľkých bakalárskych prác (napr. bakalárska práca MODBUS/TCP SERVER pána Oskara Kaufmana). Žiadne riešenie však úplne nevyhovelo požiadavkám kladeným na riadenie modelu križovatky.

V rámci tejto bakalárskej práce boli analyzované nedostatky predchádzajúcich návrhov. Z výsledku týchto analýz vyplynula potreba kompletne nového návrhu zariadenia.

Nový dizajn nahradil už výbehový model mikrokotroléru ESP32 za model z aktuálnej ponuky. Zariadenie Modus TCP server je riešené ako modulárne. Skladá sa z komunikačného modulu, ktorý sprostredkováva komunikáciu medzi Modbus TCP klientom a vstupne-výstupnými modulmi. Tie umožňujú kombináciu a počet vstupov a výstupov špecificky prispôbenú aplikácii. Modulárny dizajn poskytuje priestor pre možné rozšírenie digitálnych výstupov na maximálny počet 64.

1 Systémy Logix

Systémy Logix sú vyvíjané spoločnosťou Allen-Bradley, ktorá patrí ku sérii spoločností vlastnených spoločnosťou Rockwell Automation. Jej zámerom je poskytovanie prvkov pre automatizáciu a integrovaných riadiacich systémov.

Systémy Logix sú tvorené radami systémov podľa spôsobu použitia. Nepozostávajú výlučne z programovateľných automatov.

- **ControlLogix:** Poskytuje diskretnú, pohonovú, pohybovú a procesnú jednotku spolu s komunikačným a moderným vstupno-výstupným rozhraním. Jedná sa o modulárny systém vhodný pre použitie väčšieho rozsahu I/O a ostatných periférií.
- **ControlLogix-XT:** Fungujú rovnako ako tradičné systémy ControlLogix, ale s rozšíreným teplotným rozsahom. Zahŕňajú komponenty riadiaceho a komunikačného systému s úpravou, ktorá zvyšuje životnosť v náročných a korozívnych prostrediach.
- **CompactLogix:** Kompaktný systém podobný ControlLogix. Vhodnejší pre menej náročné aplikácie.
- **GuardLogix:** Vychádza zo systému ControlLogix, avšak poskytuje aj bezpečnostnú kontrolu.
- a ďalšie ako **DriveLogix**, **SoftLogix**, ...



Obr. 1.1: Ukážka systémov ControlLogix 5800 a GuardLogix5800 [2]

Pre programovanie PLC, konfiguráciu IO modulov, správu siete a ďalšie funkcie

u systémov Logix sa využíva softvérové prostredie **Studio 5000**.

1.1 Komunikačné rozhrania

Systémy Logix poskytujú širokú škálu komunikačných protokolov vhodných pre priemyselné použitie.

- **Ethernet/IP:** Je sieťový, rýchly a flexibilný protokol pracujúci na aplikačnej vrstve, ktorý využíva protokol štandardného ethernetu.
- **DeviceNet:** Je otvorená priemyselná sieť, ktorá využíva protokol Common Industrial Protocol (CIP) na riadenie, konfiguráciu a komunikáciu v priemyselných zariadeniach. Tento protokol je aplikovaný na úrovni zariadení. Je postavený nad sieťou Controller Area Network (CAN) a umožňuje pripájanie jednoduchých zariadení na úrovni stroja k vyšším zariadeniam, ako sú PLC.
- **ControlNet:** Ponúka vysoké rýchlosti prenosu dát, spoľahlivú topológiu, a je optimalizovaná pre použitie v náročných priemyselných prostrediach. Je vhodný pre komplexnejšie požiadavky na dáta využívané v redundantných médiách a procesných aplikáciách. Používa sa tam, kde je potrebný vyšší objem údajov pre zariadenia ako robotika. Sieť je navrhnutá s dôrazom na nízke oneskorenie.
- **DH+:** Je komunikačný protokol a sieťová architektúra vyvinutá spoločnosťou Allen-Bradley pre použitie v priemyselných automatizačných systémoch.
- **DH485:** Je verzia komunikačného protokolu DH prispôbená pre fungovanie na štandarde RS485.
- **Profibus:** Je sériový komunikačný protokol a otvorený štandard pre priemyslové komunikačné siete. Bol vyvinutý pre pripojenie a komunikáciu medzi automatizačnými zariadeniami, senzormi a aktuátormi v priemyslových aplikáciách.
- **Modbus:** Je jednoduchý a ľahko implementovateľný komunikačný protokol. Podľa implementácie rozlišujeme na:
 - **Modbus RTU:** typ určený pre sériovú komunikáciu cez RS-485, RS-422 alebo RS-232 s rýchlosťou až 10 Mb/s na kratších vzdialenostiach.
 - **Modbus TCP:** je priemyselný ethernetový protokol používajúci TCP/IP.

Modbus TCP je podrobnejšie popísaný v kapitole 3.

2 Požiadavky na systém

Od výsledného zariadenia sa vyžaduje komunikácia s PLC prostredníctvom rozhrania Modbus TCP. To je sprostredkované sieťou ethernet s prenosovou rýchlosťou 100 Mb/s. IP adresa zariadenia je statická. Jej 3 posledné cifry je možné nastaviť fyzickými prepínačmi.

Zariadenie bude obsahovať 4 galvanicky oddelené digitálne vstupy. Logická úroveň vstupov bude, v priemysle štandardných, 24 V.

Na zariadení budú prítomné 4, galvanicky oddelené, analógové vstupy schopné merania jednosmerného napätia v rozsahu 0 - 10 V a jednosmerného prúdu 4 - 20 mA. Vyžadovaná perióda vzorkovania je 1 s.

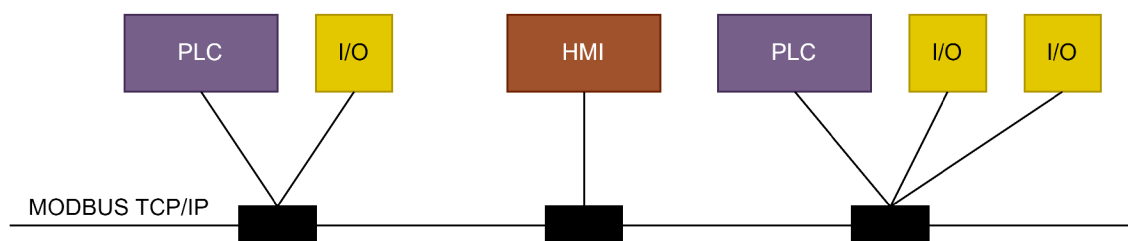
Od zariadenia bude ďalej vyžadovaný minimálny počet 24 galvanicky oddelených digitálnych výstupov schopných spínať rezistívnu záťaž pri jednosmernom napätí 24 V a prúde aspoň 1 A. V rámci návrhu je vhodné zohľadniť možnosť navýšenia počtu digitálnych výstupov v prípade potreby aplikácie.

Pre použitie v priemysle bude napájacie napätie stanovené na 24 V s dovolenou odchýlkou $\pm 10\%$.

Rozmery zariadenia sú limitované maximálnym rozmerom DPS 77x88 mm. Výška nie je limitovaná.

3 Komunikačné rozhranie MODBUS/TCP

MODBUS zabezpečuje Client/Server komunikáciu medzi zariadeniami pripojenými do siete Ethernet TCP/IP.

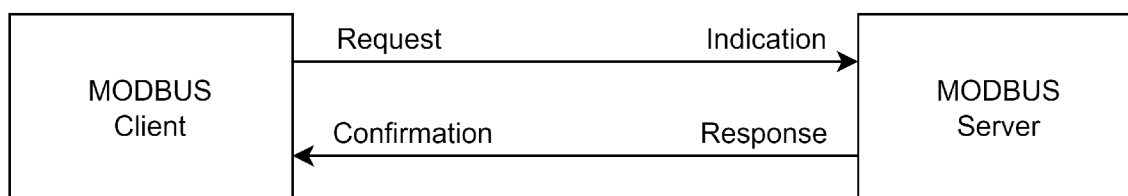


Obr. 3.1: Príklad zapojenia zariadení v MODBUS TCP/IP sieti [3]

3.1 Client/Server model

Pre komunikáciu sa používajú štyri typy správ [4]:

- **Request** - Žiadosť
- **Indication** - Indikácia
- **Response** - Odpoveď
- **Confirmation** - Potvrdenie



Obr. 3.2: Client/Server model komunikácie MODBUS [4]

Žiadosť: správa, ktorú klient odosiela cez sieť na spustenie transakcie

Indikácia: správa o prijatí požiadavky na strane servera

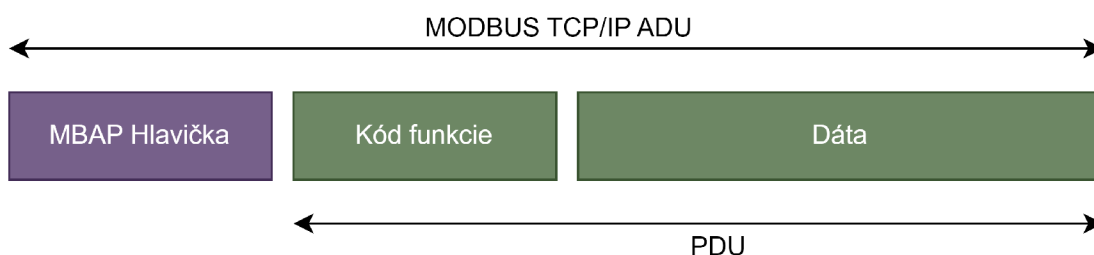
Odpoveď: odpoveď odoslaná serverom

Potvrdenie: správa potvrdenia prijatia odpovede na strane klienta

3.2 Štruktúra správy

Modbus definuje aplikačnú dátovú jednotku (ADU) zloženú z MBAP (MODBUS Application Protocol) hlavičky a PDU (Protocol Data Unit), ktorá je nezávislá na

type komunikačnej vrstvy.



Obr. 3.3: MODBUS Žiadosť/Odpoveď cez TCP/IP [4]

3.2.1 MBAP Hlavička

Hlavička je 7 bytov dlhá a obsahuje nasledovné polia:

Tab. 3.1: Obsah MBAP hlavičky [4]

Fields	Length	Description -	Client	Server
Transaction Identifier	2 Bytes	Identification of a MODBUS Request/Response transaction	Initialized by the client	Recopied by the server from the received request
Protocol Identifier	2 Bytes	0 = MODBUS protocol	Initialized by the client	Recopied by the server from the received request
Length	2 Bytes	Number of following bytes	Initialized by the client	Initialized by the server (Response)
Unit Identifier	1 Byte	Identification of a remote slave connected on a serial line or on other buses	Initialized by the client	Recopied by the server from the received request

Transaction Identifier - Identifikátor transakcie: Používa sa na párovanie transakcií, kde MODBUS server skopíruje identifikátor transakcie z požiadavky do odpovede.

Protocol Identifier - Identifikátor protokolu: Používa sa na multiplexovanie v rámci systému. Protokol MODBUS je identifikovaný hodnotou 0.

Length - Dĺžka: Pole dĺžky obsahuje počet bytov nasledujúcich polí, vrátane identifikátora jednotky a dátových polí.

Unit Identifier - Identifikátor jednotky: Toto pole sa používa na účely routovania v rámci systému. Typicky sa používa na komunikáciu so slave zariadením na MODBUS+ alebo sériovej linke MODBUS cez bránu medzi Ethernet TCP-IP sieťou a sériovou linkou MODBUS. Toto pole je nastavené MODBUS klientom v žiadosti a server musí odpovedať s rovnakou hodnotou v odpovedi.

3.2.2 Kód funkcie

Značí akciu, ktorá sa má vykonať. Môže byť "Public - verejný" alebo užívateľom definovaný. Pre potreby práce sa zameriame na verejne používané kódy funkcie. Akcie definované kódom funkcie sú rozpísané v tabuľke 3.2.

Tab. 3.2: Definícia kódu funkcie [3]

				Function Codes		
				code	Sub code	(hex)
Data Access	Bit access	Physical Discrete Inputs	Read Discrete Inputs	02		02
		Internal Bits Or Physical coils	Read Coils	01		01
			Write Single Coil	05		05
			Write Multiple Coils	15		0F
	16 bits access	Physical Input Registers	Read Input Register	04		04
			Read Holding Registers	03		03
		Internal Registers Or Physical Output Registers	Write Single Register	06		06
			Write Multiple Registers	16		10
			Read/Write Multiple Registers	23		17
			Mask Write Register	22		16
			Read FIFO queue	24		18
	File record access	Read File record		20	6	14
		Write File record		21	6	15
	Diagnostics	Read Exception status		07		07
		Diagnostic		08	00-18,20	08
Get Com event counter		11		0B		
Get Com Event Log		12		0C		
Report Slave ID		17		11		
Read device Identification		43	14	2B		
Other	Encapsulated Interface Transport		43	13,14	2B	

3.2.3 Dáta

MODBUS zakladá dátový model na sérii tabuliek s rozdielnymi charakteristikami. Rozlišujeme štyri základné typy:

Tab. 3.3: Prvky dátového modelu [3]

Primary tables	Object type	Type of	Comments
Discretes Input	Single bit	Read-Only	This type of data can be provided by an I/O system.
Coils	Single bit	Read-Write	This type of data can be alterable by an application program.
Input Registers	16-bit word	Read-Only	This type of data can be provided by an I/O system
Holding Registers	16-bit word	Read-Write	This type of data can be alterable by an application program.

Všetky dáta používané pri MODBUS komunikácii (bity, registre) sú uložené v aplikačnej pamäti zariadenia.

3.3 Priebeh komunikácie

TCP port 502 serveru prijíma požiadavky na nové pripojenia. Klient pri nadväzovaní komunikácie vyberie nepriviligovaný port a naviaže spojenie so serverom počúvajúcim na porte 502. Lokálny port musí byť odlišný pre každé klientské pripojenie.

MODBUS požiadavka musí byť odoslaná cez, už nadviazané, TCP pripojenie. V prípade viacerých otvorených TCP pripojení s rovnakým vzdialeným zariadením sa musí vybrať jedno pripojenie na odoslanie MODBUS správy.

Formulácia správy požiadavky je formulovaná podľa obrázku 3.3. Server odpovedá správou s obdobnou MBAP hlavičkou nasledovanou kódom funkcie a vyžiadanými dátami.

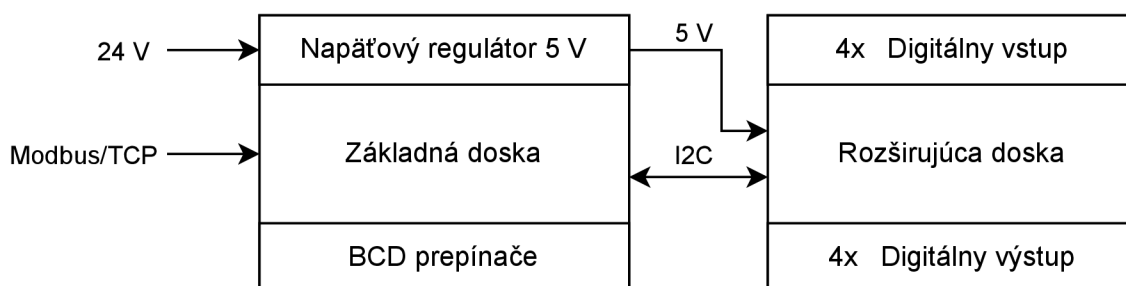
Pre ukončenie Modbus TCP komunikácie uzatvára klient spojenie.

4 Pôvodný prototyp MODBUS TCP serveru

Pôvodný prototyp MODBUS TCP serveru vypracoval Oskar Kaufman v jeho bakalárskej práci [1]. Modbus TCP server je zariadenie prijímajúce požiadavky klienta pre zdieľanie dát digitálnych vstupov a výstupov.

Navrhnuté zariadenie sa skladá z dvoch DPS:

- **Základná doska:** Sprostredkováva komunikáciu a spracovanie dát.
- **Rozširujúca doska:** Obsluhuje digitálne vstupy a výstupy



Obr. 4.1: Bloková schéma prototypu Modbus/TCP serveru

Ako je vidno na obrázku 4.1, zariadenie je napájané jednosmerným napätím 24 V. To je pomocou napätového regulátoru na základnej doske znížené na 5 V a napája obidve dosky.

Základná doska obsahuje 3 BCD prepínače, ktoré umožňujú voľbu posledných 3 cifier statickej IP adresy pre pripojenie ku sieti prostredníctvom rozhrania ethernet.

4.1 Nedostatky pôvodného riešenia

V pôvodnom návrhu boli chybné prepojené paralelne všetky 3 BCD následkom čoho je možné voľiť výhradne jedinou cifru IP adresy. Požadovaná je však voľba všetkých troch cifier IP adresy v rozsahu od 1 - 254.

4.2 Vylepšenie pôvodného návrhu

Pôvodný prototyp necháva priestor pre zlepšenie parametrov a konštrukcie zariadenia.

4.2.1 Vývojové dosky

Aj keď je použitie vývojových dosiek výhodné pri prvotnom návrhu prototypu, pri výslednom produkte môžu predstavovať značné nevýhody.

Jednou z limitácií vývojovej dosky je jej rozmer. Pri rozmere DPS prototypu 77x88mm zaberá vývojová doska OLIMEX ESP32-POE približne 36% jej plochy a značne limituje možnosti umiestnenia ostatných komponentov ako BCD prepínače a komponenty napájania. Vývojová doska môže obsahovať komponenty, ktoré zariadenie nevyužíva a ich prítomnosť len zväčšuje rozmer zariadenia.

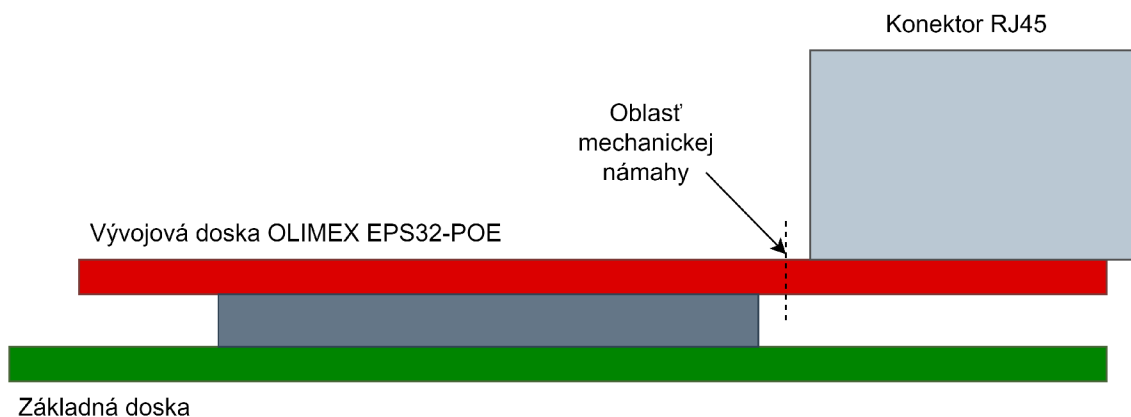
Nevyužitá funkcionálna vývojových dosiek použitých v prototypu je:

- **POE:** Vývojová doska OLIMEX ponúka možnosť napájania cez ethernet napätím aspoň 37 V [6]. Táto funkcia nie je potrebná a nie je využitá.
- **5V regulátor:** Vývojová doska Arduino NANO obsahuje 5V lineárny regulátor. Je však napájaná z externého 5V zdroja.

4.2.2 Mechanická pevnosť konektoru RJ45

Umiestnenie konektoru RJ45 na okraj vývojovej dosky môže spôsobiť, hlavne pri používaní v priemysle a náročnejšími podmienkami pri zachádzaní s ním, že sa DPS vývojovej dosky OLIMEX poškodí. To môže mať za následok poškodenie komponentov na vývojovej doske a prerušenie komunikácie.

Na obrázku č. 4.2 možno vidieť jednoduchý náčrt základnej dosky pohľadu z boku. Fyzická pevnosť montáže konektoru RJ45 sa môže prejaviť ako neadekvátna a vytvorí trhliny DPS v oblasti mechanickej námahy (viď obrázok č. 4.2).



