

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2025

Filip Minařík

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Návrh odolného převodníku analogových veličin na Ethernet
Bakalářská práce

2025

Filip Minařík

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Filip Minařík**
Osobní číslo: **I22219**
Studijní program: **B0714A150008 Automatizace**
Téma práce: **Návrh odolného převodníku analogových veličin na Ethernet**
Zadávací katedra: **Katedra automatizace a matematiky**

Zásady pro vypracování

Cílem je navrhnout diagnostický systém pro měření elektrického napětí, proudu a teploty s rozhraním ethernet, včetně možnosti připojení dalších externích senzorů. Zařízení má být primárně založeno na COTS modulech pro průmyslové použití, (pracovní teploty $-32 \div 55$ °C; mechanická odolnost) s možností napájení 12 až 30 V nebo PoE a musí umožňovat komunikaci prostřednictvím sítě ethernet.

Hlavní body řešení práce:

1. Proveďte rešerši dostupných řešení na trhu, s ohledem na jejich průmyslové využití;
2. Navrhněte architekturu zařízení s ohledem na jeho cenu, dostupnost a minimální rozměry;
3. Uvažujte řešení postavené primárně na COTS komponentách;
4. Uvažujte napájení ze zdroje stejnosměrného napětí 12 až 30 V;
5. Uvažujte připojení do Ethernet sítě s rozhraním typu 100Base-TX;
6. Realizujte funkční vzor zařízení s datovým výstupem ethernet, včetně základního SW vybavení, vč. návrhu DPS;
7. Zvolte vhodný standardizovaný komunikační protokol pro přenos diagnostických informací (např. protokoly Telnet a SNMP);
8. Ověřte funkčnost a spolehlivost řešení.

Požadované parametry jednotky:

- Teplota: rozsah měření $-33 \div 90$ °C; čidlo Pt1000; 1+2 kanály.
- Napětí: rozsah měření $0 \div 30$ VDC; 1 kanál.
- Proud: rozsah měření ± 10 A; 1 kanál; převod na napětí nebo datové rozhraní.
- GPIO: min. 1 diskretní vstup a 1 diskretní výstup; v úrovních napájecího napětí.

Rozsah pracovní zprávy: **50**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MATOUŠEK, D., Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR-3.díl, edice uP a praxe, 2. vydání, BEN – technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-209-4
ZÁHLAVA, V., Návrh a konstrukce DPS, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Havlíček, Ph.D.**
Katedra automatizace a matematiky

Datum zadání bakalářské práce: **15. prosince 2024**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

prof. Ing. Petr Doležel, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Libor Kupka, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 24. ledna 2025

Prohlašuji:

Práci s názvem Návrh odolného převodníku analogových veličin na Ethernet jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 15. 05. 2025

Filip Minařík

PODĚKOVÁNÍ

Nejvíce bych chtěl poděkovat své rodině za jejich neochvějnou podporu během mého studia, za jejich nervy a velkou trpělivost. Dále mému vedoucímu práce Ing. Liboru Havlíčkovi, Ph.D. za odborné konzultace a rady při vytváření této práce. V neposlední řadě společnosti Retia, především Ing. Pavlu Roženskému, Pavlu Klápovi, Ing. Pavlu Šubrtovi a týmu Aleny Pilné za rady při vývoji, návrhu a oživení desky. Na závěr také mým kamarádům ze skupiny Libertagang za chvíle pohody a odreagování.

ANOTACE

Práce se zaměřuje na návrh a realizaci měřicího systému pro diagnostiku napětí, proudu a teploty s využitím mikrokontroleru ATmega324PA. Systém využívá COTS součástky, komunikuje přes SPI a Ethernet a zahrnuje galvanicky oddělené části. Součástí návrhu je čtyřvrstvá DPS a senzory vhodné pro průmyslové použití. Výstupem je zařízení s možností síťové komunikace a základní kalibrace měřených veličin.

KLÍČOVÁ SLOVA

mikrokontroler, měření, Ethernet, ADC, SPI, COTS, diagnostika

TITLE

Design of a Robust Analog-to-Ethernet Converter

ANNOTATION

The thesis focuses on the design and implementation of a diagnostic system for measuring voltage, current, and temperature using the ATmega324PA microcontroller. The system employs COTS components, communicates via SPI and Ethernet, and includes galvanically isolated sections. The design features a four-layer PCB and sensors suitable for industrial applications. The result is a device capable of network communication and basic calibration of measured signals.

KEYWORDS

microcontroller, measurement, Ethernet, ADC, SPI, COTS, diagnostics

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK.....	10
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK.....	11
ÚVOD.....	12
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	13
1.1 Analogově-číslicové převodníky.....	13
1.1.1 Analogově-číslicové převodníky v průmyslu.....	14
1.2 Mikrokontrolery.....	15
1.3 Atmega324.....	16
1.3.1 ADC.....	17
1.3.2 PWM.....	17
1.3.3 Programování Atmega324.....	18
1.3.4 Atmel ICE.....	19
1.4 Komunikační rozhraní.....	19
1.4.1 SPI.....	20
1.4.2 USART.....	21
1.4.3 JTAG.....	21
1.4.4 Ethernet.....	22
1.4.5 Využití ethernetu v průmyslu.....	23
1.4.6 Telnet.....	23
1.4.7 Lantronix Xport.....	24
1.5 Měření proudu pomocí mikrokontroleru.....	24
1.5.1 ACS712.....	25
1.6 Měření teploty.....	25
1.6.1 Termistory.....	26
1.6.2 Platinové teploměry.....	26
1.6.3 Max31865.....	27
1.7 Měření napětí.....	28
1.7.1 ISO224.....	28
1.8 Regulátory a měniče.....	29
1.8.1 TEN4-2411.....	29
1.8.2 LM3940.....	29