Obr. 4.2: Riziko mechanickej námahy vývojovej dosky OLIMEX

4.2.3 Digitálne výstupy

Digitálne výstupy sú tvorené štvoricou relé. Výhodou takého dizajnu je možnosť použiť výstupy na spínanie striedavého sieťového napätia 230 V. Mechanický princíp spínacích kontaktov však značne limituje ich schopnosť spínať vyššie jednosmerné napätie. Relé použité v prototypu umožňuje spínať signály o maximálnych hodnotách uvedených v tabuľke 4.1.

Tab. 4.1: Maximálne hodnoty spínacích kontaktov relé **SRD-12VDC-SL-C** [5]

Model	SRD-12VDC-SL-C	
Contact Rating	7A	28VDC
Resistive Load	10A	125VAC
($\cos\phi = 1$)	7A	240VAC

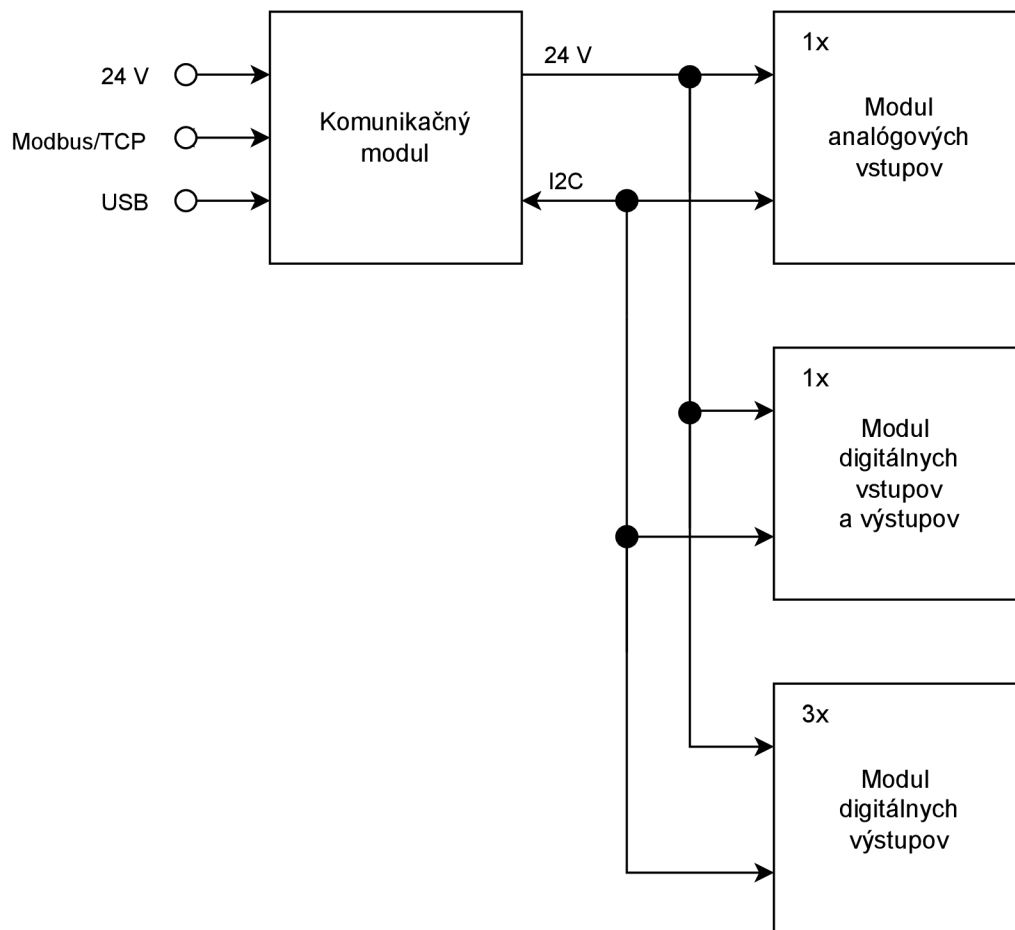
Pokiaľ nie je potreba spínať vyššie striedavé napätie, relé výstupy je vhodnejšie nahradiť výstupmi tranzistorovými.

5 Návrh obvodového riešenia zariadenia

Zariadenie pozostáva z 4 typov modulov:

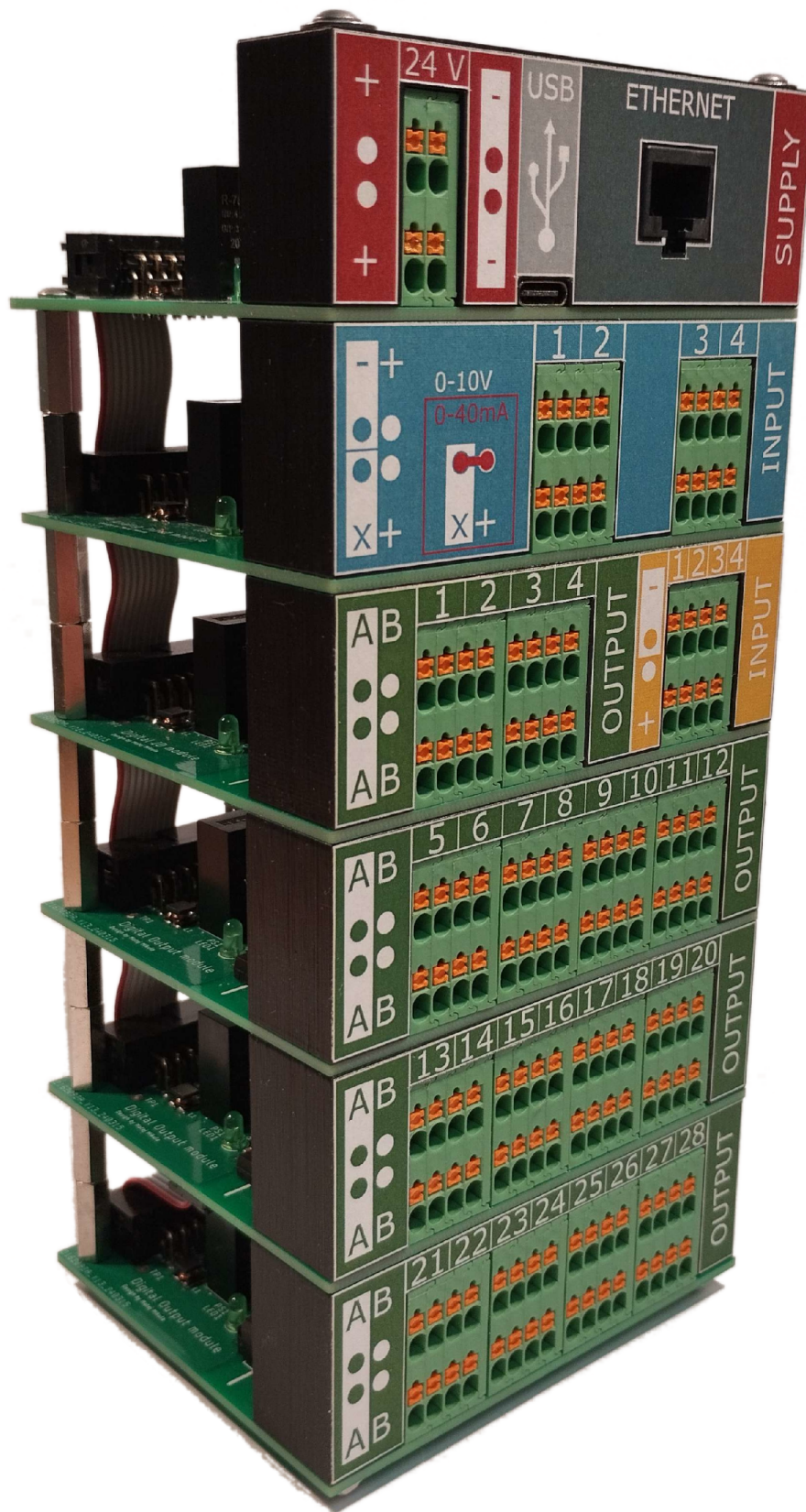
- Komunikačný modul
- Modul analógových vstupov
- Modul digitálnych vstupov a výstupov
- Modul digitálnych výstupov

Tie sú navzájom spojené prepojovacím káblom, cez ktorý zdieľajú 24V napájaciu vetvu a signály SDA a SCL pre zbernicu I2C. Cez zbernicu I2C prebieha komunikácia medzi komunikačným modulom a rozširujúcimi IO modulmi. Získané dáta sú zdieľané cez komunikačný modul rozhraním Modbus TCP. Pri inicializácii sú cez sériovú linku vypísané údaje o pripojení k sieti.



Obr. 5.1: Bloková schéma návrhu Modbus/TCP serveru

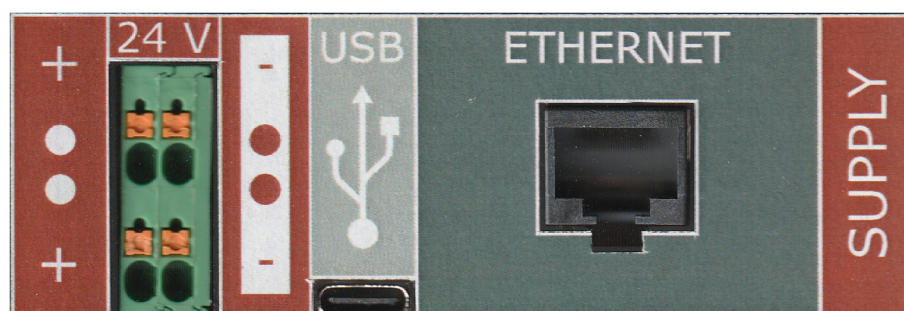
Zariadenie je rozširiteľné na maximálny počet 8 modulov analógových vstupov a 8 digitálnych modulov.



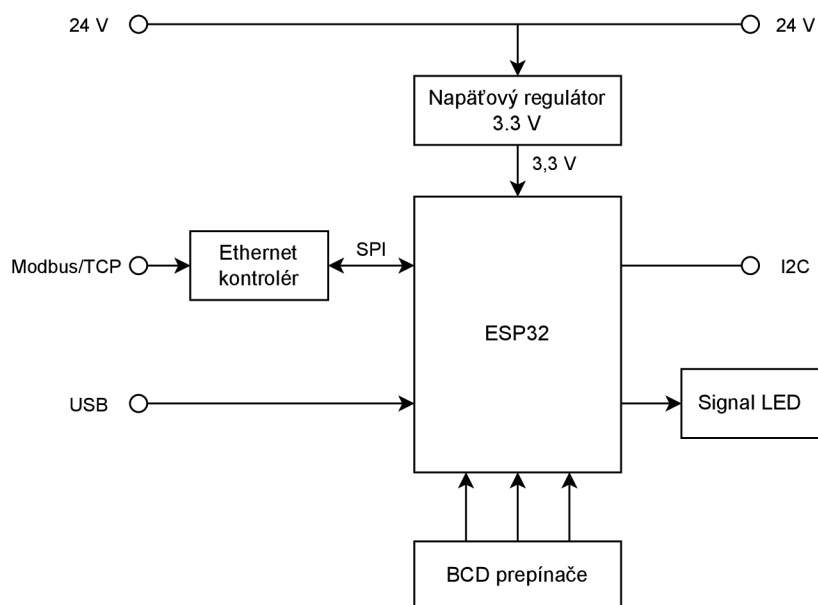
Obr. 5.2: Modbus TCP server (Priloha F)

5.1 Komunikačný modul

Zaistuje komunikáciu s Modbus TCP klientom cez rozhranie ethernet. Cez I2C zbernicu komunikuje s rozširujúcimi modulmi vstupov a výstupov a sprostredkováva údaje vstupov a výstupov podľa požiadaviek klienta. Jeho základné časti možno vidieť na obrázku 5.4 nižšie.



Obr. 5.3: Predný panel komunikačného modulu



Obr. 5.4: Bloková schéma zapojenia komunikačného modulu

Je možné pripojiť väčší počet rozširujúcich modulov. Ich počet je však limitovaný výberom rôznych adries pre I2C zbernicu.

Kompletnú schému zapojenia komunikačnej dosky možno nájsť v prílohe A.

5.1.1 ESP32

ESP32 je sop mikrokontrolér s integrovaným Wifi a Bluetooth. Je vyvíjaný spoločnosťou Espressif.

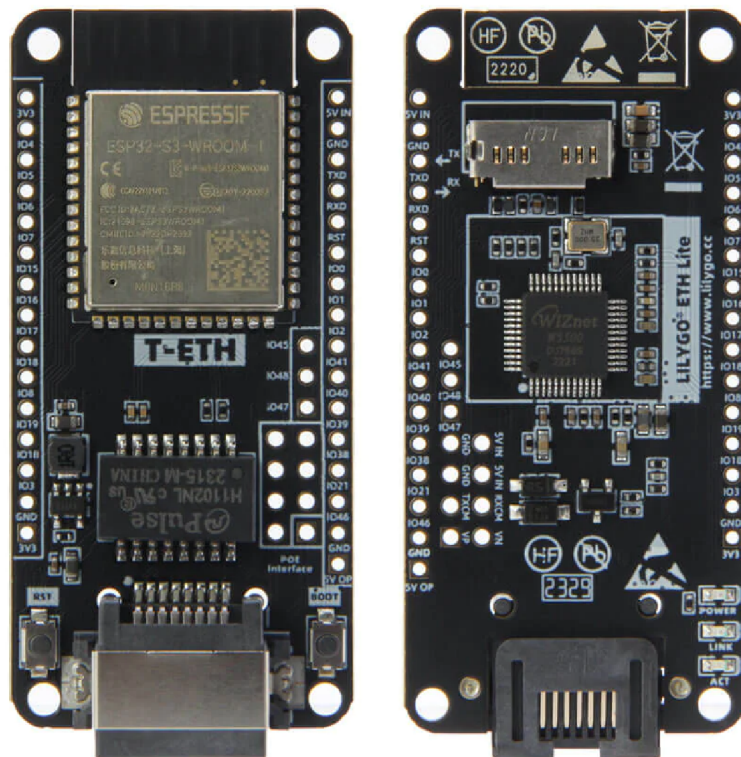
Prevažná väčšina vývojových dosiek s prítomným ethernet rozhraním od spoločností ako Olimex alebo Everything Smart Tech, ktoré ponúkajú vhodné parametre pre použitie v tomto projekte, sú postavené s využitím ESP32-WROOM-32. Tento model je však už podľa datasheetu výrobcu[7] zastaralý a nevhodný pre nové dizajny.

Ako vhodná náhrada je zvolená vývojová doska T-ETH-Lite-ESP32-S3 s modelom ESP32-S3-WROOM-1.

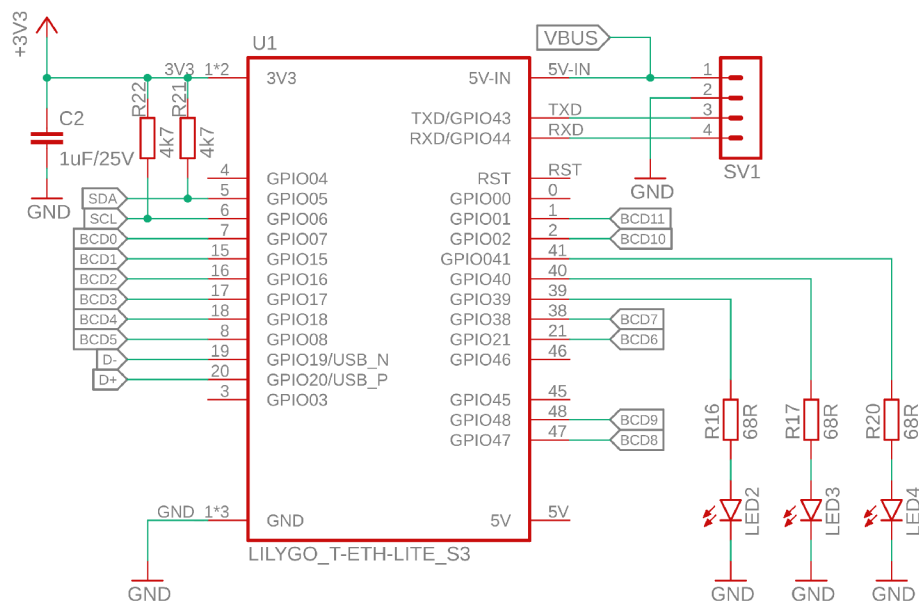
Tab. 5.1: Porovnanie ESP32-S3-WROOM-1 a ESP32-WROOM-32E [8, 7]

Model	ESP32-S3-WROOM-1	ESP32-WROOM-32E
CPU	Xtensa® dual-core 32-bit LX7	Xtensa® dual-core 32-bit LX6
ROM	384 KB	448 KB
SRAM	512 KB	520 KB
RTCSRAM	16 KB	16 KB
Flash	4 MB	4/8/16 MB
GPIO	36	26

Vývojová doska T-ETH-Lite-ESP32-S3 ponúka TCP/IP ethernetový kontrolér W5500 od spoločnosti Wiznet. Ten umožňuje rýchlosť prenosu dát 10 *Mb/s* alebo až 100 *Mb/s*.



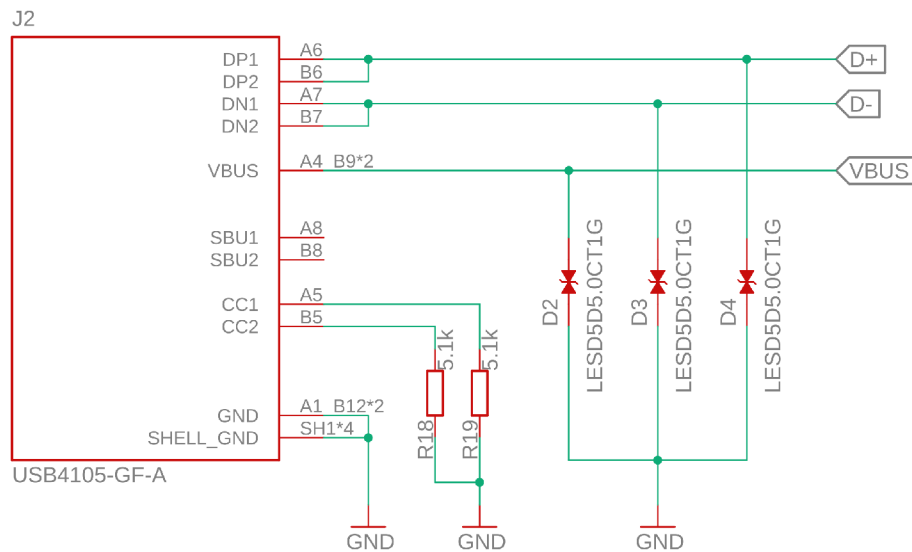
Obr. 5.5: Vývojová doska LILYGO T-ETH-Lite-ESP32-S3



Obr. 5.6: Spôsob zapojenia vývojovej dosky ESP32

5.1.2 USB

ESP32-WROOM-S3 obsahuje integrovaný USB/JTAG kontrolér. To umožňuje pripojenie dátových liniek Data+ a Data- priamo na piny ESP32. Na dosku preto stačí umiestniť samotný konektor USB-C spolu s rezistormi R18 a R19. Je použitý protokol USB 2.0. Pre nastavenie komunikácie cez USB-C slúžia piny CC1 a CC2. Tie určujú postavenie zariadenia ako *Host* alebo *Device*. V tomto prípade je potrebné na piny zapojiť $5.1k\Omega$ pulldown rezistory pre určenie *Device*. Počítač pripojený cez USB bude v postavení *Host*.



Obr. 5.7: Schéma zapojenia USB rozhrania

USB rozhranie bude využívané pre:

- Programovanie mikrokontroléru ESP32
- Pre odosielanie informácie o zvolenej IP adrese, úspešnosti pripojenia k sieti a zoznamu adres pripojených I2C zariadení.

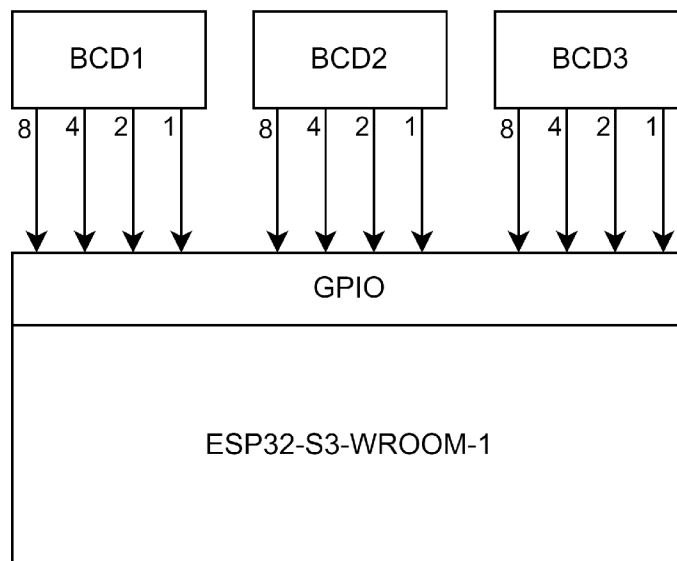
5.1.3 Voľba IP adresy

Posledné 3 cifry IP adresy su nastavované trojicou BCD prepínačov. BCD prepínač je zariadenie, ktoré výberom číslice pripojí na výstupné piny napätie logickej úrovne 1 (viď tabuľka 5.2). Jeho výstupom je 4-bitová hodnota.

Tab. 5.2: Výstup BCD prepínača

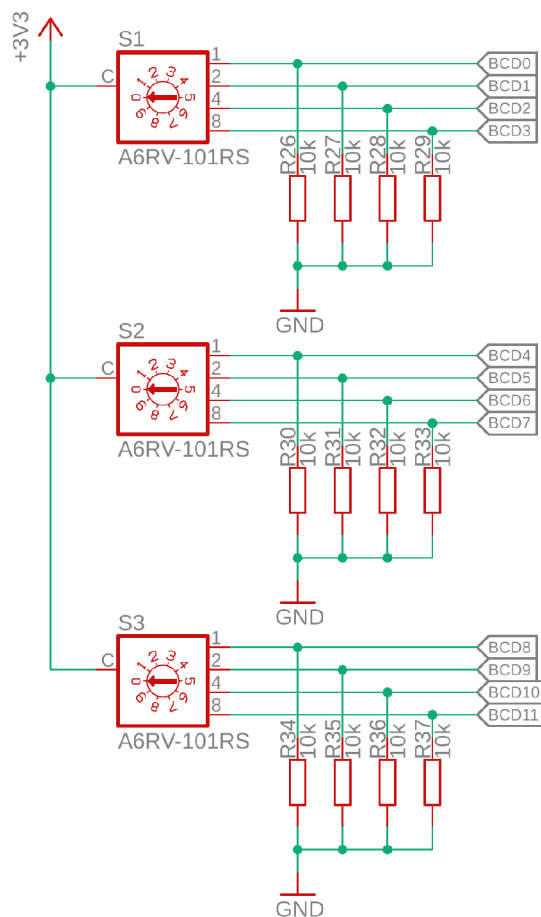
Hodnota	Výstup			
	8	4	2	1
0	-	-	-	-
1	-	-	-	•
2	-	-	•	-
3	-	-	•	•
4	-	•	-	-
5	-	•	-	•
6	-	•	•	-
7	-	•	•	•
8	•	-	-	-
9	•	-	-	•

Použitie modelu ESP32-S3-WROOM-1, ktorý má relatívne vysoký počet GPIO, umožňuje pripojenie jednotlivých výstupov BCD prepínačov priamo na vstupy mikrokontroléru.



Obr. 5.8: Zjednodušená bloková schéma pripojenia BCD prepínačov

Výstupy nepripojené k logickej úrovni 1 zostávajú nepripojené v stave *floating*. Je preto nutné použitie pulldown rezistorov na každý z výstupov (viď obrázok 5.9). Hodnota odporu pulldown rezistoru je zaužívaných $10\text{ k}\Omega$.



Obr. 5.9: Schéma zapojenia BCD prepínačov

5.1.4 Napájanie komunikačného modulu

Zariadenie je napájané jednosmerným napätím 24 V, ktoré je bežne používaným priemyselným štandardom.

Komponenty ako ESP32 a ethernet kontrolér však vyžadujú nižšie napájacie napätie o hodnote 3.3 V. To docielime použitím vhodného napätového regulátoru. Pred výberom vhodného napätového regulátoru vyčíslime predpokladaný maximálny príkon zariadenia (tabuľka 5.3).

Tab. 5.3: Prúdový odber komponentov komunikačného modulu [8, 9]. $U_S = 3.3\text{ V}$

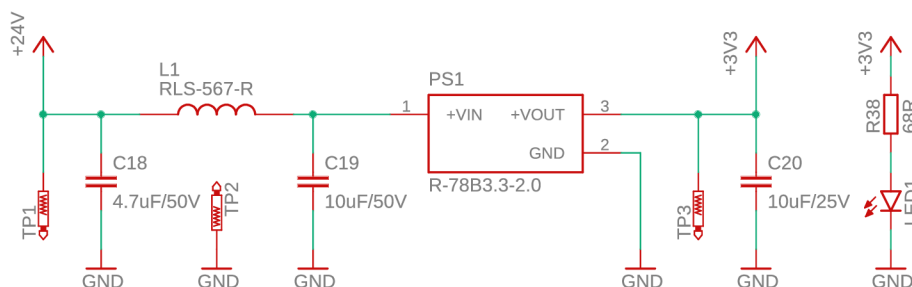
Type	No.	I_{MAX}	P_{MAX}
	-	[mA]	[mW]
ESP32-wroom1-S3	1	355	1172
W5500 Ethernet controller	1	132	436
LED indicator	4	80	264
Total		567	1872

V tabuľke 5.3 vidíme že maximálny prúdový odber zariadenia je relatívne nízky. Rozdiel napájacích napätových úrovní, 24 V a 3.3 V, by však vytvoril na lineárnom regulátore vysoký odpadný výkon, ktorý by vyžadoval prítomnosť chladiča. Je preto zvolený spínaný regulátor RECOM R-78B3.3-2.0. Jeho dizajn je navrhnutý ako vhodná náhrada za lineárne regulátory rady 78xx. Výhodou je širší rozsah vstupného napätia a vysoká účinnosť bez potreby prídavného chladenia.

Tab. 5.4: Parametre regulátoru R-78B3.3-2.0 [10]

Model	Vstupné napätie	Výstupné napätie	Výstupný prúd	Účinnosť
[-]	[VDC]	[VDC]	[A]	[%]
R-78B3.3-2.0	4.75 - 32	3.3	2	86 - 92

Schéma zapojenia vychádza z referenčného zapojenia udávaného výrobcom v dátovom liste [10] ako odporučené zapojenie podľa normy EN55032 pre elektromagnetickú kompatibilitu. Svetelná dióda *LED1* signalizuje prítomnosť napätia na výstupe regulátora a jeho správne fungovanie. Pre overenie úrovne napätia je prítomná sada testovacích bodov *TP1* - *TP3*.

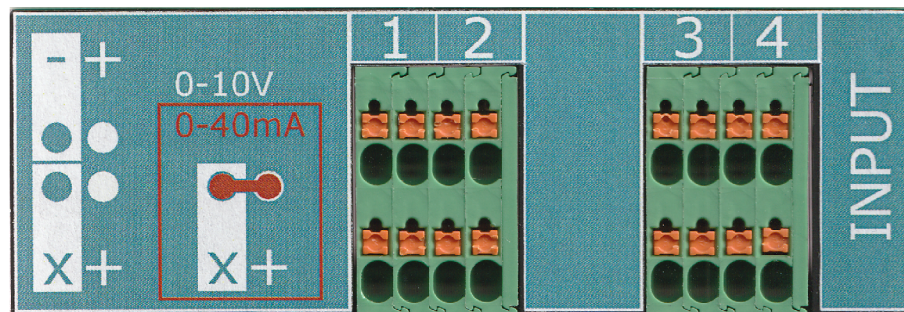


Obr. 5.10: Schéma zapojenia 3,3V napätového regulátoru

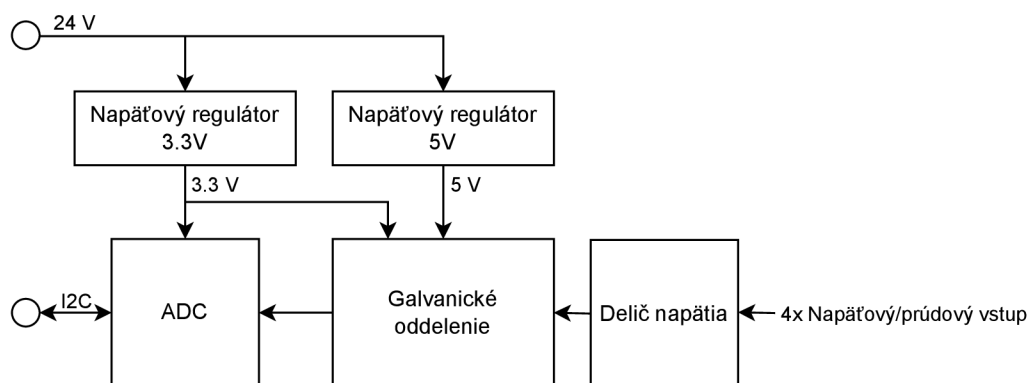
V prípade potreby je možné komunikačný modul napájať pomocou USB-C portu napätím 5 V. Pri nahrávaní firmvéru preto nie je potreba externého napájania.

5.2 Modul analógových vstupov

Rozširuje zariadenie o 4 galvanicky oddelené analógové vstupy. Ponúka možnosť zvolenia napätového vstupu 0 - 10 V alebo prúdového vstupu 0 - 40 mA.



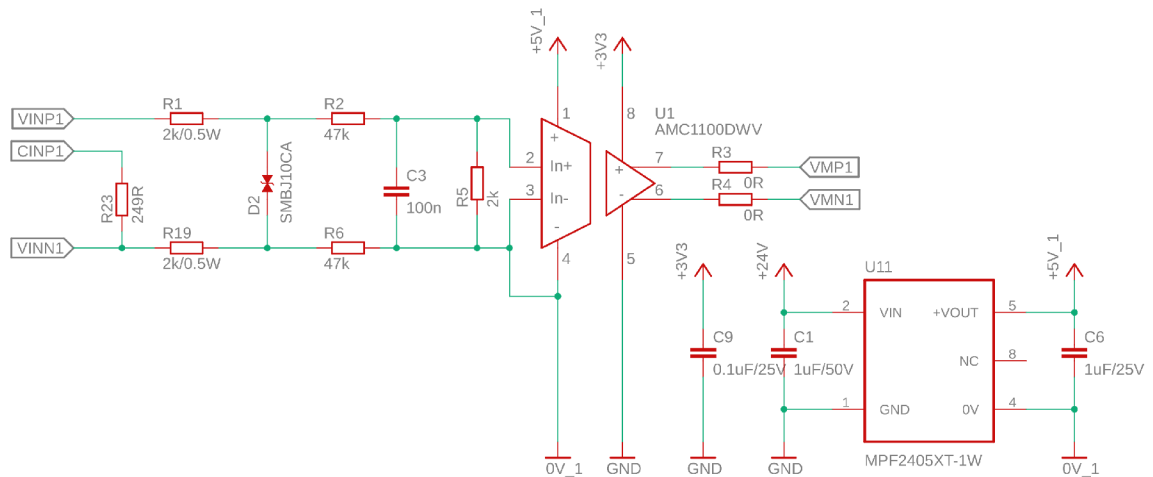
Obr. 5.11: Predný panel modulu analógových vstupov



Obr. 5.12: Bloková schéma zapojenia modulu analógových vstupov

5.2.1 Napätový vstup

Je tvorený odporovým deličom napätia a diferenčným izolačným zosilovačom AMC1100.



Obr. 5.13: Schéma zapojenia analógového vstupu

Pri návrhu je treba dbať na nasledovné maximálne hodnoty:

- $U_{Mmax} = 10\text{ V}$
- $U_{INmax} = 250\text{ mV}$
- $U_{ADCdif} = \pm 2.048\text{ V}$

kde:

- U_{Mmax} : Maximálne vstupné merané napätie
- U_{INmax} : Maximálne vstupné diferenciálne napätie zosilovača AMC1100 [12]
- U_{ADCdif} : Vstupné napätie analógovo-digitálneho prevodníku [11]

Vstupný obvod sa správa ako delič napätia. Je tvorený rezistormi R1, R2, R5, R6 a R19. Je potrebné však počítať aj so vstupným odporom zosilovača. Ten je v tomto prípade $R_{IN} = 28\text{ k}\Omega$.

Zapojenie sa dá zjednodušiť podľa obrázku 5.14. Celkový odpor deliča určíme štandardne $R = 100\text{ k}\Omega$.

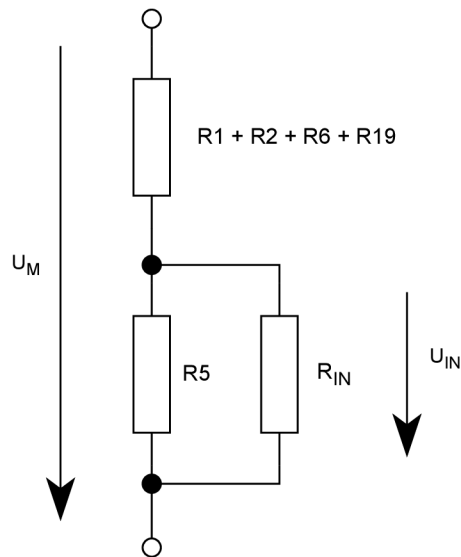
Vychádzame teda zo súčtu:

$$R = R_1 + R_2 + R_5 + R_6 + R_{19} = 100\text{ k}\Omega \quad (5.1)$$

Hodnotu rezistoru R_5 , na ktorom bude úbytok napätia vstupu diferenciálneho zosilovača určíme tak, aby pri vstupnom meranom napätí $U_M = 10\text{ V}$ nepresiahol úbytok napätia U_{IN} hodnotu 250 mV . Kvôli rezerve počítame s úbytkom napätia $U_{IN} = 200\text{ mV}$. Vstupný odpor zosilovača pre jednoduchosť výpočtu zanedbáme. Platí teda:

$$\frac{U_{IN}}{U_M} = \frac{R_5}{R_1 + R_2 + R_5 + R_6 + R_{19}} \quad (5.2)$$

$$R_5 = \frac{U_{IN} \cdot (R_1 + R_2 + R_5 + R_6 + R_{19})}{U_M} = \frac{200 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^3}{10} = 2 \text{ k}\Omega$$



Obr. 5.14: Zjednodušená schéma vstupného deliča napätia

kde:

U_M : Vstupné merané napätie

U_{IN} : Napätie na vstupe zosilovača

R_{IN} : Odpor vstupu zosilovača = 28 k Ω

Zo známych parametrov možno určiť presný deliaci pomer.

Pre paralelné zapojenie rezistorov R_5 a R_{IN} platí:

$$R_{5IN} = \frac{R_5 \cdot R_{IN}}{R_5 + R_{IN}} = \frac{2 \cdot 28}{2 + 28} \cdot 10^3 = 1,8667 \text{ k}\Omega \quad (5.3)$$

Pre deliaci pomer a teda platí:

$$a = \frac{R_{5IN}}{R_{5IN} + R_1 + R_2 + R_6 + R_{19}} \quad (5.4)$$

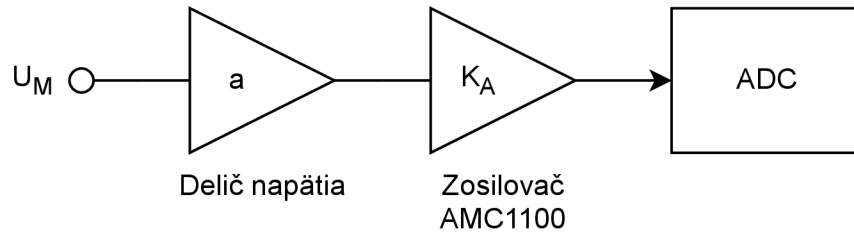
$$a = \frac{1,8667}{1,8667 + 98} = 18,6919 \cdot 10^{-3}$$

Samotný diferenciálny zosilovač AMC1100 ďalej prináša do systému zosilenie $K_A = 8$ (viď obrázok 5.15) [12].

Celkové zosilenie K vypočítame ako súčin:

$$K = a \cdot K_A \quad (5.5)$$

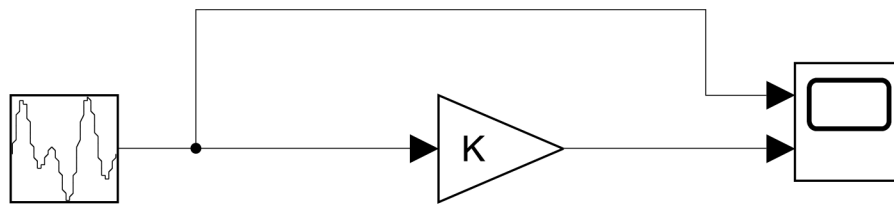
$$K = 18,6919 \cdot 10^{-3} \cdot 8 = 149,54 \cdot 10^{-3}$$



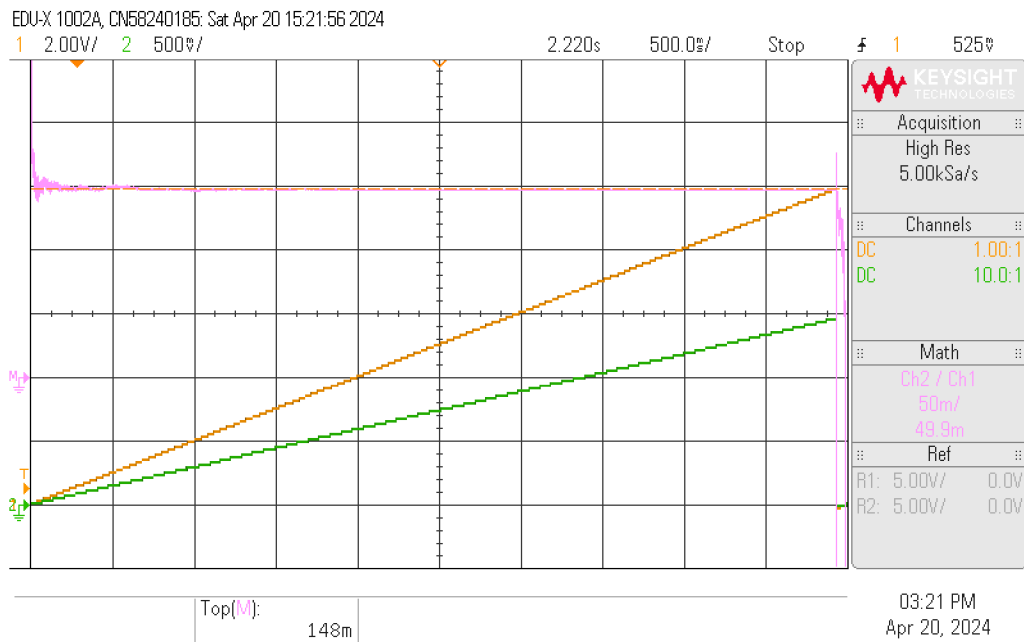
Obr. 5.15: Bloková schéma analógového vstupu

Reálnu hodnotu zosilenia K overíme meraním. Znázornením na obrázku 5.16 pripojíme generátor funkcie k analógovému vstupu. Osciloskopom zaznamenáme hodnoty vstupného a výstupného signálu.

Napätie generátora bude zvýšené od 0 V po 10 V. Osciloskopom pomocou matematickej funkcie zobrazíme zosilenie K ako pomer hodnôt kanálu 2 (výstup) a kanálu 1 (vstup). Ustálenú hodnotu zosilenia odčítame funkciou *Top*.