1.9	Optočleny.....	29
2	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	31
2.1	Návrh zařízení.....	31
2.1.1	Návrh obvodů pro řízení	32
2.1.2	Návrh obvodů pro měření teploty	33
2.1.3	Návrh obvodů pro měření napětí	34
2.1.4	Návrh obvodů pro měření proudu.....	35
2.1.5	Návrh napájení.....	36
2.1.6	Návrh logických vstupů a výstupů.....	37
2.1.7	Návrh podpůrných obvodů	37
2.2	Návrh DPS	38
2.3	Oživování.....	39
2.4	Program.....	43
2.4.1	Způsob zpracování naměřených dat	44
2.5	Měření.....	45
2.5.1	Měření napětí	45
2.5.2	Měření proudu.....	46
2.5.3	Měření teploty.....	47
	ZÁVĚR	48
	POUŽITÁ LITERATURA	49
	SEZNAM PŘÍLOH.....	52

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 Převodník s postupnou aproximací [1].....	13
Obrázek 2 Advantech Adam 6015[4]	14
Obrázek 3 Amega32 a Atmega8 [8]	15
Obrázek 4 Atmega324 pinout[9]	17
Obrázek 5 Příklad PWM signálů[15].....	18
Obrázek 6 Atmel ICE [10].....	19
Obrázek 7 Časový diagram SPI komunikace[13].....	21
Obrázek 8 Asynchronní 8bitový přenos[18].....	21
Obrázek 9 Model ISO/OSI[23].....	22
Obrázek 10 Lantronix Xport[17]	24
Obrázek 11 ACS712[28]	25
Obrázek 12 Teplotní čidlo PT1000[19].....	27
Obrázek 13 Blokové schéma MAX31865 [31]	28
Obrázek 14 Zjednodušené schéma ISO224 [33]	29
Obrázek 15 Optočlen PC827 [38].....	30
Obrázek 16 Jednoduché blokové schéma převodníku [Autorská práce (Microsoft visio)].....	31
Obrázek 17 Podrobnější blokové schéma převodníku [Autorská práce (Microsoft visio)]	32
Obrázek 18 Zapojení mikroprocesoru [Autorská práce (Altium Designer)].....	33
Obrázek 19 Zapojení MAX31865 [Autorská práce (Altium Designer)]	34
Obrázek 20 zapojení ISO224 [Autorská práce (Altium Designer)]	35
Obrázek 21 Odporový dělič [39]	35
Obrázek 22 Zapojení ACS712 [Autorská práce (Altium Designer)]	36
Obrázek 23 Zapojení napájecích obvodů [Autorská práce (Altium Designer)]	36
Obrázek 24 Logický vstup a výstup [Autorská práce (Altium Designer)]	37
Obrázek 25 Zapojení LED [Autorská práce (Altium Designer)]	37
Obrázek 26 Zapojení termistoru [Autorská práce (Altium Designer)].....	38
Obrázek 27 Deska plošných spojů (vrstva Z (top)) [Autorská práce (Altium Designer)].....	38
Obrázek 28 Ilustrativní vyznačení různých napěťových hladin a galvanicky oddělených částí DPS [Autorská práce (Altium Designer)].....	39
Obrázek 29 Informace o připojeném zařízení v programu Microchip Studio	40
Obrázek 30 fotografie z ožívování desky (autorská práce)	41
Obrázek 31 Testovací výstup v programu PuTTY	42
Obrázek 32 fotografie hotové desky (autorská práce).....	43
Obrázek 33 Vývojový diagram[autorská práce (Microsoft Visio)].....	44
Obrázek 34 Diagram zpracování naměřených hodnot [autorská práce (Microsoft Visio)].....	45

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

UART: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USART: Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter
SPI: Serial Peripheral Interface
I2C: Inter-Integrated Circuit
JTAG: Joint Test Action Group
HVP: High Voltage Programming
ADC: Analog Digital Converter
SAR: Successive Approximation Register
SNR: Signal to Noise Ratio
PWM: Pulse Width Modulation
RTD: Resistance Temperature Detector
NTC: Negative Temperature Coefficient
PTC: Positive Temperature Coefficient
LAN: Local Area Network
TCP: Transmission Control Protocol
TELNET: Telecommunications Network
HTTP: Hypertext Transfer Protocol
SSH: Secure Shell
IOT: Internet of Things
IIOT: Industrial Internet of Things
PLC: Programmable Logic Controller
COTS: Commercial Off-The-Shelf
DPS: Deska Plošných Spojů

ÚVOD

V posledních letech se význam monitorování a diagnostiky elektrických a fyzikálních parametrů výrazně zvýšil, zejména v průmyslových aplikacích, kde je spolehlivost a přesnost klíčová. S rozvojem síťových technologií a integrací průmyslového internetu věcí (IIoT) se stává ethernetové připojení standardem pro přenos diagnostických dat díky jeho rychlosti, dostupnosti a možnosti vzdáleného monitorování.

Tato práce se zaměřuje na návrh převodníku pro měření a převod analogových veličin, jako jsou teplota, napětí a proud, do digitální podoby a jejich přenos prostřednictvím ethernetového rozhraní. Tento projekt slouží také jako příprava pro bakalářskou práci na podobné téma, kde bude systém rozšířen o další funkcionality a zahrnut do komplexního návrhu vlastní desky plošných spojů (DPS). Tato práce však neřeší návrh ani výrobu DPS, ale soustředí se na koncepty a řešení pomocí dostupných COTS (commercial off-the-shelf) modulů.

Hlavními cíli této práce jsou návrh funkční architektury zařízení, výběr vhodných komponent, implementace základního softwarového vybavení a testování systému v rámci zvoleného rozsahu provozních podmínek. Tím se zajistí funkčnost a spolehlivost měření při teplotách od -32 °C do 55 °C a při napájení 12–30 V.