Obr. 5.16: Bloková schéma merania zosilenia analógového vstupu



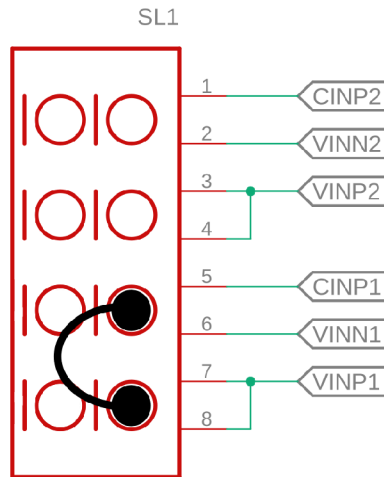
Obr. 5.17: Merané zosilenie analogového vstupu

Meraním bola zistená hodnota $K = 148 \cdot 10^{-3}$ (viď obrázok 5.17). Meranie bolo opakované, pre všetky štyri vstupy analogového modulu, s rovnakým výsledkom. Odchýlka od vypočítanej hodnoty tvorí 1,03%. To je spôsobené toleranciou komponentov obvodu. Pri softvérovom výpočte meraného napätia je vhodnejšie použiť reálne nameranú hodnotu zosilenia.

Diferenciálny výstup zosilovača je privedený na vstupy ADC.

5.2.2 Prúdový vstup

Princíp merania prúdu je založený na meraní úbytku napätia na shunt rezistore pripojeného k napäťovému vstupu. Pre pripojenie shunt rezistoru je potrebné prepojiť 2 svorky, $CINPx$ a $VINPx$, podľa obrázku 5.18. Na samotnom zariadení sa jedná o svorky označené "x" a "+" viď obrázok 5.11.



Obr. 5.18: Prepojenie svoriek pre voľbu prúdového vstupu kanálu 1

Hodnotu odporu shunt rezistoru volíme vyššiu ako sa bežne stretáme napríklad pri ampérmetroch. Zvolením vyššej hodnoty sa zmenší chyba merania spôsobená rušením, ktorá sa v priemysle môže bežne vyskytnúť.

Pri vstupnom prúde $I_{Meas} = 40mA$ vyžadujeme úbytok napätia $U_{Meas} = 10V$. Pre výpočet použijeme Ohmov zákon:

$$R = \frac{U}{I} \quad (5.6)$$

$$R_{SHUNT} = \frac{U_{Meas}}{I_{Meas}} = \frac{10}{0.04} = 250 \Omega \quad (5.7)$$

Volíme najbližšiu menšiu hodnotu z rady E192 $R_{SHUNT} = 249 \Omega$. V obrázku 5.13 sa jedná o rezistor R_{SHUNT} ako R23.

5.2.3 ADC

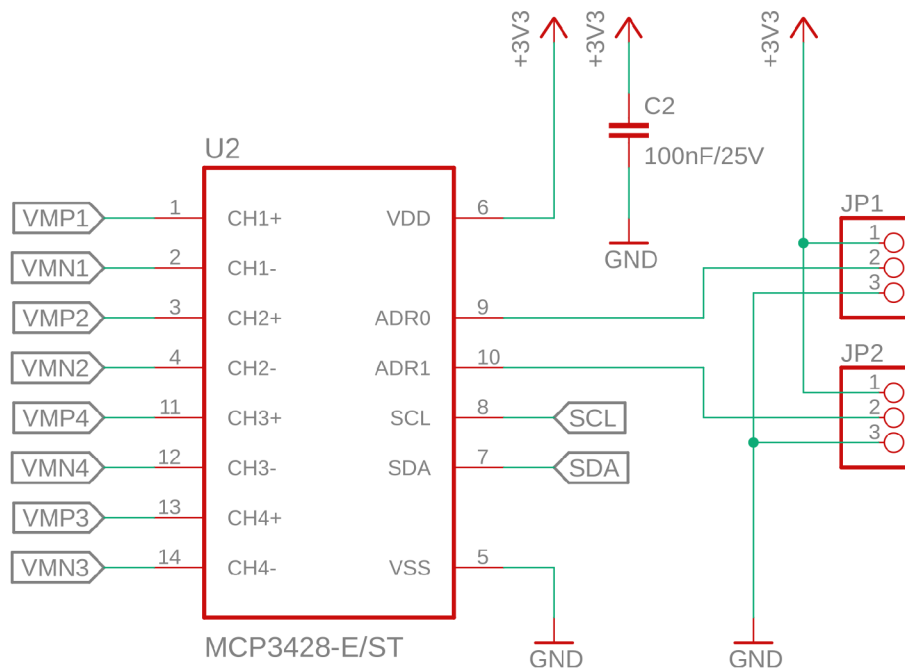
Pre prevod analógového signálu je použitý 16 bit Delta-Sigma ADC MCP3428. Umožňuje nastaviť 3 módy rozlíšenia a to 12,14 alebo 16 bitov (viď tabuľka 5.2.3).

Mód rozlíšenia je zvolený 12 bitový. Pokiaľ vezmeme do úvahy maximálnu odchýlku, ktorú prinesie do systému galvanicky oddelujúci zosilovač AMC1100, tvoriacu 0.5 % pri rozsahu signálu 2 V. A teda odchýlku o hodnote 10 mV. Nie je potrebné voliť väčšie rozlíšenie, keďže by k väčšej presnosti analógového vstupu neprispelo.

Mód rozlíšenia sa nastavuje pomocou rozhrania I2C, cez ktoré taktiež prebieha komunikácia s komunikačnou doskou.

Tab. 5.5: Módy nastavenia ADC [11]

Resolution Setting	Data Rate	Minimum Code	Maximum Code	LSB
12 bit	240 s/s	-2048	2047	1 mV
14 bit	60 s/s	-8192	8191	250 μ V
16 bit	15 s/s	-32768	32767	62.5 μ V



Obr. 5.19: Schéma zapojenia ADC

Voľba I2C adresy ADC

Pomocou výberu JP1 a JP2 (viď obrázok 5.19) je možno nastaviť 8 rôznych adries pre komunikáciu cez I2C. Konkrétnu hodnotu adresových bitov na základe hodnoty nastavovacích pinov je možné odčítať z tabuľky 5.6 nižšie.

Tab. 5.6: Voľba adresových bitov I2C podľa nastavovacích pinov [11]

I ² C Device Address Bits			Logic Status of Address Selection Pins	
A2	A1	A0	Adr0 Pin	Adr1 Pin
0	0	0	0 (Addr_Low)	0 (Addr_Low)
0	0	1	0 (Addr_Low)	Float
0	1	0	0 (Addr_Low)	1 (Addr_High)
1	0	0	1 (Addr_High)	0 (Addr_Low)
1	0	1	1 (Addr_High)	Float
1	1	0	1 (Addr_High)	1 (Addr_High)
0	1	1	Float	0 (Addr_Low)
1	1	1	Float	1 (Addr_High)
0	0	0	Float	Float

Adresové bity tvoria prvú trojicu zo 7 bitov I2C adresy (viď tabuľka 5.7). I2C adresu zariadenia je preto možno nastaviť od hodnoty 0x68 po hodnotu 0x6F (viď tabuľka 5.8).

Tab. 5.7: Adresové bity ADC

BYTE	BIT							
	7 (MSB)	6	5	4	3	2	1	0 (LSB)
I ² C responder address	H	H	L	H	A2	A1	A0	R/ \bar{W}
I/O data bus	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1	P0

Tab. 5.8: Hodnota 7 bitov I2C adresy ADC podľa adresových bitov

Inputs			I ² C BUS slave address	
A2	A1	A0	HEX	DEC
L	L	L	0x68	104
L	L	H	0x69	105
L	H	L	0x6A	106
L	H	H	0x6B	107
H	L	L	0x6C	108
H	L	H	0x6D	109
H	H	L	0x6E	110
H	H	H	0x6F	111

Meranie napätia

Presnosť meraného napätia overíme porovnaním získaných hodnôt s hodnotami meranými multimetrom. Ako napäťový zdroj použijeme generátor funkcie s funkciou *DC*.

Použité prístroje:

Multimeter: Siglent SDM3045X

Generátor funkcie: Siglent SDG1032X

Pre hodnotu zmeny jedného najnižšieho bitu (*LSB*) platí:

$$LSB = \frac{2 \cdot V_{REF}}{2^N} = \frac{2 \cdot 2.048}{2^N} \quad (5.8)$$

kde:

N : Rozlíšenie = 12

V_{REF} : Referenčné napätie = 2.048 V

A teda platí:

$$LSB = \frac{2 \cdot 2.048}{2^{12}} = 1 \text{ mV}$$

Vynásobením meranej hodnoty n s hodnotou *LSB* vypočítame napätie na vstupe kanálu U_{ADC} :

$$U_{ADC} = n \cdot LSB \quad (5.9)$$

Pre získanie hodnoty napätia U_M na analógovom vstupe, vynásobíme hodnotu meraného napätia U_{ADC} inverznou hodnotou zosilnenia K vypočítaného rovnicou 5.5.

$$U_M = n \cdot LSB \cdot K^{-1} \quad (5.10)$$

Pre ďalšie výpočty použijeme premennú U_n pre zmenu napätia na vstupe pri zmene čítanej hodnoty n o 1.

$$U_n = LSB \cdot K^{-1} \quad (5.11)$$

$$U_n = 10^{-3} \cdot 0.148^{-1} = \frac{1}{148} \cong 6.757 \text{ mV}$$

Hodnota napätia U_M je získaná výpočtom:

$$U_M = n \cdot U_n \quad (5.12)$$

Pre výpočet chyby merania napätia meníme napätie U_S v rozsahu od -10 V do 10 V. Hodnota n je odčítavaná pomocou simulačného programu Modbus Poll (kapitola 7).

Pre absolútnu chybu merania platí:

$$\Delta_A = U_S - U_M \quad (5.13)$$

Relatívna chyba merania vychádza zo vzťahu:

$$\Delta_R = \frac{\Delta_A}{U_S} \cdot 100\% \quad (5.14)$$

Tab. 5.9: Chyba merania napätia analógovým vstupom CH4

U_S	n	U_M	Δ_A	Δ_R
[V]	[-]	[V]	[V]	[%]
-9.997	-1479	-9.993	-0.004	0.038
-9.004	-1332	-9.000	-0.004	0.044
-8.011	-1185	-8.007	-0.004	0.053
-7.011	-1037	-7.007	-0.004	0.061
-6.008	-888	-6.000	-0.008	0.133
-5.0098	-740	-5.000	-0.010	0.196
-4.012	-593	-4.007	-0.005	0.131
-3.0045	-444	-3.000	-0.005	0.150
-1.9992	-295	-1.993	-0.006	0.298
-1.0001	-147	-0.993	-0.007	0.686
0.0000	1	0.007	-0.007	-
0.9980	149	1.007	-0.009	-0.877
1.9984	297	2.007	-0.008	-0.418
2.9971	445	3.007	-0.010	-0.322
3.9997	594	4.014	-0.014	-0.345
4.9985	742	5.014	-0.015	-0.300
5.991	888	6.000	-0.009	-0.150
6.992	1037	7.007	-0.015	-0.211
7.984	1183	7.993	-0.009	-0.116
8.98	1331	8.993	-0.013	-0.147
9.983	1479	9.993	-0.010	-0.103

Z tabuľky 5.9 vyčítame maximálnu dosiahnutú relatívnu chybu merania pri meraní napätia $U_S = 0.998$ V, kde relatívna chyba merania $\Delta_R = -0.877\%$. Meranie je opakované pre všetky vstupné kanály. Výsledok merania možno nájsť v prílohe F.

Meranie prúdu

Ako zdroj prúdu je použitý generátor Siglent SDG1032X. Voľbu použitia napätového zdroja s vnútorným odporom 50Ω možno považovať za suboptimálne riešenie. Nepokryje plný rozsah prúdového vstupu $0 - 40 \text{ mA}$ ale iba $0 - 33 \text{ mA}$. Toto riešenie však možno považovať za dostatočné. Hodnota prúdu zdroja I_S je meraná multimetrom Siglent SDM3045X.

Z princípu merania prúdu ako úbytku napätia na shunt rezistore možno k výpočtu využiť Ohmov zákon s výpočtom napätia popísanom v sekcii 5.2.3.

Pre meraný prúd I_M platí:

$$I_M = \frac{U_M}{R_{SHUNT}} \quad (5.15)$$

Hodnota $R_{SHUNT} = 249 \Omega$ vychádza z výpočtu 5.7. Doplnením z rovnice 5.10 dostaneme vzťah:

$$I_M = \frac{n \cdot LSB \cdot K^{-1}}{R_{SHUNT}} \quad (5.16)$$

$$I_M = n \cdot \frac{10^{-3} \cdot 0.148^{-1}}{249}$$

Pre zjednodušenie prevodu zavedieme premennú I_n , pre ktorú platí:

$$I_n = \frac{LSB \cdot K^{-1}}{R_{SHUNT}} \quad (5.17)$$

$$I_n = \frac{10^{-3} \cdot 0.148^{-1}}{249} = \frac{1}{36852} \cong 27.1356 \mu A$$

Hodnotu prúdu vypočítame z hodnoty n vzťahom:

$$I_M = n \cdot I_n \quad (5.18)$$

Zmenou vstupného prúdu od -33 mA do 33 mA sú za použitia programu Modbus Poll odčítané nasledovné hodnoty prúdu I_M .

Tab. 5.10: Chyba merania prúdu analógovým vstupom CH4

I_S	n	I_M	Δ_A	Δ_R
[mA]	[-]	[mA]	[mA]	[%]
-33.086	-1217	-33.024	-0.062	0.187
-30.043	-1104	-29.958	-0.085	0.284
-25.001	-919	-24.938	-0.063	0.254
-19.989	-734	-19.918	-0.071	0.358
-14.991	-550	-14.925	-0.066	0.443
-10.007	-367	-9.959	-0.048	0.482
-5.0067	-183	-4.966	-0.041	0.817
0.0000	1	0.027	-0.027	-
5.0077	186	5.047	-0.040	-0.789
10.034	371	10.067	-0.033	-0.332
15.005	554	15.033	-0.028	-0.187
20.027	739	20.053	-0.026	-0.131
24.999	921	24.992	0.007	0.029
30.019	1106	30.012	0.007	0.024
33.08	1219	33.078	0.002	0.005

Pre absolútnu chybu merania platí:

$$\Delta_A = I_S - I_M$$

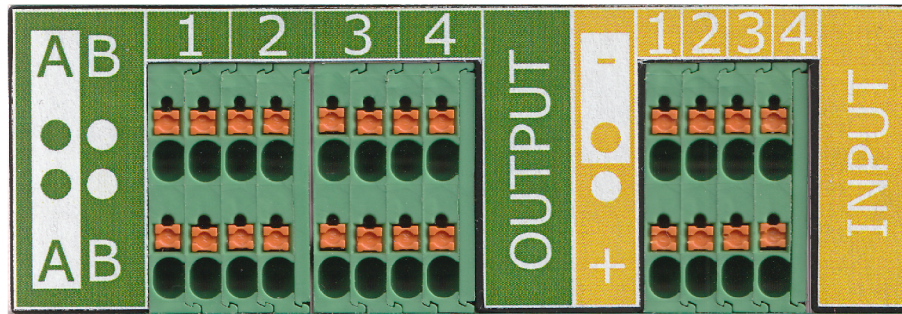
Relatívna chyba merania vychádza zo vzťahu:

$$\Delta_R = \frac{\Delta_A}{I_S} \cdot 100\%$$

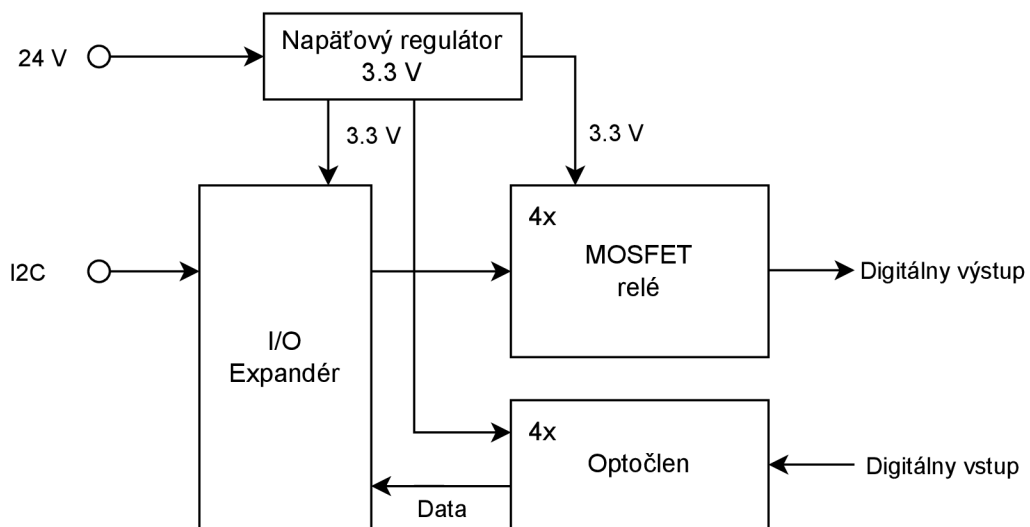
Z tabuľky 5.10 vyčítame maximálnu dosiahnutú relatívnu chybu merania pri meraní prúdu $I_S = -5.0067 \text{ mA}$, kde relatívna chyba merania $\Delta_R = 0.817\%$.

5.3 Modul digitálnych vstupov a výstupov

Rozširuje zariadenie o 4 digitálne, galvanicky oddelené vstupy a 4 digitálne, galvanicky oddelené, tranzistorové spínacie kontakty.



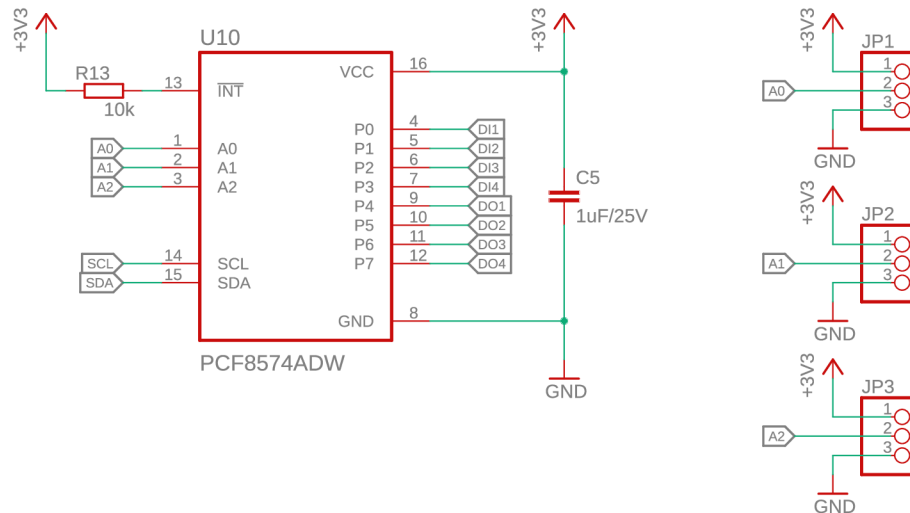
Obr. 5.20: Predný panel modulu digitálnych vstupov a výstupov



Obr. 5.21: Bloková schéma zapojenia modulu digitálnych I/O

5.4 IO expandér

Prevod medzi I2C zbernicou a digitálnymi vstupmi a výstupmi zabezpečuje 8-bitový IO expandér PCF8574ADW. Výhodou je jednoduchosť zapojenia a použitia (viď obrázok 5.22). Kompletná schéma zapojenia je priložená v prílohe A.



Obr. 5.22: Schéma zapojenia IO expandéru

5.4.1 Voľba I2C adresy IO expandéru

Pomocou troch prepojovacích konektorov JP1, JP2 a JP3 (viď obrázok 5.22) je možno nastaviť 8 rôznych I2C adries. Nastavené logické úrovne korešpondujú s hodnotou prvých troch bitov I2C adresy (viď obrázok 5.11).

- JP1: A0
- JP2: A1
- JP3: A2

Pri komunikácii s IO expandérom je potrebné si uvedomiť, že údaje o adresách v dátovom liste sú udávané ako 8-bitové číslo vrátane read/write bitu (viď tabuľka 5.12). Samotnú adresu tvorí horných 7 bitov. Pri adresovaní preto treba použiť údaje z tabuľky 5.13.

Tab. 5.11: Zahájenie I2C komunikácie

BYTE	BIT							0 (LSB)
	7 (MSB)	6	5	4	3	2	1	
I ² C responder address	L	H	H	H	A2	A1	A0	R/ \bar{W}
I/O data bus	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1	P0

Tab. 5.12: Hodnota adresy I2C na základe zvolených adresových bitov [13]

INPUTS			I ² C BUS responder 8-BIT READ ADDRESS	I ² C BUS responder 8-BIT WRITE ADDRESS
A2	A1	A0		
L	L	L	113 (dec), 71 (hex)	112 (dec), 70 (hex)
L	L	H	115 (dec), 73 (hex)	114 (dec), 72 (hex)
L	H	L	117 (dec), 75 (hex)	116 (dec), 74 (hex)
L	H	H	119 (dec), 77 (hex)	118 (dec), 76 (hex)
H	L	L	121 (dec), 79 (hex)	120 (dec), 78 (hex)
H	L	H	123 (dec), 7B (hex)	122 (dec), 7A (hex)
H	H	L	125 (dec), 7D (hex)	124 (dec), 7C (hex)
H	H	H	127 (dec), 7F (hex)	126 (dec), 7E (hex)

Tab. 5.13: Hodnota 7 bitov adresy I2C podľa adresových bitov

Inputs			I ² C BUS slave address	
A2	A1	A0	HEX	DEC
L	L	L	0x38	56
L	L	H	0x39	57
L	H	L	0x3A	58
L	H	H	0x3B	59
H	L	L	0x3C	60
H	L	H	0x3D	61
H	H	L	0x3E	62
H	H	H	0x3F	63

5.4.2 Charakteristika výstupov expandéru

Pri návrhu je potrebné dbať na maximálne prúdové zaťaženie výstupov IO expandéru. Z údajov v tabuľke 5.14 určíme, že spôsob zapojenia digitálnych výstupov IO expandéru je vhodnejší pre režim typu *sinking* keďže je prúdová kapacita v úrovni logickej 0 niekoľko násobne vyššia.

Tab. 5.14: Prúdová zatažiteľnosť výstupov IO expandéru [13]

		MAX	Unit
I_{OL}	výstupný prúd úrovne log. 0	50	mA
I_{OH}	výstupný prúd úrovne log. 1	-4	mA

5.5 Digitálne vstupy

Pre splnenie požiadavky galvanického oddelenia je použitý optočlen. Izolačné napätie optočlenu TLP2362 je 3750 Vrms.

Signál vstupu je privedený na dve svorky:

- **DIxP**: Pozitívna svorka digitálneho vstupu x
- **DIxN**: Negatívna svorka digitálneho vstupu x

Logická úroveň je závislá na veľkosti rozdielu napätí na týchto 2 svorkách.

Pre vstupné napätie U_{IN} platí:

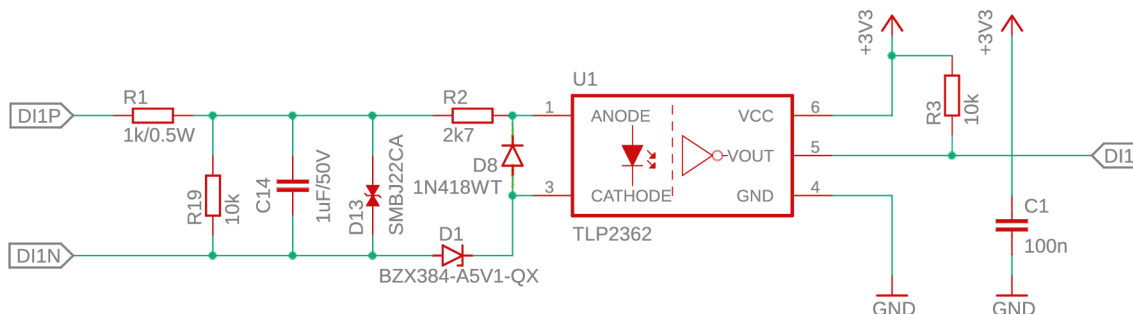
$$U_{IN} = U_P - U_N \quad (5.19)$$

kde:

U_P : napätie na svorke DIxP

U_N : napätie na svorke DIxN

Vstup je chránený 22V TVS diódou SMBJ22CA ($D1$ v obrázku 5.23). Tá zabezpečuje potlačenie napätí väčších ako 24 V [14]. Zenerova dioda $D1$ posúva hodnotu vstupného napätia potrebného pre zmenu logickej úrovne o 5.1 V.



Obr. 5.23: Schéma zapojenia digitálneho vstupu

Hodnota rezistoru R2 vychádza z nasledovného výpočtu:

$$R_2 = \frac{U_T - U_Z - U_F}{I_F} \quad (5.20)$$

$$R_2 = \frac{24 - 5.1 - 1.55}{6.5 \cdot 10^{-3}} = 2669 \Omega$$

kde:

U_F : Napätie na vstupe optočlenu

U_Z : Napätie na zenerovej dióde

U_T : Napätie na TVS dióde

I_F : Prúd vstupu optočlenu

Volíme rezistor o hodnote $R_2 = 2.7 k\Omega$ z rady E12.

Rezistor R1 tvorí spolu s kondenzátorom C14 filter typu dolná priepusť so šírkou pásma približne 160 Hz.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.21)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 10^{-3}} = 159.2 Hz$$

Výstup optočlenu je typu *sinking*. Je preto použitý pullup rezistor o štandardnej hodnote 10 kΩ.

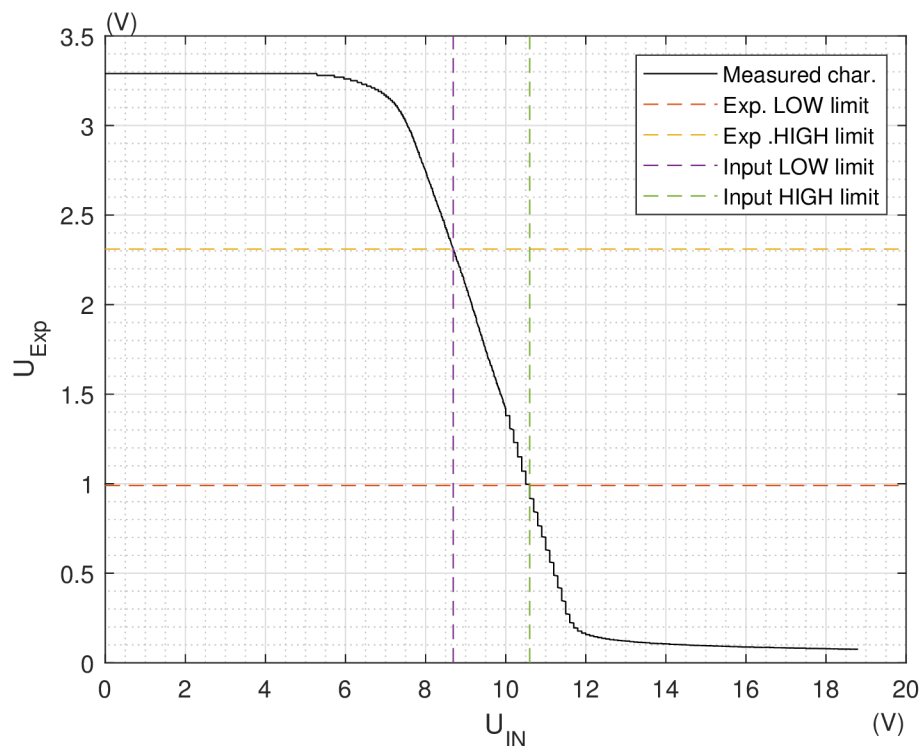
Závislosť čítanej úrovne digitálneho vstupu od vstupného napätia určíme pripojením generátora s funkciou *sweep* na digitálny vstup. Osciloskopom zaznamenáme hodnoty napätia na digitálnom vstupe a na vstupe IO expandéru.

Keďže generátor funkcie Siglent SDG1032X neumožňuje napätový výstup väčší ako 10 V, meranie je prevedené v 2 fázach. Prvá na rozsahu 0 - 10 V. Druhá so sériovým pripojením 9V napätového zdroja na rozsahu 10 - 19 V.

Do zmeranej charakteristiky závislosti vstupného napätia digitálneho vstupu IO expandéru U_{Exp} od vstupného napätia digitálneho vstupu modulu U_{IN} v obrázku 5.24 zakreslíme odporúčané limity napätových úrovní pre hodnoty LOW a HIGH z tabuľky 5.15.

Tab. 5.15: Odporúčané limity napätových úrovní vstupu IO expandéru [13]

	MIN	MAX	UNIT
High-level input voltage	2.31	3.8	V
Low-level input voltage	-0.5	0.99	V



Obr. 5.24: Prechodová charakteristika digitálneho vstupu

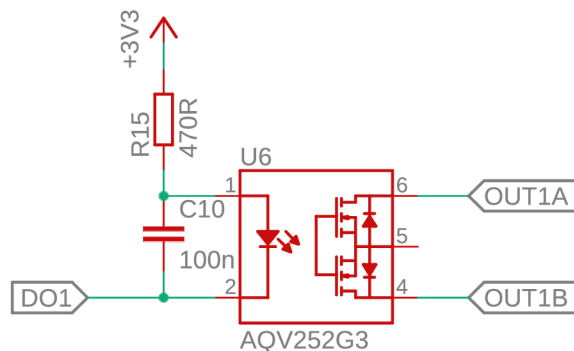
Priemernými hodnotami z tabuľky 5.15 a zmeranou charakteristikou digitálneho vstupu odčítame z osy X limity napätových úrovní digitálneho vstupu modulu. Dosiahnuté výsledky je vidieť v tabuľke 5.16. Pre vstupné napätie 8.7 - 10.6 V nie je logická úroveň definovaná.

Tab. 5.16: Odporúčané limity napätových úrovní digitálneho vstupu modulu

	MIN	MAX	UNIT
High-level input voltage	10.6	-	V
Low-level input voltage	-	8.7	V

5.6 Digitálne výstupy

Výstup tvorí tranzistorové relé. Predstavuje opticky riadenú dvojicu anti-sériovo zapojených tranzistorov typu MOSFET. Ovládanie je prevedené pripojením integrovanej budiacej LED priamo na výstup IO expandéru cez predradný rezistor.



Obr. 5.25: Schéma zapojenia výstupného obvodu

V tabuľke 5.17 sú porovnané typy MOSFET relé ponúkané rôznymi výrobcami. Jedná sa o zariadenia v púzdre DIP-6 so zhodným zapojením pinov. Je preto možné osadiť ľubovoľný typ z vybraných možností. Ako vhodný typ je zvolené relé od výrobcu Supsic GAQV252G3E. To ponúka jeden z najvyšších spínaných prúdov I_L za najnižšiu cenu. Maximálne spínacie napätie 60 V je dostatočné.

Tab. 5.17: Porovnanie vhodných MOSFET relé [15, 16, 17]

Part No.	Manufact.	Load Voltage	Load Current	LED forward current		LED forward voltage	I/O iso.
		U_L	I_L	I_f		U_f	U_{iso}
		[V]	[A]	[mA]		[V]	[Vrms]
		Max.	Max.	Max.	Typ.	Typ.	Max.
AQV252G3	Panasonic	60	3.5	50	5 - 30	1.3	1500
AQV255G3	Panasonic	100	2.4	50	5 - 30	1.3	1500
G3VM-63BR	Omron	60	1.2	20	5 - 10	1.27	5000
GAQV252G3E	Supsic	60	3	50	-	1.3	3750

Zo známeho budiaceho prúdu pre LED $I_f = 5 \text{ mA}$, úbytku napätia na nej $U_f = 1.3 \text{ V}$ a napájacieho napätia $V_S = 3.3 \text{ V}$ vypočítame hodnotu predradného rezistoru. V obrázku 5.25 sa jedná o rezistor R15. Použijeme vzťah:

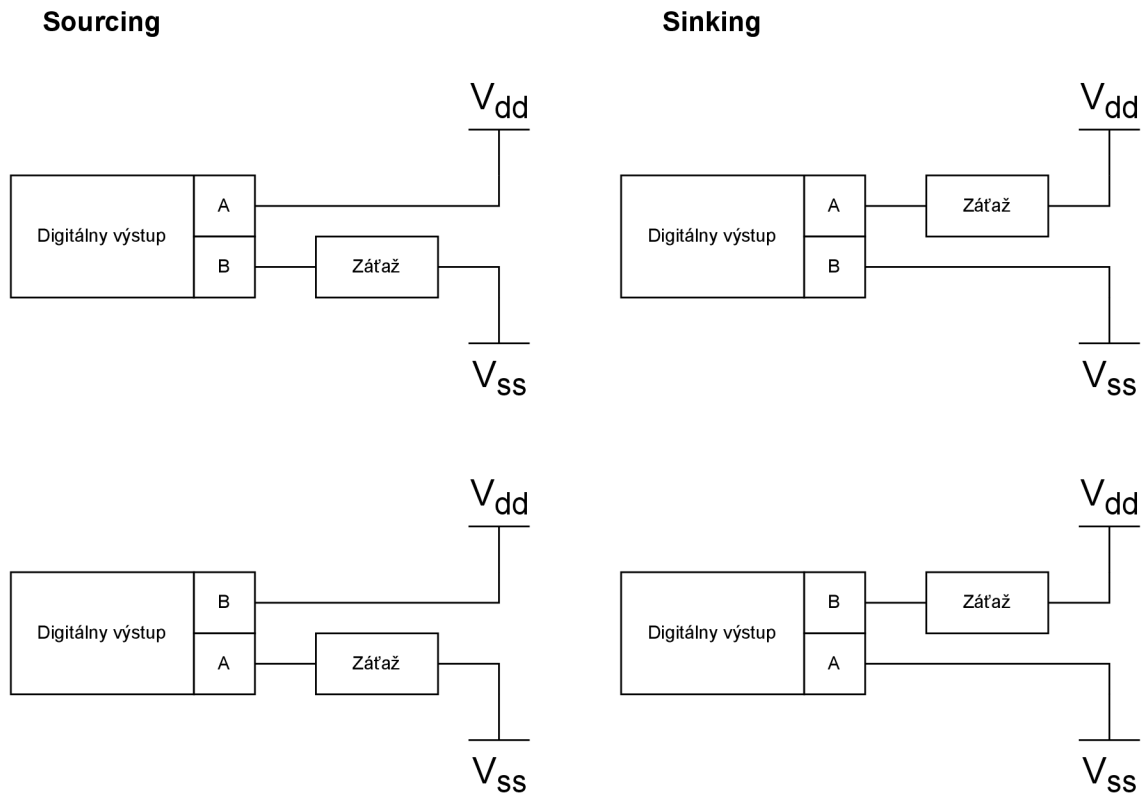
$$R = \frac{V_S - V_f}{I_f} \quad (5.22)$$

$$R = \frac{3.3 - 1.3}{5 \cdot 10^{-3}} = 400 \Omega$$

Volíme najbližšiu vyššiu hodnotu odporu $R = 402 \Omega$.

5.6.1 Spôsob zapojenia digitálnych výstupov

Digitálny výstup funguje ako spínaný kontakt. Je preto možné ho zapojiť v konfigurácii ako *sinking* alebo *sourcing* podľa obrázku 5.26. Svorčky A a B nemajú polaritu. Možno teda spínať jednosmerné aj striedavé napätie.



Obr. 5.26: Spôsob zapojenia digitálneho výstupu

5.7 Napájanie modulu digitálnych vstupov a výstupov

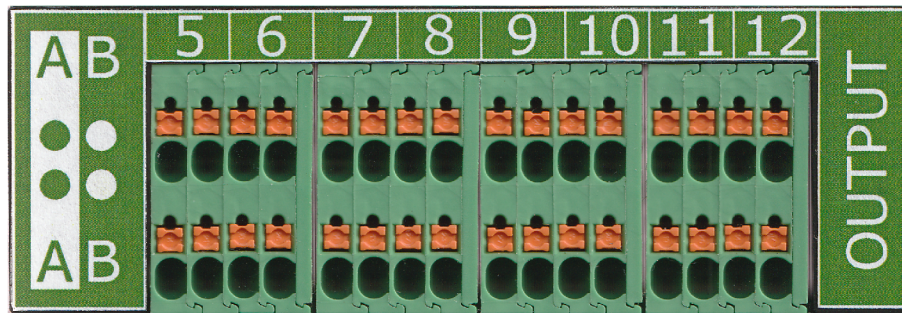
Pre stanovenie vhodného napätového regulátoru vyjadríme výkon hlavných komponentov modulu digitálnych vstupov a výstupov (viď tabuľka 5.7). Súčtom maximálneho výkonu komponentov v tabuľke 5.7 dosiahneme hodnotu 469 mW. Pre zjednotenie dizajnu a zachovanie vysokej účinnosti použijeme rovnaký napätový regulátor popísaný v sekcii 5.1.4. Napätový regulátor RECOM Power R-78B3.3-2.0 je použitý pre zjednotenie návrhu medzi rôznymi typmi rozširujúcich modulov napriek tomu, že je pre konkrétny prípad výrazne naddimenzovaný.

Tab. 5.18: Prúdový odber komponentov digitálneho IO modulu. $U_S = 3.3 V$

Part	No.	I_{MAX}	P_{MAX}
	-	[mA]	[mW]
IO expander	1	100	330
MOSFET relay	4	20	66
Photocoupler	4	2	7
LED indicator	1	20	66
Total		142	469

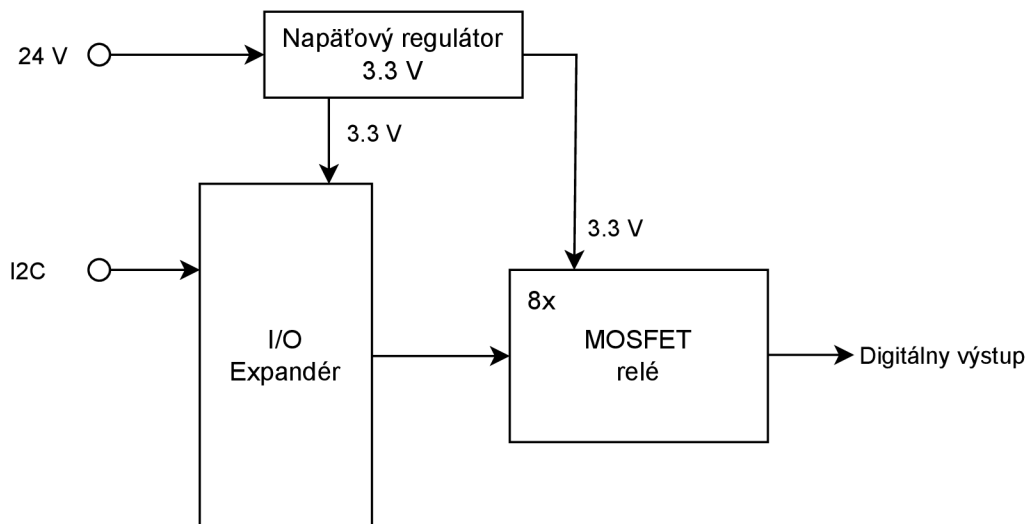
5.8 Modul digitálnych výstupov

Rozširuje zariadenie o 8 digitálnych tranzistorových spínacích kontaktov.



Obr. 5.27: Predný panel modulu digitálnych výstupov

Dizajn vychádza z modulu digitálnych vstupov a výstupov. Digitálne vstupy boli nahradené štvoricou ďalších digitálnych výstupov (viď obrázok 5.28). Ich dizajn je zhodný s dizajnom popísaným v kapitole 5.6 a pripojenie záťaže rovnaké ako v sekcii 5.6.1



Obr. 5.28: Bloková schéma zapojenia modulu digitálnych výstupov

Jeden z modulov pre výstupy 21 - 28 disponuje MOSFET relé osadenými v päťici. Je preto možné v prípade, že si to aplikácia vyžaduje, jednoducho zameniť relé za iný typ z tabuľky 5.17.