1 TEORETICKÁ ČÁST

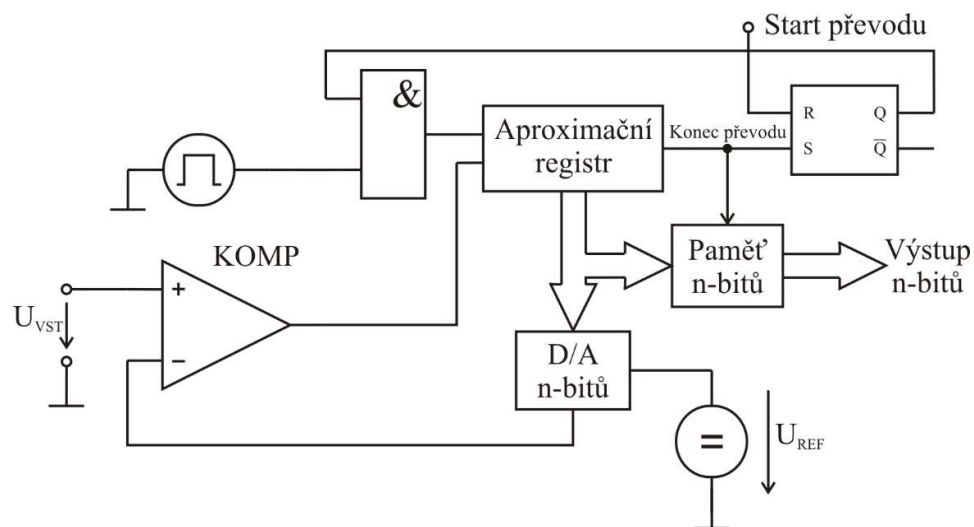
1.1 Analogově-číslicové převodníky

Analogově-číslicové převodníky (ADC) hrají klíčovou roli v průmyslové automatizaci, neboť umožňují převod analogových signálů z různých senzorů na digitální data, která mohou být dále zpracována řídicími systémy. Tento proces je zásadní pro monitorování a řízení průmyslových procesů, kde je nezbytné přesné a rychlé měření fyzikálních veličin.[1]

ADC převodníky fungují na principu vzorkování a kvantování analogového signálu. Vzorkování představuje periodické snímání hodnoty signálu v určitých časových intervalech, přičemž vzorkovací frekvence musí být alespoň dvojnásobkem nejvyšší frekvence obsažené v signálu, aby nedocházelo ke zkreslení (aliasing). Kvantování pak přiřazuje každému vzorku diskrétní hodnotu na základě předem definovaných úrovní, což vede k určité kvantizační chybě.

Existuje několik typů ADC převodníků, které se liší principem činnosti a oblastí použití:

- Převodníky s postupnou aproximací (SAR): Tyto převodníky provádějí převod analogového signálu na digitální postupným porovnáváním vstupního napětí s referenčními hodnotami. Jsou charakteristické rychlou dobou převodu (řádově desítky mikrosekund) a vysokou přesností, což je činí vhodnými pro aplikace vyžadující rychlé a přesné měření.



Obrázek 1 Převodník s postupnou aproximací [1]

- Integrační převodníky: Pracují na principu integrace vstupního signálu po stanovenou dobu a následného měření dosažené hodnoty. Jsou méně citlivé na šum a vhodné pro měření pomalu se měnících signálů, avšak jejich doba převodu je delší.
- Sigma-delta převodníky: Využívají techniku převzorkování a digitální filtraci k dosažení vysokého rozlišení a přesnosti. Jsou ideální pro aplikace, kde je požadováno velmi vysoké rozlišení, avšak za cenu delší doby převodu.

Při výběru vhodného ADC převodníku pro průmyslovou automatizaci je třeba zvážit několik klíčových parametrů:

- Rozlišení: Udává počet bitů, kterými je reprezentován digitalizovaný signál. Vyšší rozlišení umožňuje přesnější měření, avšak může zvýšit nároky na zpracování dat.
- Rychlost převodu: Definuje, jak rychle může převodník zpracovat vstupní signál. Pro dynamické procesy je nezbytná vysoká rychlost převodu.
- Linearita: Vyjadřuje, jak přesně výstupní digitální hodnota odpovídá skutečné hodnotě vstupního analogového signálu.
- Odstup signálu od šumu (SNR): Vyšší SNR zajišťuje lepší kvalitu měření tím, že minimalizuje vliv šumu na přesnost převodu.

Správná volba ADC převodníku je zásadní pro efektivní fungování automatizačních systémů, neboť přímo ovlivňuje kvalitu a spolehlivost získávaných dat, a tím i celkovou výkonnost průmyslových procesů. [2]

1.1.1 Analogově-číslicové převodníky v průmyslu

V průmyslové diagnostice hrají specializované analogově-digitální převodníky (ADC) zásadní roli při monitorování a analýze různých procesů. Tyto převodníky umožňují přesný převod analogových signálů z různých senzorů na digitální data, která lze dále zpracovávat a analyzovat. Díky tomu je možné efektivně sledovat stav zařízení, identifikovat potenciální problémy a optimalizovat provozní procesy.

Na trhu je k dispozici několik ADC modulů navržených speciálně pro průmyslovou diagnostiku:

- Moduly ADAM od společnosti Advantech: Tyto moduly jsou určeny pro vzdálené měření a sběr dat. Nabízejí připojení přes sběrnice RS-485, Ethernet nebo bezdrátově, což umožňuje flexibilní integraci do různých systémů. Jsou ideální pro aplikace vyžadující spolehlivý sběr dat na velké vzdálenosti. [3]



Obrázek 2 Advantech Adam 6015[4]

- ADS1115 od Texas Instruments: Jedná se o 16bitový ADC modul s 4 kanály a programovatelným zesílením. Komunikuje přes I2C rozhraní a je vhodný pro mikrokontrolery bez vestavěného ADC nebo pro aplikace vyžadující vyšší rozlišení.

Jeho kompaktní design a nízká spotřeba energie ho činí ideálním pro mobilní a vestavěné systémy. [5]

- ADC0804: Tento 8bitový převodník s postupnou aproximací je známý svou efektivitou a rychlostí, s dobou přístupu 135 ns. Je vhodný pro rychlou konverzi analogových signálů na digitální data v různých oblastech, od spotřební elektroniky po průmyslovou automatizaci.[6]

1.2 Mikrokontrolery

Mikrokontrolery jsou všestranná integrovaná zařízení, která kombinují funkce procesoru, paměti a vstupně-výstupních periférií na jednom čipu. Díky své kompaktnosti a přizpůsobitelnosti jsou mikrokontrolery základem moderní průmyslové automatizace, spotřební elektroniky a systémů IoT (Internet věcí). Umožňují realizaci řízení a monitorování systémů, často v reálném čase, s minimálními náklady na hardware a energii.[7]



Obrázek 3 Atmega32 a Atmega8 [8]

Využívají se k řízení specifických funkcí zařízení nebo systémů. Jsou navrženy tak, aby prováděly přesně definované úlohy, což zajišťuje jejich efektivitu a nízkou spotřebu energie. Typické aplikace mikrokontrolerů zahrnují řízení motorů, měření fyzikálních veličin, zpracování dat ze senzorů a komunikaci mezi zařízeními.

Příklady využití:

- Průmyslová automatizace: Monitorování stavu strojů, regulace teploty, tlaku nebo vlhkosti.
- Spotřební elektronika: Ovládání domácích spotřebičů, jako jsou pračky, mikrovlnné trouby nebo klimatizace.
- Automobilový průmysl: Řízení motorů, airbagů, brzdových systémů a dalších klíčových funkcí vozidel.
- IoT: Sběr dat z okolního prostředí, jejich analýza a přenos do cloudových služeb.

Výhody:

- Kompaktnost a integrace: Díky kombinaci procesoru, paměti a periférií na jednom čipu umožňují návrh malých a jednoduchých zařízení.

- Nízká spotřeba energie: Mikrokontrolery jsou navrženy tak, aby spotřebovávaly minimum energie, což je výhodné pro zařízení napájená bateriemi.
- Snadná programovatelnost: Díky dostupným vývojovým nástrojům, jako je Arduino IDE, MPLAB nebo Keil, mohou mikrokontrolery programovat i začátečníci.
- Flexibilita: Široká škála podporovaných komunikačních protokolů (např. UART, SPI, I2C) umožňuje snadnou integraci mikrokontrolerů do složitějších systémů.
- Cenová dostupnost: Mikrokontrolery jsou levné, což umožňuje jejich nasazení i v cenově citlivých projektech.

Nevýhody:

- Omezený výkon: Mikrokontrolery nejsou vhodné pro aplikace vyžadující složité výpočty nebo zpracování velkého objemu dat.
- Kapacita paměti: Integrovaná paměť je omezená, což může být překážkou u složitějších aplikací.
- Specializace: Mikrokontrolery jsou optimalizované pro konkrétní úlohy a nejsou tak univerzální jako plnohodnotné procesory.
- Rychlost: Oproti moderním procesorům mají nižší taktovací frekvenci a zpracování dat probíhá pomaleji.[7]

1.3 Atmega324

ATmega32 je 8bitový mikrokontroler z rodiny AVR od společnosti Microchip Technology. Tento čip, navrženy pro široké spektrum aplikací, integruje procesor, paměť a řadu periférií na jednom čipu. Je ideální pro průmyslové, spotřební i výzkumné aplikace díky své vysoké flexibilitě, výkonu a nízké spotřebě energie.

Mikrokontroler nabízí 32 univerzálních vstupně-výstupních pinů, které jsou rozděleny do čtyř portů (PORTA, PORTB, PORTC, PORTD). Tyto piny mohou být softwarově nakonfigurovány jako digitální vstupy nebo výstupy a podporují i specializované funkce, jako je PWM, sériová komunikace nebo práce s časovači. PORTA navíc slouží jako vstupy pro 10bitový ADC, což umožňuje převod analogových signálů na digitální data pro další zpracování.

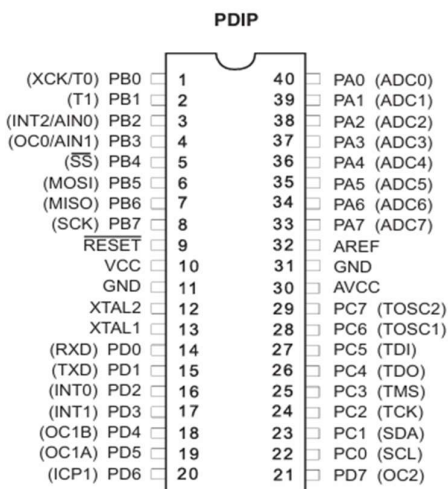
ATmega32 je vybaven 32 kB Flash paměti pro programový kód, 2 kB SRAM pro dynamická data a 1 kB EEPROM pro nevolatilní ukládání informací. Tato kombinace poskytuje dostatečnou kapacitu pro komplexní aplikace a zároveň zajišťuje dlouhou životnost díky vysoké odolnosti vůči přepisům. Mikrokontroler podporuje efektivní přístup k paměti díky architektuře RISC, která umožňuje provádění většiny instrukcí během jednoho cyklu.

Mezi integrované periferie patří 10bitový ADC s osmi kanály, který umožňuje přesné měření analogových signálů. Časovače zahrnují dva 8bitové a jeden 16bitový modul, které podporují širokou škálu funkcí, jako je generování PWM, měření délky pulzu nebo práce s časovým odstupem. Mikrokontroler dále nabízí plně duplexní USART pro sériovou komunikaci, vysokorychlostní SPI a I2C rozhraní pro snadné propojení s externími zařízeními.

ATmega32 podporuje taktovací frekvenci až 16 MHz a umožňuje použití interního RC oscilátoru nebo externího krystalového oscilátoru. Spotřeba energie je optimalizována

prostřednictvím několika úsporných režimů, což zajišťuje dlouhou výdrž při napájení bateriemi. Mikrokontroler je také vybaven watchdog časovačem a detektorem poklesu napětí (BOD), které zvyšují spolehlivost a stabilitu systému.

Díky svému širokému spektru funkcí je ATmega324 oblíbenou volbou pro aplikace zahrnující sběr dat, řízení procesů, IoT nebo automatizaci. Jeho robustní konstrukce a podpora moderních komunikačních rozhraní umožňují snadnou integraci do složitějších systémů, což ho činí univerzálním nástrojem pro vývoj embedded aplikací.[8]



Obrázek 4 Atmega324 pinout[9]

1.3.1 ADC

ADC v ATmega324 je 10bitový převodník, který převádí analogový signál na digitální hodnotu. Tento převodník je typu SAR (Successive Approximation Register), což znamená, že pracuje na principu postupného přibližování, což umožňuje rychlý a přesný převod. ATmega324 disponuje osmi kanály, které lze nakonfigurovat jako single-ended nebo diferenciální vstupy. Podporuje různé zdroje referenčního napětí, včetně interního 2,56 V, což poskytuje flexibilitu při měření.