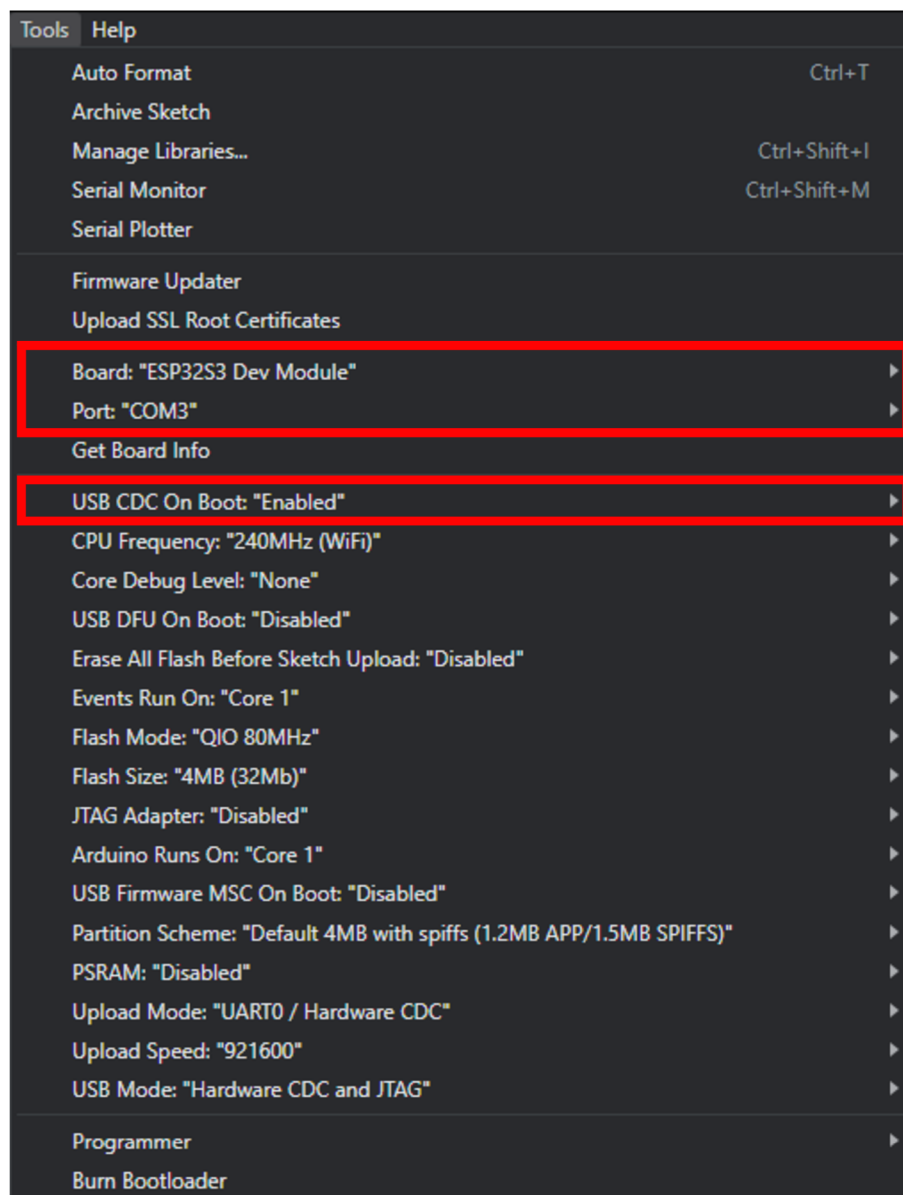
6 Firmware

Firmware zariadenia je naprogramovaný v jazyku C/C++. Ako príloha C je ponúkaný v 2 verziách. Tie umožňujú pripojenie k sieti prostredníctvom rozhrania ethernet alebo wifi.

6.1 Arduino IDE

Pre programovanie mikroprocesoru ESP32 je použitý program Arduino IDE. Primárne navrhnutý k programovaniu vývojových dosiek Arduino, umožňuje programovanie aj mikokontrolérov ESP32.

Pre nahranie firmware je potrebné zvoliť typ a port, ku ktorému je pripojený (viď obrázok 6.1). Taktiež je potrebné povoliť možnosť *USB CDC On Boot*. Tá umožní použitie integrovaného USB prevodníku bez potreby externých zariadení.



Obr. 6.1: Nastavenie Arduino IDE

Pred samotným nahraním programu je potrebné na vývojovej doske ESP32 stlačiť tlačidlo *BOOT* a počas toho krátkodobo stlačiť tlačidlo *RESET*. To že je vývojová doska pripravená na nahranie nového firmware je indikované rozsvietením zelenej indikačnej LED2 a oranžovej LED3.

6.2 I2C

Riešenie I2C komunikácie využíva knižnicu *Wire.h* [20], ktorá je ponúkaná ako súčasť vývojového prostredia Arduino. Pred začatím komunikácie je potrebné definovať

piny mikrokontroléru, na ktorých bude komunikácia prebiehať. V našom prípade sa jedná o piny 5 a 6.

```
//Start I2C on set pins
Wire.setPins(i2c_sda, i2c_scl);
Wire.begin();
```

Po spustení komunikácie vyhľadá funkcia *ScanI2C* prítomné I2C zariadenia a ich adresy. Ich adresy následne vypíše cez sériovú linku. Samotná funkcia nie je prechod zariadenia kľúčová. Pomáha však pri overení, že sú všetky rozširujúce moduly pripojené so správne zvolenou adresou.

```
//Scan for I2C devices
ScanI2C();
```

Adresy pripojených rozširujúcich modulov je potrebné zvoliť dopredu. Nie je ich možné počas behu programu meniť. Pre komunikáciu cez I2C je pre ADC použitá knižnica *PCF8574.h* [23] a pre IO expandér knižnica *MCP342x.h* [24]

```
//PCF8574 addresses
PCF8574 PCF_0(0x39);
PCF8574 PCF_1(0x3C);
PCF8574 PCF_2(0x3A);
PCF8574 PCF_3(0x38);
//MCP342x addresses
MCP342x adc = MCP342x(0x68);
```

6.3 Nastavenie IP adresy

Statická IP adresa je nastavená na začiatku programu.

```
// Set your Static IP address
IPAddress local_IP(192, 168, 1, 0);
// Set your Gateway IP address
IPAddress gateway(192, 168, 1, 1);
IPAddress subnet(255, 255, 0, 0);
```

Hodnota štvrtého čísla lokálnej IP adresy je neskôr pred inicializáciou prepísaná hodnotou zvolenou na BCD prepínačoch. Funkcia *ReadBCD* prevedie binárnu hodnotu na desiatkovú a vráti ju ako hodnotu typu integer. V prípade zvolenia čísla vyššieho ako 254 sa zvolí hodnota 254.

```
// Set last 3 IP digits
int digits = ReadBCD();
```

```
if(digits > 254)
    digits = 254;
local_IP[3] = digits;
```

6.4 Pripojenie ku sieti ethernet

O pripojenie ku sieti ethernet sa stará knižnica *ETHClass.h* [22]. Pred jej použitím je potrebné v knižnici *utilities.h* definovať použitú vývojovú dosku. Tá definuje potrebné piny pre komunikáciu s ethernet kontrolérom W5500.

Pre úspešné pripojenie ku sieti je potrebné nastaviť správne zvolenú konfiguráciu IP adresy.

```
//Configure ETH connection
ETH.config(local_IP, gateway, subnet);
```

Po úspešnom pripojení je cez rozhranie USB vypísaná nastavená hodnota IP adresy, MAC adresa a rýchlosť pripojenia.

6.5 Pripojenie prostredníctvom Wifi

Pre pripojenie k sieti prostredníctvom Wifi je potrebné v sekcii programu doplniť názov siete a heslo.

```
//Connect to Wifi
WiFi.begin("SSID", "password");
```

6.6 Modbus server

Pre implementáciu Modbus TCP je použitá knižnica *ModbusIP_ESP8266.h* [21] určená špecificky pre mikroprocesory ESP. Knižnica je navrhnutá pre Modbus zariadenia typu slave/server.

Konkrétna aplikácia využíva nasledovné funkcie knižnice:

- 0x02 - Read Discrete Input

```
mb.Ists(input[1], InputValue[0]);
```

- 0x04 - Read Input Register

```
mb.Ireg(AIN_reg[1], value[2]);
```

- 0x05 - Write Single Coil

```
digitalWrite(greenPin, mb.Coil(GREEN_COIL));
```

Pre vybavenie požiadaviek serveru je potrebné pravidelné volanie funkcie:

```
mb.task();
```


7 Overenie funkčnosti Modbus TCP serveru

Pre otestovanie funkčnosti Modbus TCP serveru bol použitý program Modbus Poll, ktorý umožňuje simuláciu základných Modbus funkcií [18]. Pre otestovanie potrebných funkcií nám postačuje použiť funkcie nasledovné:

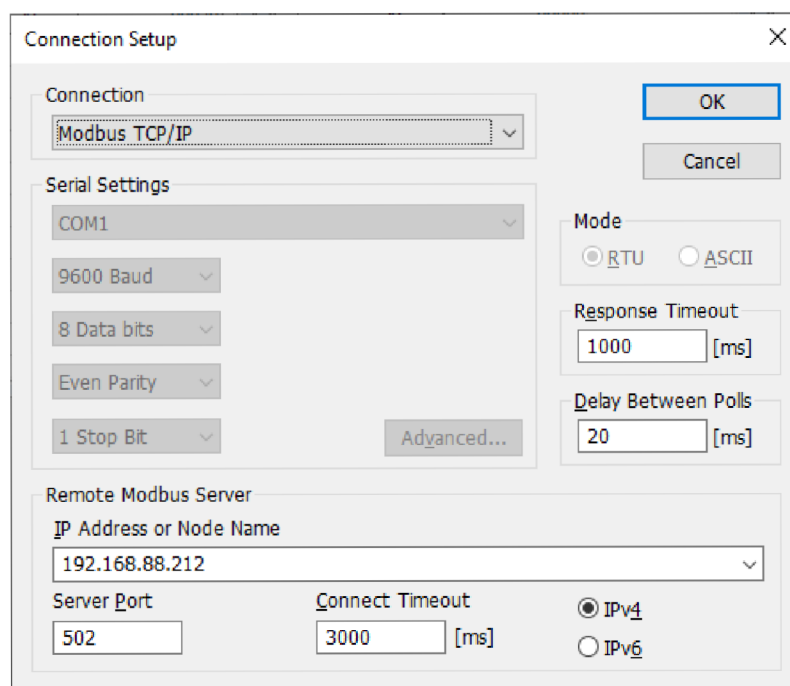
- 02 (0x02) Read Discrete Inputs
- 04 (0x04) Read Input Registers
- 05 (0x05) Write Single Coil
- 15 (0x0F) Write Multiple Coils

7.1 Nastavenie pripojenia

Nastavenie pripojenia k serveru zahájime stlačením klávesy F3. V zobrazenom okne (obrázok 7.1) je potreba nastaviť nasledovné:

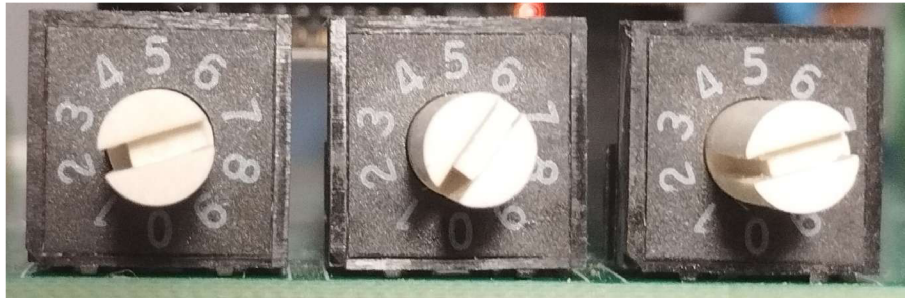
Typ pripojenia: Modbus TCP/IP
IP adresa: podľa pripojenia k sieti
Server Port: 502

Server port 502 je špecifický pre Modbus a v nastaveniach je už preddefinovaný. Ostatné nastavenia nie je potrebné meniť.



Obr. 7.1: Nastavenie pripojenia v programe Modbus Poll

Zároveň je potrebné nastaviť na komunikačnom module odpovedajúcu hodnotu posledných cifier IP adresy (viď obrázok 7.2).

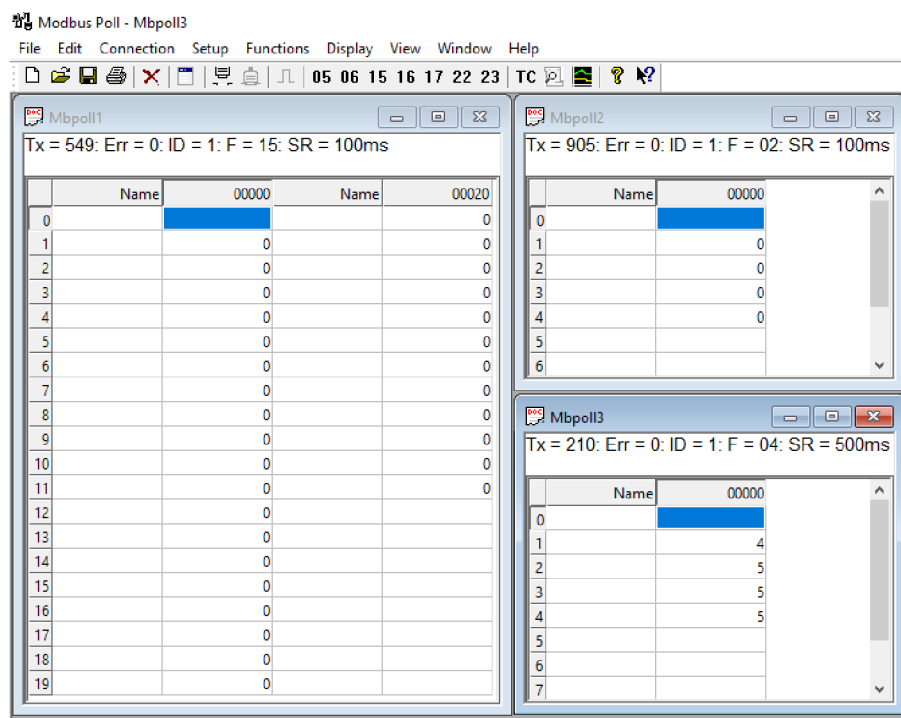


Obr. 7.2: Voľba cifier IP adresy BCD prepínačmi

7.2 Overeni funkcie čítania a zápisu

Po zahájení komunikácie zvolíme nastavenie funkcií klávesou F8. Modbus poll umožňuje spustenie viacerých inštancií, každú s inou funkciou. Na obrázku 7.3 sú spustené tri inštancie s nasledujúcimi funkciami:

Mbpoll1:	15	Write Multiple Coils	Zápis viacerých cievok
Mbpoll2:	02	Read Discrete Inputs	Čítanie diskretných vstupov
Mbpoll3:	04	Read Input Registers	Čítanie vstupných registrov



Obr. 7.3: Čítanie a zápis vstupov a výstupov v prostredí Modbus Poll

7.2.1 Nastavenie digitálnych výstupov

Nastavením digitálnych výstupov na hodnotu logickej 1 môžeme nasledovne overiť ich správnu funkčnosť použitím multimetru s testom kontinuity pripojenom na svorky A a B jedného z výstupov. Zmeraním každého z výstupov možno potvrdiť ich správnu funkčnosť

Nastavením cievok s adresou 29, 30 a 31 sa rozsvietia signalizačné LED 2, 3 a 4 na komunikačnom module (viď obrázok 7.4 a 7.5).

Mbpoll1

Tx = 442: Err = 0: ID = 1: F = 15: SR = 100ms

	Name	00000	Name	00020
0				0
1		0		0
2		0		0
3		0		0
4		0		0
5		0		0
6		0		0
7		0		0
8		0		0
9		0		1
10		0		1
11		0		1

Obr. 7.4: Nastavenie cievok 29,30 a 31



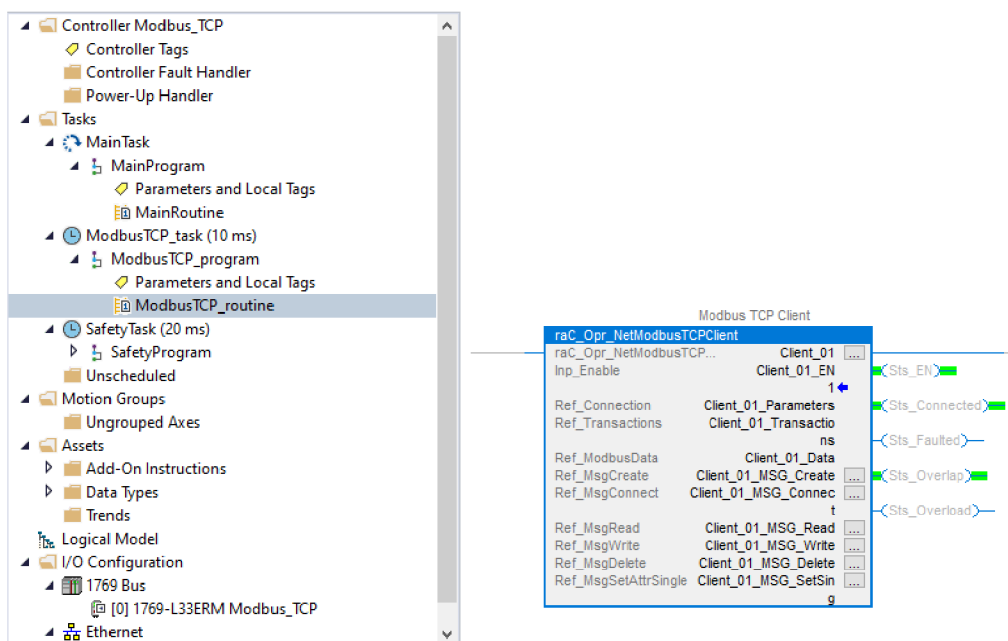
Obr. 7.5: LED 2, 3 a 4 na cievkach 29, 30 a 31

8 Testovacia aplikácia pre PLC

Pripojenie MODBUS TCP serveru bolo otestované s PLC rady CompactLogix 5370. Program bol navrhnutý vo vývojovom prostredí Studio 5000.

Pre funkciu Modbus klienta je dostupná Add-on inštrukcia. Tá umožňuje obsluhu takzvaných "transakcií", ktoré predstavujú jednu funkciu Modbus. Jedna Add-on inštrukcia tak dokáže vykonávať 5 Modbus funkcií zároveň.

Testovací program tvorí jediná Add-on inštrukcia bežiacia v periodickej úlohe (viď obrázok 8.1).



Obr. 8.1: Použitie Modbus TCP client Add-on inštrukcie

Podľa návodu Add-on inštrukcie (dostupný v prílohe E) je potrebné v globálnych premenných nastaviť parametre serveru, na ktorý sa chceme pripojiť. IP adresu určíme podľa voľby na BCD prepínačoch. Server port je pre Modbus stanovený 502. Lokálny slot serveru možno ponechať 0.

Client_01_Parameters	{...}
Client_01_Parameters.DestAddress	'192.168.1.124'
Client_01_Parameters.DestinationPort	502
Client_01_Parameters.LocalAddress	"
Client_01_Parameters.LocalSlot	0
Client_01_Parameters.MSG_Dest	{...}
Client_01_Parameters.MSG_Src	{...}

Obr. 8.2: Nastavenie pripojenia k Modbus serveru

Po nastavení počtu cievok a vstupných registrov je možné program zapnúť a otestovať funkčnosť pripojenia. Výstupné cievky možno jednoducho otestovať nastavením signálnych LED 2 - 4 na komunikačnej karte a ich vizuálnou kontrolou (viď obrázok 8.3). Pripojením napätia 24 V na tretí kanál modulu digitálnych vstupov potvrdíme jeho správnu funkčnosť (obrázok 8.4). Privedením napätia na druhý analógový kanál zmení hodnotu v registri (viď obrázok 8.5). Po podrobnom otestovaní všetkých vstupov a výstupov možno potvrdiť, že komunikácia s PLC prebieha úspešne a je plne funkčná.