Maximální rychlost převodu je 15 tisíc vzorků za sekundu (15 kS/s) při plném rozlišení 10 bitů, pokud je mikrokontroler taktován na 16 MHz. Rychlost lze upravit nastavením děliče hodinového signálu ADC, což umožňuje přizpůsobení konkrétním požadavkům aplikace, například kompromis mezi rychlostí a přesností.

ADC v ATmega324 je díky své flexibilitě a výkonu vhodný pro aplikace, jako je sběr dat z analogových senzorů nebo měření signálů v embedded systémech.[9]

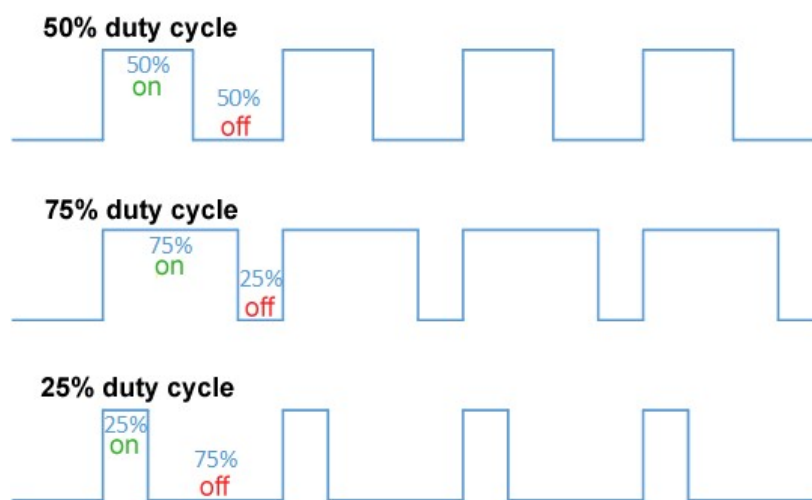
1.3.2 PWM

PWM (Pulse Width Modulation) je metoda řízení výkonu nebo simulace analogového signálu pomocí digitálního výstupu, kde se modulací šířky pulzu nastavuje průměrná hodnota výstupního napětí. Tento přístup je široce využíván pro řízení rychlosti motorů, jasu LED nebo generování zvukových signálů. PWM pracuje s konstantní frekvencí, přičemž poměr doby, kdy

je signál v logické úrovni HIGH vůči LOW, určuje tzv. duty cycle. Například při duty cycle 50 % je výstupní průměrné napětí polovinou napájecího napětí.

Mikrokontroler ATmega324 podporuje PWM prostřednictvím tří integrovaných časovačů (dva 8bitové a jeden 16bitový), které umožňují generování PWM signálu na specifických výstupech (např. OC0, OC1A, OC1B). Nabízí režimy Fast PWM pro vysokorychlostní aplikace a Phase Correct PWM, který zajišťuje symetrii signálu. Frekvence i šířka pulzu jsou nastavitelné prostřednictvím registrů, což zajišťuje flexibilitu použití.

Na platformě Arduino (např. model Uno) je PWM dostupné na vybraných digitálních pinech a snadno ovladatelné funkcí `analogWrite()`. Výhodou PWM je vysoká účinnost, protože při řízení výkonu nedochází ke ztrátám energie jako u rezistorových regulátorů. Přestože PWM vyžaduje digitální obvody a časování, je snadno implementovatelné a představuje spolehlivé řešení pro řízení výkonu v embedded systémech.[9]



Obrázek 5 Příklad PWM signálů[15]

1.3.3 Programování Atmega324

Programování mikrokontroleru ATmega324PA lze realizovat několika způsoby, v závislosti na dostupném vybavení, konfiguraci cílového systému a požadavcích na ladění nebo hromadné nahrávání. Tento mikrokontroler od společnosti Microchip (dříve Atmel) nabízí standardní možnosti programování známé z AVR rodiny – především ISP (In-System Programming), JTAG, případně High Voltage Programming (HVP) pro případy, kdy dojde k zablokování programovacích pinů.[11]

ISP (In-System Programming) je nejčastěji používaná technika programování AVR mikrokontrolerů. Probíhá sériově pomocí pinů MOSI, MISO, SCK, RESET a GND. Výhodou ISP je jednoduché zapojení a možnost programování přímo na osazené desce bez nutnosti vyjmutí čipu. ISP umožňuje nejen nahrávání firmware, ale i konfiguraci tzv. fuse bitů, které ovlivňují chování mikrokontroleru (např. zdroj hodin, deaktivace resetu, povolení JTAG atd.). ISP neumožňuje ladění programu v reálném čase, ale je ideální pro vývoj a výrobu.

JTAG rozhraní poskytuje kromě možnosti nahrání programu i plnohodnotný debug, včetně krokování kódu, nastavování breakpointů a čtení/zápisu do paměti i registrů za běhu. Programování probíhá přes piny TDI, TDO, TCK, TMS, přičemž je nutné, aby nebyl JTAG

vypnut fuse bitem. JTAG se využívá zejména při vývoji složitějších aplikací, kde je potřeba detailní ladění. Příkladem nástroje využívajícího JTAG je Atmel-ICE.

Další možností je High Voltage Programming (HVP), která se používá především v případech, kdy je potřeba resetovat fuse bity nebo znovu zpřístupnit zablokované rozhraní. Tato metoda vyžaduje vyšší napětí na pinu RESET (12 V) a speciální programátor. V praxi se využívá jen výjimečně.[11]

Kromě fyzického propojení je potřeba také softwarová podpora. Společnost Microchip poskytuje vývojové prostředí Microchip Studio (dříve Atmel Studio), které podporuje jak ISP, tak JTAG a HVP. Alternativně lze využít open-source nástroje jako AVRDUDE, často ve spojení s programátory typu USBasp nebo USBtiny.

1.3.4 Atmel ICE

Atmel-ICE je univerzální programátor a debugger vyvinutý společností Microchip pro mikrokontrolery řady AVR a ARM Cortex-M. Umožňuje jak programování, tak ladění kódu v reálném čase prostřednictvím rozhraní ISP, JTAG, SWD, PDI nebo UPDI, v závislosti na typu cílového zařízení.

Pro mikrokontrolery AVR, jako je ATmega324PA, poskytuje Atmel-ICE podporu pro ISP i JTAG, což umožňuje jak nahrávání firmware, tak krokování programu, nastavení breakpointů a přímý přístup do paměti a registrů. Zařízení se integruje s vývojovým prostředím Microchip Studio, kde poskytuje plnohodnotné ladicí funkce. Je vhodné pro vývoj, testování i finální programování zařízení v sériové výrobě.[12]



Obrázek 6 Atmel ICE [10]

1.4 Komunikační rozhraní

V návrhu zařízení jsou využita různá komunikační rozhraní, která zajišťují výměnu dat mezi mikrokontrolérem a připojenými periferiemi či nadřazeným systémem. Každé z těchto rozhraní je určeno pro specifický účel – od ladění a programování zařízení, přes komunikaci s analogovými obvody, až po přenos dat do počítačové sítě. Mikrokontrolér ATmega324PA umožňuje využití více nezávislých periferií, jako je SPI pro rychlou komunikaci s integrovanými obvody, USART pro sériovou komunikaci s ethernetovým modulem XPort, a JTAG pro účely programování a ladění firmwaru. V případě potřeby je možné systém dále rozšířit o komunikaci prostřednictvím Ethernetu, což zajišťuje přístup k datům na vyšší síťové

úrovni. V této kapitole jsou jednotlivá rozhraní popsána z hlediska jejich funkce v systému a konkrétní implementace.

1.4.1 SPI

SPI (Serial Peripheral Interface) je synchronní sériová komunikační sběrnice, která umožňuje rychlou výměnu dat mezi mikrokontrolerem a periferními zařízeními. Tato sběrnice je navržena tak, aby podporovala full-duplexní přenos, což znamená, že data mohou být současně odesílána i přijímána. SPI se široce využívá v embedded systémech pro komunikaci s externími zařízeními, jako jsou senzory, paměťové moduly, displeje nebo další mikrokontrolery.

SPI funguje na principu master-slave architektury, kde jedno zařízení (master) řídí komunikaci a může ovládat jedno nebo více zařízení typu slave. Komunikace probíhá pomocí čtyř hlavních signálů:

- SCK (Serial Clock): Hodinový signál generovaný zařízením master, synchronizuje přenos dat.
- MOSI (Master Out, Slave In): Linka, po které master odesílá data do slave zařízení.
- MISO (Master In, Slave Out): Linka, po které slave zařízení odesílá data do master zařízení.
- SS (Slave Select): Signál, kterým master vybírá konkrétní slave zařízení. Pokud je více slave zařízení, každé má svůj vlastní SS pin.

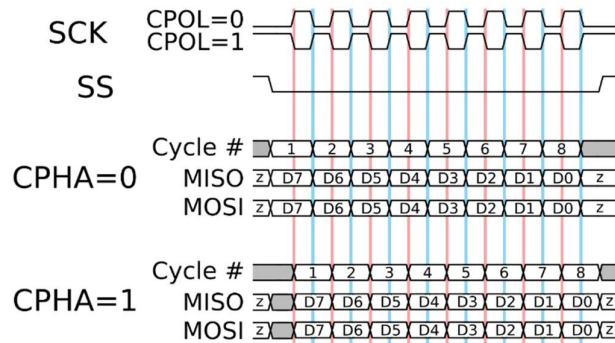
Hodinový signál SCK určuje rychlost přenosu dat. Data jsou přenášena po bitech, a to buď v režimu MSB (nejvýznamnější bit první), nebo LSB (nejméně významný bit první), což se nastavuje v konfiguraci SPI.

Výhody:

- Vysoká rychlost přenosu: SPI je vhodné pro aplikace, které vyžadují rychlou komunikaci.
- Full-duplexní přenos: Umožňuje současné odesílání a přijímání dat.
- Jednoduchá implementace: SPI nevyžaduje složitý protokol, což zjednodušuje vývoj.
- Flexibilita: Lze připojit více slave zařízení k jednomu master zařízení.

Nevýhody:

- Více vodičů: Pro každé slave zařízení je potřeba samostatný SS signál.
- Krátká vzdálenost: SPI není navrženo pro komunikaci na dlouhé vzdálenosti.
- Není standardizované: Různá zařízení mohou používat odlišné konfigurace SPI (např. polarita a fáze hodinového signálu), což vyžaduje jejich sladění.



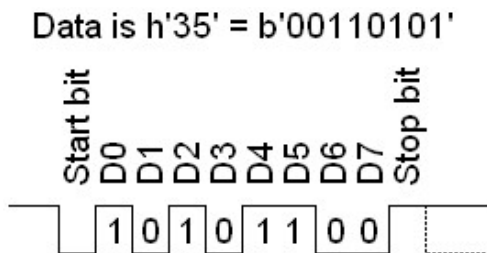
Obrázek 7 Časový diagram SPI komunikace[13]

1.4.2 USART

USART (Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter) je univerzální sériové komunikační rozhraní, které umožňuje výměnu dat mezi zařízeními. Podporuje dva režimy: asynchronní (běžně označovaný jako UART), kde komunikace probíhá bez hodinového signálu, a synchronní, kde se přenos řídí sdíleným hodinovým signálem.

V asynchronním režimu se data přenáší po dvou vodičích – TX (transmit) a RX (receive) – a synchronizace probíhá pomocí start a stop bitu. V synchronním režimu je navíc použit signál hodin (CLK nebo SCK), který řídí načítání a odesílání bitů mezi zařízeními.