Client_01_Data.Coils_0xxx[29]	1
Client_01_Data.Coils_0xxx[30]	1
Client_01_Data.Coils_0xxx[31]	1

Obr. 8.3: Nastavenie cievok signálnych LED

▲ Client_01_Data.DisInpInputs_1xxx	{...}
Client_01_Data.DisInpInputs_1xxx[0]	0
Client_01_Data.DisInpInputs_1xxx[1]	0
Client_01_Data.DisInpInputs_1xxx[2]	0
Client_01_Data.DisInpInputs_1xxx[3]	1
Client_01_Data.DisInpInputs_1xxx[4]	0

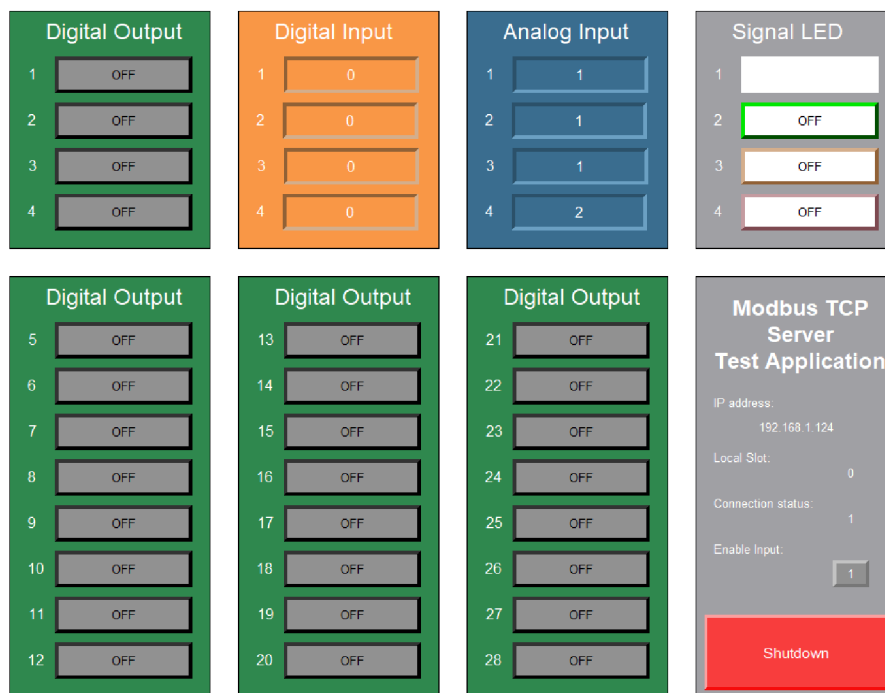
Obr. 8.4: Čítanie hodnoty digitálnych vstupov

▲ Client_01_Data.InpRegisters_3xxx	{...}
▶ Client_01_Data.InpRegisters_3xxx[0]	0
▶ Client_01_Data.InpRegisters_3xxx[1]	1
▶ Client_01_Data.InpRegisters_3xxx[2]	16
▶ Client_01_Data.InpRegisters_3xxx[3]	1
▶ Client_01_Data.InpRegisters_3xxx[4]	1

Obr. 8.5: Čítanie hodnoty analógových vstupov

Za účelom zprehľadniť zobrazenie stavu vstupov a nastavenie hodnôt výstupov bola v programe FactoryTalk vytvorená jednoduchá aplikácia (viď obrázok 8.6 a 8.7).

V nej možno individuálne zapínať digitálne výstupy stlačením tlačidla ON/OFF. Zobrazuje hodnotu digitálnych vstupov. Hodnota analógových vstupov je zobrazená v neupravenom formáte, vhodná primárne na testovacie účely. Pre prepočet na hodnotu napätia alebo prúdu je potrebné vynásobiť konštantou podľa kapitoly 5.2.3 a 5.2.3. Po stlačení tlačidla *Enable Input* sa Add-on inštrukcia resetuje.



Obr. 8.6: Grafické prostredie testovacej aplikácie



Obr. 8.7: Grafické prostredie testovacej aplikácie pri zapnutí digitálnych výstupov

Záver

V rámci bakalárskej práce boli vyhodnotené nedostatky predošlých riešení Modbus TCP serveru. Bolo rozhodnuté vytvoriť kompletne nový návrh zariadenia. Vytvorené boli 4 typy modulov.

Pre spracovanie správ Modbus TCP serveru bol navrhnutý komunikačný modul s mikroprocesorom ESP32-wroom1-S3. Tento modul umožňuje komunikáciu po rozhraní ethernet a rozhraní Wifi a to rýchlosťou 100 Mb/s. Posledné 3 cifry statickej IP adresy su užívateľom nastaviteľné pomocou trojice BCD prepínačov. Cez zbernicu I2C možno pripojiť rozširujúce vstupno-výstupné moduly. Maximálny počet rozširujúcich modulov je obmedzený možnosťou nastavenia rozdielnych adries I2C zariadení. Je preto možné pripojiť maximálny počet 8 analógových a 8 digitálnych modulov.

Ďalej boli vytvorené 3 typy vstupno-výstupných modulov.

Modul analógových vstupov rozširuje zariadenie o 4 analógové vstupy prispôsobené rozsahom vstupné napätia a prúdu hodnotám priemyselného štandardu. Napätový vstup umožňuje meranie napätia 0 - 10 V, prúdový vstup meranie prúdu v rozsahu 0 - 40 mA. Dosiahnuta presnosť meraných hodnôt neprevyšuje relatívnu odchýlku 1 %.

Modul digitálnych vstupov a výstupov rozširuje zariadenia o 4 digitálne vstupy a 4 digitálne výstupy. Logická úroveň digitálnych vstup odpovedá priemyselnému štandardu 24 V. Digitálne výstupy umožňujú spínanie jednosmerného a striedavého napätia v zapojení sinking alebo sourcing pri maximálnom napätí 60 V a 3 A.

Modul digitálnych výstupov rozširuje zariadenie o 8 digitálnych výstupov. Využíva rovnaký dizajn s maximálnym spínaným napätím 60 V a prúdom 3 A.

Modulárne zapojenie umožňuje zvolenie maximálneho počtu 64 digitálnych výstupov a 32 analógových vstupov.

Vo fázi vývoja firmvéru bola komunikácia zariadenia úspešne testovaná simulačným programom Modbus Poll. Test potvrdil správnu funkčnosť komunikačného modulu a rozširujúcich vstupno-výstupných modulov.

Na záver bola overená funkčnosť navrhnutého Modbus TP serveru v spolupráci s PLC Allen-Bradley rady CompactLogix s pozitívnym výsledkom.

Pre vizualizáciu testovania komunikácie medzi PLC a Modbus TCP serverom bola vytvorená aplikácia, ktorá umožňuje užívateľovi jednoducho nastavovať hodnoty výstupov a čítať hodnoty vstupov.

V blízkej budúcnosti bude možné overenie jej použitia v laboratórnej úlohe riadenia svetelnej križovatky. V prípade úspešnej aplikácie budú možné rozšíriť počet výstupov pre rozšírenie možností zariadenia v rámci úlohy. Použitie Modbus TCP serveru však nebolo súčasťou zadania bakalárskej práce.

V práci je možné pokračovať návrhom nových typov rozširujúcich modulov ako napríklad modulu analógových výstupov, ktorý nebol v rozsahu tejto práce obsiahnutý.

Firmware zariadenia ponúka potenciál pre doplnenie funkcie automatického rozpoznania pripojeného rozširujúceho modulu na základe známeho rozsahu voliteľných I2C adries pre jednotlivé rozširujúce moduly.

Literatúra

- [1] KAUFMAN, Oskar. *Modbus/TCP server*. [online], Bakalářská práce, vedoucí Radek Štohl. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřicí techniky, 2023. Dostupné z:
<http://hdl.handle.net/11012/212629>. [cit. 2023-12-08].
- [2] Rockwell Automation. *ControlLogix 5580 Controllers* [online]. 2023. Dostupné z:
<https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/hardware/allen-bradley/programmable-controllers/large-controllers/controllogix/1756controllogix5580.html>. [cit. 2023-12-19].
- [3] MODBUS ORGANIZATION. *MODBUS application protocol specification V1.1a* [online]. 2006. Dostupné z:
https://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1a.pdf. [cit. 2023-12-19].
- [4] MODBUS ORGANIZATION. *MODBUS messaging on TCP/IP implementation guide V1.0b* [online]. 2006. Dostupné z:
https://modbus.org/docs/Modbus_Messaging_Implementation_Guide_V1_0b.pdf. [cit. 2023-12-19].
- [5] Ningbo Songle Relay. *SRD-12VDC-SL-C Datasheet*. [online]. Dostupné z:
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132031/SONGLERELAY/SRD-12VDC-SL-C.html>. [cit. 2023-17-05].
- [6] OLIMEX. *OLIMEX Reference Schematic*. [online]. 2022 Dostupné z:
https://github.com/OLIMEX/ESP32-POE/blob/master/HARDWARE/ESP32-PoE-hardware-revision-K/ESP32-PoE_Rev_K.pdf. [cit. 2023-12-18].
- [7] ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32-WROOM-32 Datasheet*. [online]. 2023. Dostupné z:
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf. [cit. 2023-12-08].
- [8] ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32-S3-WROOM-1 Datasheet*. [online]. 2023. Dostupné z:
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3-wroom-1_wroom-1u_datasheet_en.pdf. [cit. 2023-12-08]. [cit. 2023-12-13].

- [9] WIZNET. *W5500 Reference Schematic*. [online]. 2015 Dostupné z: <https://docs.wiznet.io/Product/iEthernet/W5500/ref-schematic>. [cit. 2023-12-18].
- [10] RECOM. *R-78B-2.0 DC/DC converter* [online]. 2021. Dostupné z: <https://recom-power.com/pdf/Innoline/R-78B-2.0.pdf>. [cit. 2023-12-19].
- [11] MICROCHIP. *MCP3426/7/8 16-Bit, Multi-Channel Delta-Sigma Analog-to-Digital Converter with I2C Interface and On-Board Reference*. [online]. 2009 Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22226a.pdf>. [cit. 2023-12-29].
- [12] TEXAS INSTRUMENT. *AMC1100 Fully-Differential Isolation Amplifier*. [online]. 2019 Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1100.pdf>. [cit. 2024-05-17].
- [13] TEXAS INSTRUMENT. *PCF8574A Remote 8-Bit I/O Expander for I2C Bus*. [online]. 2021 Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8574a.pdf>. [cit. 2024-05-17].
- [14] Littelfuse. *Surface Mount – 600W > SMBJ series TVS Diodes*. [online]. 2020 Dostupné z: <https://www.littelfuse.com/media?resourcetype=datasheets&itemid=09a6ae9a-73cb-4ac4-acac-e6dab92ab953&filename=littelfuse-tvs-diode-smbj-datasheet>. [cit. 2024-05-17].
- [15] Panasonic INDUSTRY. *PhotoMOS HE 1 Form A High Capacity Product Catalog*. [online]. 2022 Dostupné z: https://www3.panasonic.biz/ac/e_download/control/relay/photomos/catalog/semi_eng_he1a_aqv25_g3a.pdf. [cit. 2024-05-17].
- [16] OMRON. *G3VM-63BR/63ER MOS FET Relays*. [online]. 2023 Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/307/K336_E1-3386000.pdf. [cit. 2024-05-17].
- [17] SUPSiC. *GAQV252G3E_EH Datasheet*. [online]. 2016 Dostupné z: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2402182335_SUPSiC-GAQV252G3E_C7435176.pdf. [cit. 2024-05-17].
- [18] Witte Software. *Modbus Tools. For test, simulation and programming*. [online]. 2024 Dostupné z: https://www.modbustools.com/modbus_poll.html. [cit. 2024-05-17].

- [19] Arduino. *Wire - Arduino Reference*. [online]. 2023 Dostupné z:
<https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/wire/>. [cit. 2024-05-17].
- [20] Arduino. *Wire - Arduino Reference*. [online]. 2023 Dostupné z:
<https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/wire/>. [cit. 2024-05-17].
- [21] André Sarmiento Barbosa. *Modbus Library for ESP8266*. [online]. 2024 Dostupné z:
<https://github.com/andresarmiento/modbus-esp8266>. [cit. 2024-05-17].
- [22] Xinyuan - LilyGO. *ESP32/ESP32S3 Ethernet Library*. [online]. 2023 Dostupné z:
<https://github.com/Xinyuan-LilyGO/LilyGO-T-ETH-Series/tree/bf1c3880896423787b27ea11692b4920cbd39168/lib/ETHClass>. [cit. 2024-05-17].
- [23] Steve Marple. *Library to support Microchip ADC342x analogue to digital converters*. [online]. 2021 Dostupné z:
<https://github.com/stevemarple/MCP342x>. [cit. 2024-05-17].
- [24] Rob Tillaart. *Library for PCF8574 - 8 channel I2C IO expander*. [online]. 2024 Dostupné z:
<https://github.com/RobTillaart/PCF8574>. [cit. 2024-05-17].

Zoznam symbolov a skratiek

ADC	Analog to Digital Converter - Analógovo-digitálny prevodník
ADU	Application Data Unit - Aplikačná dátová jednotka
BCD	Binary-coded decimal - Binárne reprezentované dekadické číslo
DPS	Doska plošného spoja
IP	Internet Protocol
LED	Light emitting diode - Svetelná dióda
LSB	Least-significant bit - Najmenej významný bit
MBAP	MODBUS Application Protocol
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
PDU	Protocol Data Unit
PLC	Programmable Logic Controller
POE	Power Over Ethernet
PWM	Pulse width modulation - Modulácia šírkou pulzu
TCP	Transport Control Protocol
TVS	Transient Voltage Supression
USB	Universal Serial Bus - Univerzálna sériová zbernica

Zoznam príloh

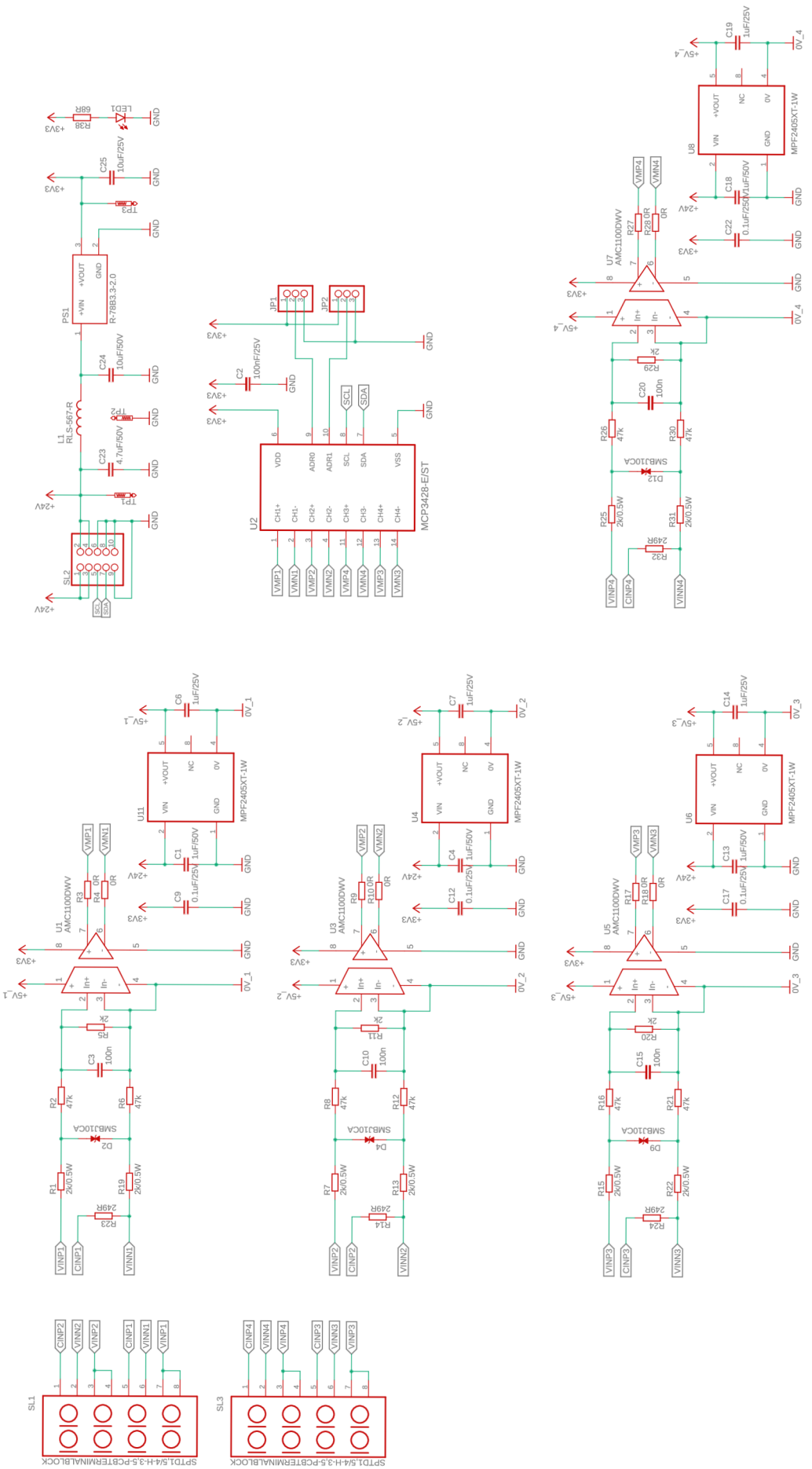
A	Schéma zapojenia navrhnutých modulov	73
B	Súbory návrhu v programe Eagle	78
C	Firmware	79
D	3D model predných panelov	80
E	Testovací program pre PLC	81
F	Chyba merania napätia	82
G	Modbus TCP server	84

A Schéma zapojenia navrhnutých modulov

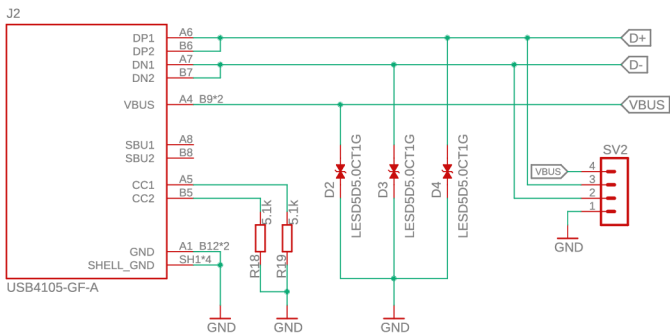
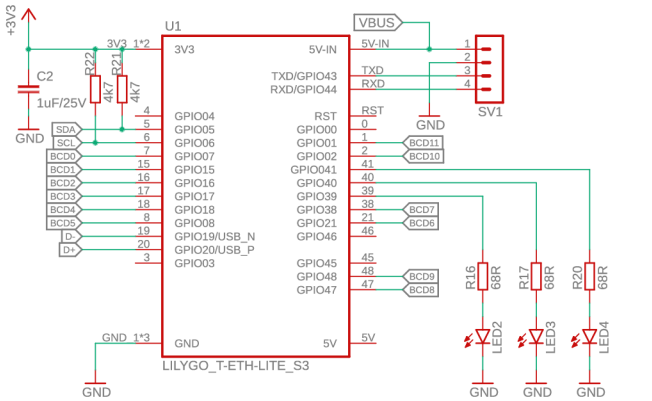
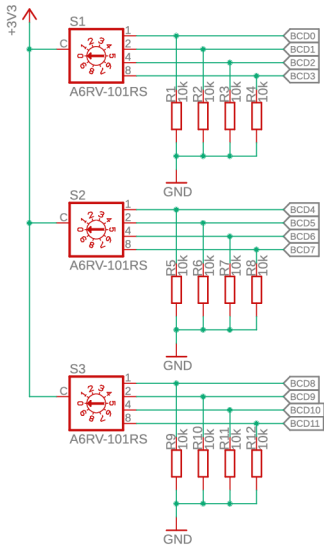
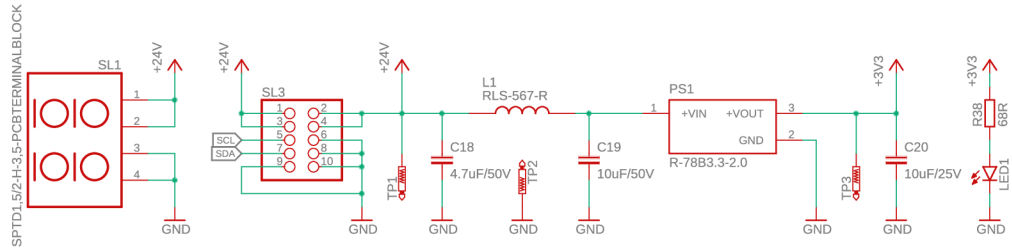
Schémy zapojenia jednotlivých modulov. Taktiež ako elektronická príloha.

```
/
├── Priloha_A
│   ├── AI_module_sch.pdf
│   ├── Com_module_sch.pdf
│   ├── DIO_module_board.pdf
│   └── DO_module_sch.pdf
```

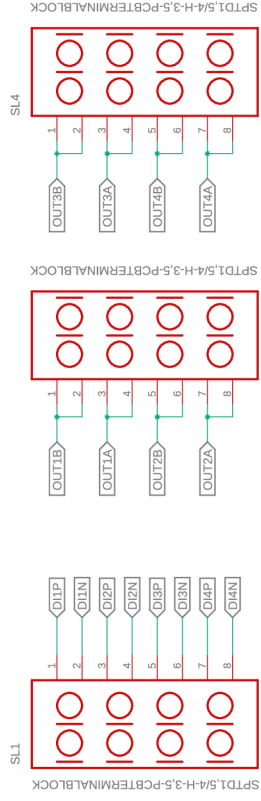
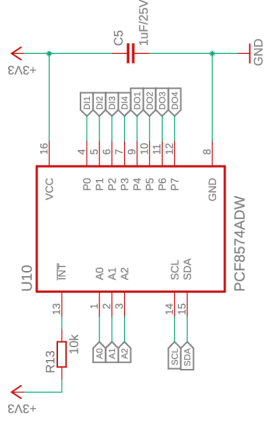
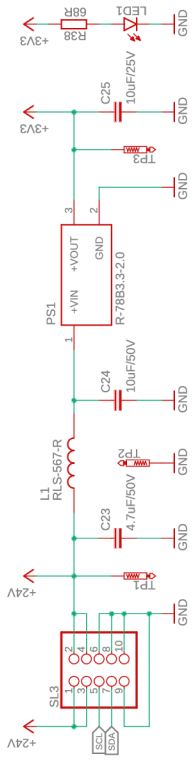
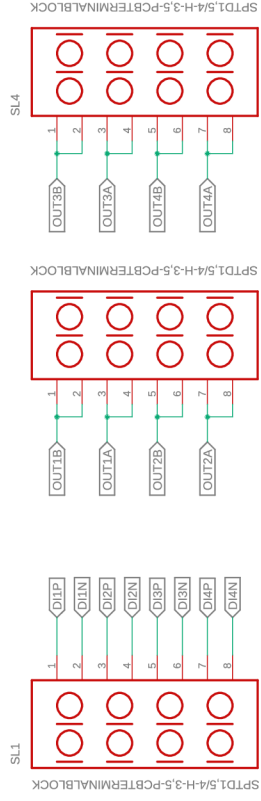
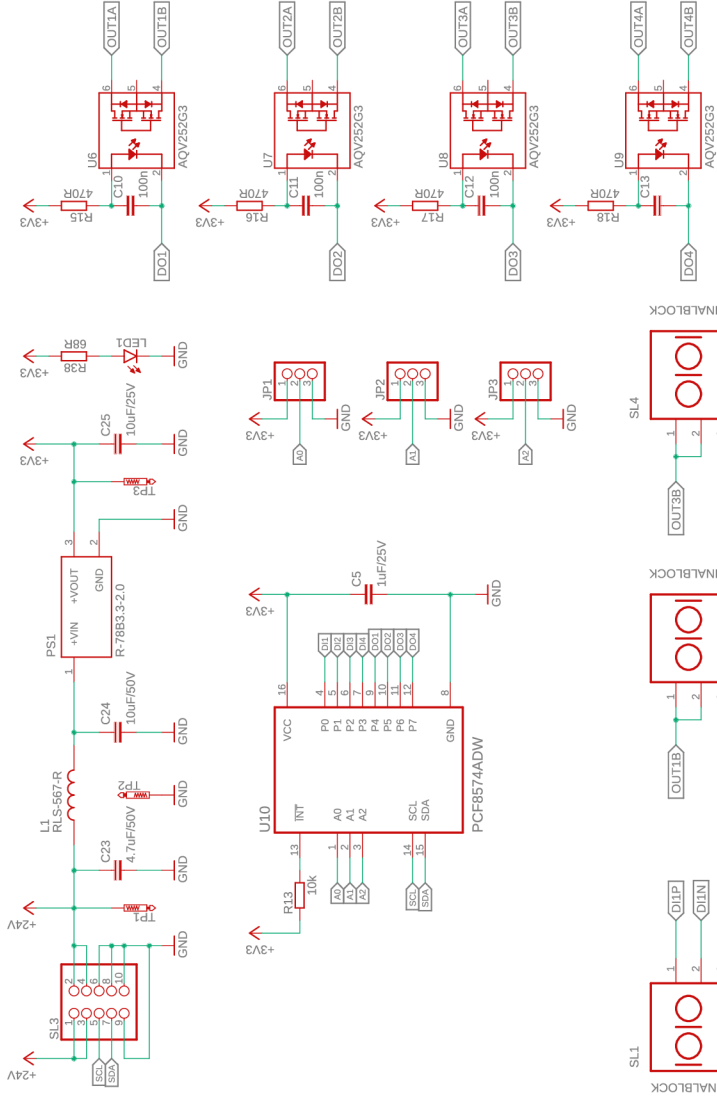
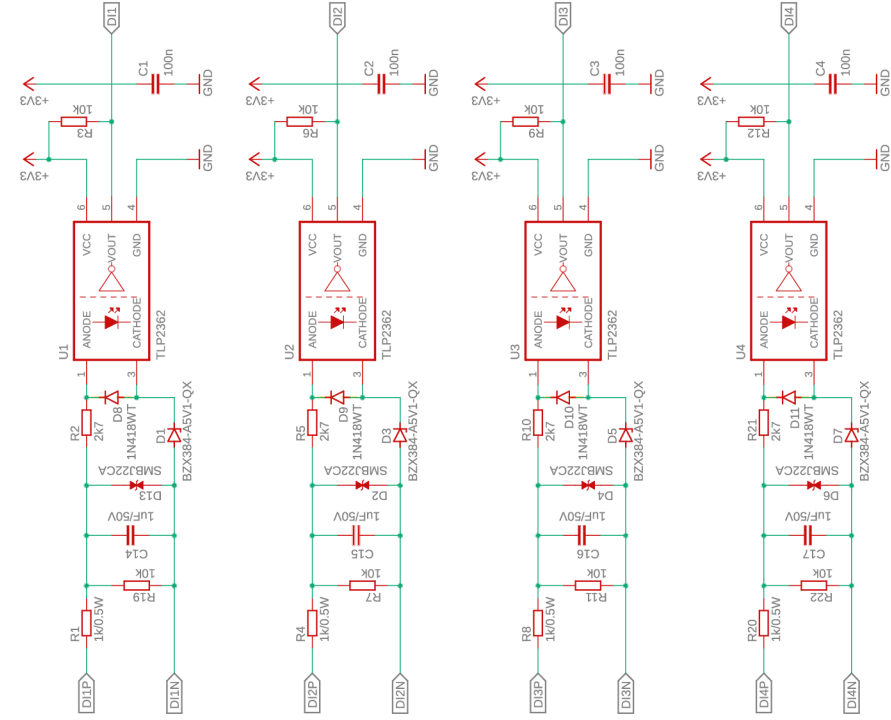
Analog Input Module schematic



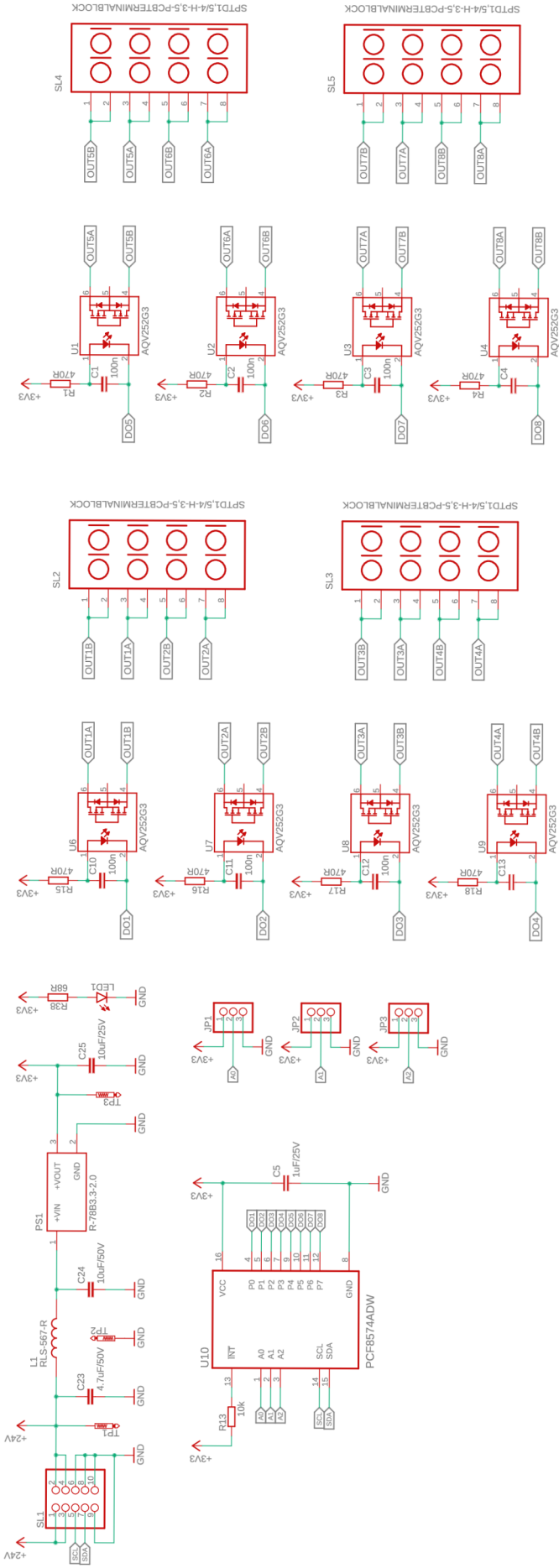
Communication Module schematic



Digital IO Module schematic



Digital Output Module schematic



B Súbory návrhu v programe Eagle

Elektronická príloha. Súbory návrhu v programe Eagle.

```
/
├─ Priloha_B
│   └─ AI_module.brd
│   └─ AI_module.sch
│   └─ Com_module.brd
│   └─ Com_module.sch
│   └─ DIO_module.brd
│   └─ DIO_module.sch
│   └─ D08_module.brd
│   └─ D08_module.sch
│   └─ IO_Modbus_periferie.lbr
```

C Firmware

Elektronická príloha. Firmware zariadenia pre ESP32-wroom1-S3.

```
/
├── Priloha_C
│   ├── ModbusServer_Ethernet_1.1
│   │   ├── ETHClass.cpp
│   │   ├── ETHClass.h
│   │   ├── ModbusServer_Ethernet_1.1.ino
│   │   └── utilities.h
│   ├── ModbusServer_Wifi_1.0
│   └── ModbusServer_Wifi_1.0.ino
```

D 3D model predných panelov

Elektronická príloha. 3D model predných panelov modulov a ich polepy.

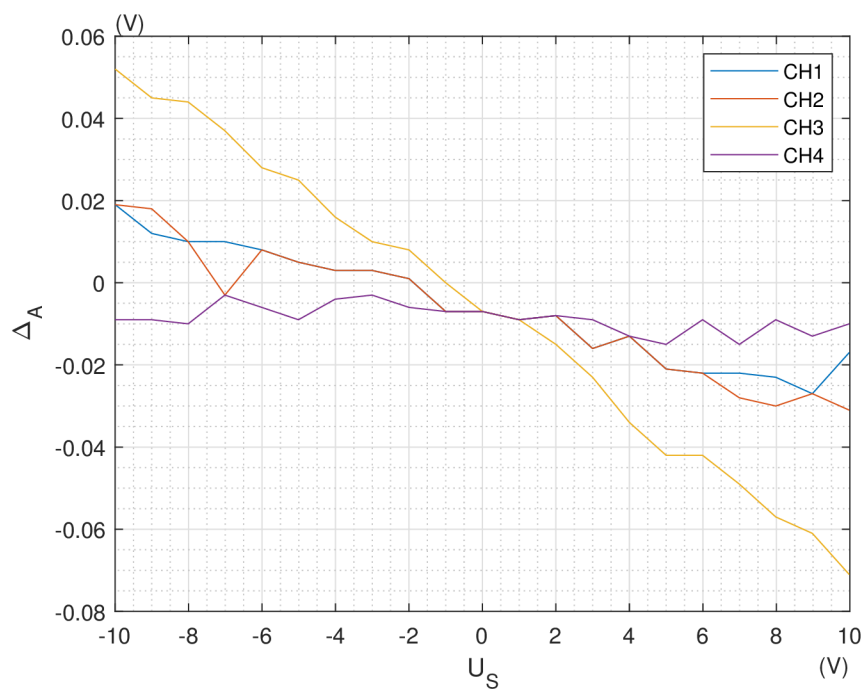
```
/
├── Priloha_D
│   ├── PanelsSoliWorks
│   │   ├── AnalogInputPanel.SLDPRT
│   │   ├── ComPanel.SLDPRT
│   │   ├── DigitalInputPanel.SLDPRT
│   │   └── DigitalOutputPanel.SLDPRT
│   ├── PanelsSTL
│   │   ├── AnalogInputPanel.STL
│   │   ├── ComPanel.STL
│   │   ├── DigitalInputPanel.STL
│   │   └── DigitalOutputPanel.TL
│   └── PanelSticker.pdf
```

E Testovací program pre PLC

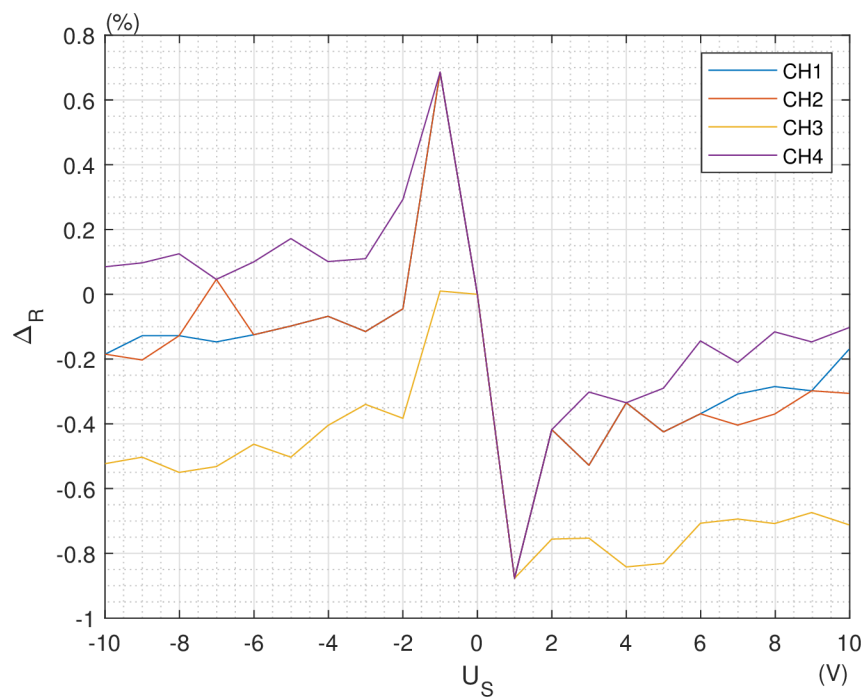
Elektronická príloha. 3D model predných panelov modulov a ich polepy.

```
/
├─ Priloha_E
│   ├── Doc
│   │   ├── ModbusTCPprogram.pdf
│   │   └─ ModbusTCPtest.pdf
│   ├── Modbus TCP Add-on
│   │   ├── Logic
│   │   ├── Manual
│   │   └─ Visualization
│   ├── Modbus_TCP.ACD
│   └─ ModbusTCPtest.apa
```

F Chyba merania napätia



Obr. F.1: Absolútna chyba merania analógových vstupov



Obr. F.2: Relatívna chyba merania analógových vstupov

Tab. F.1: Chyba merania napätia modulu analógových vstupov

REF	CH1				CH2				CH3				CH4			
U_S	n	U_M	Δ_A	Δ_R	n	U_M	Δ_A	Δ_R	n	U_M	Δ_A	Δ_R	n	U_M	Δ_A	Δ_R
[V]	[V]	[-]	[V]	[%]	[V]	[-]	[V]	[%]	[V]	[-]	[V]	[%]	[V]	[-]	[V]	[%]
-9.995	-1482	-10.014	0.019	-0.185	-1482	-10.014	0.019	-0.185	-1487	-10.047	0.052	-0.523	-1478	-9.986	-0.009	0.085
-9.002	-1334	-9.014	0.012	-0.128	-1335	-9.020	0.018	-0.203	-1339	-9.047	0.045	-0.503	-1331	-8.993	-0.009	0.097
-8.01	-1187	-8.020	0.010	-0.128	-1187	-8.020	0.010	-0.128	-1192	-8.054	0.044	-0.550	-1184	-8.000	-0.010	0.125
-7.01	-1039	-7.020	0.010	-0.147	-1037	-7.007	-0.003	0.046	-1043	-7.047	0.037	-0.532	-1037	-7.007	-0.003	0.046
-6.006	-890	-6.014	0.008	-0.125	-890	-6.014	0.008	-0.125	-893	-6.034	0.028	-0.463	-888	-6.000	-0.006	0.100
-5.0086	-742	-5.014	0.005	-0.098	-742	-5.014	0.005	-0.098	-745	-5.034	0.025	-0.503	-740	-5.000	-0.009	0.172
-4.0108	-594	-4.014	0.003	-0.068	-594	-4.014	0.003	-0.068	-596	-4.027	0.016	-0.405	-593	-4.007	-0.004	0.101
-3.0033	-445	-3.007	0.003	-0.115	-445	-3.007	0.003	-0.115	-446	-3.014	0.010	-0.340	-444	-3.000	-0.003	0.110
-1.9991	-296	-2.000	0.001	-0.045	-296	-2.000	0.001	-0.045	-297	-2.007	0.008	-0.383	-295	-1.993	-0.006	0.293
-1.0001	-147	-0.993	-0.007	0.686	-147	-0.993	-0.007	0.686	-148	-1.000	0.000	0.010	-147	-0.993	-0.007	0.686
0	1	0.007	-0.007	-	1	0.007	-0.007	-	1	0.007	-0.007	-	1	0.007	-0.007	-
0.998	149	1.007	-0.009	-0.877	149	1.007	-0.009	-0.877	149	1.007	-0.009	-0.877	149	1.007	-0.009	-0.877
1.9984	297	2.007	-0.008	-0.418	297	2.007	-0.008	-0.418	298	2.014	-0.015	-0.756	297	2.007	-0.008	-0.418
2.9977	446	3.014	-0.016	-0.528	446	3.014	-0.016	-0.528	447	3.020	-0.023	-0.753	445	3.007	-0.009	-0.302
4.0001	594	4.014	-0.013	-0.335	594	4.014	-0.013	-0.335	597	4.034	-0.034	-0.842	594	4.014	-0.013	-0.335
4.999	743	5.020	-0.021	-0.425	743	5.020	-0.021	-0.425	746	5.041	-0.042	-0.831	742	5.014	-0.015	-0.290
5.9914	890	6.014	-0.022	-0.369	890	6.014	-0.022	-0.369	893	6.034	-0.042	-0.707	888	6.000	-0.009	-0.144
6.992	1038	7.014	-0.022	-0.308	1039	7.020	-0.028	-0.404	1042	7.041	-0.049	-0.694	1037	7.007	-0.015	-0.211
7.984	1185	8.007	-0.023	-0.285	1186	8.014	-0.030	-0.370	1190	8.041	-0.057	-0.708	1183	7.993	-0.009	-0.116
8.98	1333	9.007	-0.027	-0.298	1333	9.007	-0.027	-0.298	1338	9.041	-0.061	-0.674	1331	8.993	-0.013	-0.147
9.983	1480	10.000	-0.017	-0.170	1482	10.014	-0.031	-0.306	1488	10.054	-0.071	-0.712	1479	9.993	-0.010	-0.103

G Modbus TCP server

Fyzické zariadenie.