USART je běžně využíván v mikrokontrolerech, počítačích a vestavných systémech pro komunikaci s modemy, senzory, jinými mikrokontrolery, počítačem nebo převodníky (např. USB-UART). Výhodou je jednoduchá implementace a nízká rezie při přenosu. Přenosová rychlost (baud rate), počet datových bitů, parita a stop bity jsou nastavitelné podle požadavků konkrétní aplikace. [16]



Obrázek 8 Asynchronní 8bitový přenos[18]

1.4.3 JTAG

JTAG (Joint Test Action Group) je standardizované rozhraní pro testování, ladění a programování integrovaných obvodů, známé také jako IEEE 1149.1. Byl původně vyvinut pro testování spojů na deskách plošných spojů (PCB), ale dnes se běžně využívá také pro programování mikrokontrolerů, ladění běhu programu v reálném čase (debugging) nebo přímý přístup k interním registrům.

JTAG pracuje sériově, což minimalizuje počet potřebných pinů. Základní rozhraní tvoří signály TDI (Test Data In), TDO (Test Data Out), TCK (Test Clock) a TMS (Test Mode Select). Některá zařízení navíc využívají signál TRST pro resetování JTAG logiky. Pomocí těchto

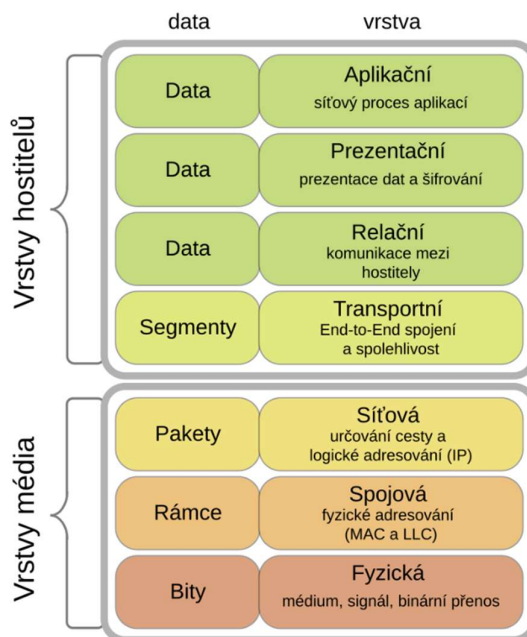
signálů lze řetězit více zařízení do tzv. JTAG řetězce (daisy-chain) a ovládat je z jednoho hlavního programátoru nebo debuggeru.[20]

Na mikrokontrolerech, jako je například ATmega324PA, umožňuje JTAG rozhraní nejen čtení a zápis do paměti programu i dat, ale také ladění programu krok po kroku, nastavování breakpointů nebo sledování běhu kódu v reálném čase. Díky tomu je JTAG neocenitelný nástroj při vývoji a diagnostice embedded systémů. K jeho použití je obvykle potřeba speciální programátor nebo debugger (např. AVR JTAG ICE nebo Atmel-ICE).[21]

1.4.4 Ethernet

Ethernet je komunikační technologie původně vyvinutá pro lokální počítačové sítě (LAN), která se postupně stala základem moderních průmyslových komunikačních systémů. Díky své spolehlivosti, flexibilitě a široké podpoře je Ethernet ideální volbou pro přenos dat v automatizovaných výrobních procesech, monitorování a diagnostiku průmyslových zařízení. Umožňuje přenos dat mezi zařízeními prostřednictvím standardizovaných rámců, které definují strukturu dat a způsob jejich přenosu. Pracuje na modelu OSI kde pokrývá zejména dvě nejnižší vrstvy:

Model ISO/OSI (Open Systems Interconnection) je referenční rámec pro popis síťové komunikace mezi dvěma systémy. Je rozdělen do sedmi vrstev, z nichž každá má specifickou funkci – od fyzického přenosu dat až po aplikační podporu pro uživatele. Jednotlivé vrstvy jsou: fyzická, spojová, síťová, transportní, relační, prezentační a aplikační. Tento model slouží jako teoretický základ pro návrh síťových protokolů a pomáhá při analýze, návrhu i řešení problémů v síťové komunikaci. Například ethernet se nachází ve fyzické a spojové vrstvě, zatímco protokoly jako TCP či HTTP působí ve vrstvách vyšších. Model OSI není sice v praxi implementován jako celek, ale jeho principy jsou široce využívány při vývoji a standardizaci síťových technologií.[22]



Obrázek 9 Model ISO/OSI[23]

1.4.5 Využití ethernetu v průmyslu

V průmyslovém prostředí je běžně používán Ethernet s protokoly přizpůsobenými specifickým požadavkům na výkon, spolehlivost a nízkou latenci. Mezi nejdůležitější protokoly patří:

- Modbus/TCP: Protokol pro komunikaci mezi průmyslovými zařízeními, jako jsou PLC (programmable logic controllers) nebo HMI (human-machine interfaces). Je jednoduchý a široce podporovaný.
- EtherCAT: Vysokorychlostní protokol optimalizovaný pro aplikace v reálném čase, například řízení motorů nebo robotiku.
- Profinet: Standard pro průmyslové sítě umožňující synchronizaci a přenos dat mezi automatizačními zařízeními.
- EtherNet/IP: Protokol využívající TCP/IP pro komunikaci v průmyslových sítích, vhodný pro připojení zařízení od různých výrobců.
- SNMP (Simple Network Management Protocol): Používá se pro monitorování a správu síťových zařízení, včetně diagnostiky a zjišťování problémů.

Ethernet je díky své standardizaci, vysoké rychlosti přenosu a škálovatelnosti jednou z nejpoužívanějších technologií pro průmyslovou komunikaci. Mezi jeho hlavní výhody patří snadná rozšiřitelnost, kompatibilita mezi zařízeními od různých výrobců a možnost připojení velkého množství uzlů v různých topologiích. V průmyslovém prostředí zajišťují speciální protokoly, jako EtherCAT nebo Profinet, nízkou latenci a spolehlivost. Přesto má Ethernet i své nevýhody, jako je náchylnost ke ztrátě paketů v elektromagneticky znečištěném prostředí nebo závislost na kvalitě kabeláže, což může způsobit výpadky. Omezená podpora reálného času u standardního Ethernetu je rovněž překážkou, kterou řeší až specifické průmyslové varianty. Celkově však Ethernet představuje klíčovou technologii pro moderní průmyslovou automatizaci díky své flexibilitě, spolehlivosti a široké podpoře v různých aplikacích.[24] [25]

1.4.6 Telnet

Telecommunication Network) je textově orientovaný síťový protokol používaný pro vzdálený přístup k zařízení prostřednictvím příkazové řádky. Pracuje na transportní vrstvě TCP/IP a využívá výchozí port 23. Telnet umožňuje připojit se k serveru nebo zařízení, odesílat příkazy a přijímat odpovědi v reálném čase. Jeho hlavní využití spočívá v diagnostice, konfiguraci a ovládání zařízení, zejména v prostředích bez grafického rozhraní. Funguje na principu klient-server a je podporován prakticky všemi operačními systémy i vestavěnými systémy s ethernetovým rozhraním.[26]

V kontextu embedded systémů a mikrokontrolerů je Telnet cenným nástrojem pro jednoduchou vzdálenou správu bez nutnosti složitých webových rozhraní. Umožňuje např. zobrazit aktuální stav zařízení, provést základní konfiguraci nebo odesílat řídicí příkazy. Díky nízkým nárokům na výpočetní výkon je vhodný i pro zařízení s omezenými prostředky.

Nevýhodou Telnetu je absence šifrování, což znamená, že všechna data (včetně hesel) jsou přenášena v otevřeném textu. Z tohoto důvodu je v bezpečnostně citlivých aplikacích nahrazován modernějšími protokoly, jako je SSH (Secure Shell), který poskytuje šifrovanou komunikaci.[26]

1.4.7 Lantronix Xport

Lantronix XPort je kompaktní vestavěný ethernetový modul, který umožňuje snadné připojení zařízení k síti TCP/IP. Integruje síťový hardware a software do jednoho malého modulu, což usnadňuje vývoj síťových aplikací bez nutnosti rozsáhlé znalosti síťového programování. XPort obsahuje vestavěný webový server a podporuje různé síťové protokoly, čímž poskytuje flexibilní řešení pro vzdálenou správu zařízení.

Modul podporuje 10/100 Mbps Ethernet s vestavěným TCP/IP stackem a rozhraním pro sériovou komunikaci (UART). Díky tomu je možné jej snadno připojit k mikrokontrolerům a dalším zařízením s minimálními požadavky na úpravy hardware.

XPort obsahuje integrovaný webový server, který umožňuje konfiguraci a správu zařízení prostřednictvím webového prohlížeče. To usnadňuje nastavení a umožňuje vzdálenou kontrolu zařízení bez potřeby speciálního softwaru.

Díky kompaktním rozměrům $33 \times 16,5$ mm lze XPort snadno integrovat do různých zařízení bez velkých úprav. Pracuje s napětím 3,3 V a typickou spotřebou kolem 180 mA, což jej činí energeticky efektivním řešením pro síťovou konektivitu.

Podporuje základní bezpečnostní funkce, jako je šifrování dat a ochrana heslem pro vzdálený přístup, což zajišťuje vyšší úroveň ochrany proti neoprávněnému přístupu. [17]



Obrázek 10 Lantronix Xport[17]

1.5 Měření proudu pomocí mikrokontroleru

Měření proudu pomocí mikrokontroleru, jako je ATmega324, je klíčové pro sledování spotřeby energie, diagnostiku a řízení výkonových obvodů. Nejčastěji se využívá snímací odpor, který převádí proud na úbytek napětí měřitelný ADC, nebo senzory na bázi Hallova jevu pro bezkontaktní měření. Alternativou jsou integrované senzory, jako INA219, které poskytují digitální výstup přes I2C a měří nejen proud, ale i napětí a výkon.

Mikrokontrolery s integrovaným ADC umožňují přesné převody analogového signálu na digitální hodnotu, přičemž přesnost závisí na rozlišení ADC a kvalitě referenčního napětí. Díky flexibilitě mikrokontrolerů lze data dále zpracovávat, kalibrovat a využívat pro řízení procesů. Přesto mají omezený rozsah napětí a vyžadují dodatečné obvody pro měření vyšších proudů. Kombinace snímacího odporu nebo digitálních senzorů s mikrokontrolerem poskytuje spolehlivé a flexibilní řešení pro embedded aplikace.

1.5.1 ACS712

ACS712 je oblíbený proudový senzor navržený společností Allegro Microsystems, který umožňuje měření střídavého (AC) i stejnosměrného (DC) proudu. Senzor pracuje na principu Hallova jevu, kdy magnetické pole generované proudem procházejícím měřicím obvodem ovlivňuje Hallovu desku integrovanou v čipu. Tento efekt je převeden na napěťový signál úměrný měřenému proudu.

Klíčové vlastnosti:

- Rozsah měření: Dostupné varianty ACS712 zahrnují modely s rozsahy ± 5 A, ± 20 A a ± 30 A.
- Výstupní signál: Analogový výstup, který je lineárně úměrný proudu. Středová hodnota (2,5 V) odpovídá nulovému proudu, zatímco kladné a záporné odchylky indikují směr a velikost proudu.
- Izolace: Senzor poskytuje galvanické oddělení mezi měřeným obvodem a výstupem, což zvyšuje bezpečnost při práci s vysokým napětím.
- Napájení: Pracuje při napětí 5 V s nízkou spotřebou energie (typicky 10 mA).
- Přesnost: Přesnost měření je ovlivněna okolní teplotou a šumem, přičemž je vhodné jej kalibrovat pro konkrétní aplikaci.[27]



Obrázek 11 ACS712[28]

1.6 Měření teploty

Měření teploty je jednou z nejčastějších úloh v embedded systémech, používané v průmyslové automatizaci, domácí automatizaci nebo IoT. Mikrokontrolery hrají klíčovou roli při zpracování dat z teplotních senzorů, což umožňuje monitorování a řízení procesů v reálném čase.

Měření teploty lze realizovat různými typy senzorů, z nichž každý je vhodný pro specifické aplikace:

- termistory: Rezistory, jejichž odpor se mění s teplotou. Jsou cenově dostupné a citlivé, avšak vhodné spíše pro menší teplotní rozsahy.

- RTD (Resistance Temperature Detectors): Vysoce přesné rezistory, např. Pt100 nebo Pt1000, s lineární závislostí odporu na teplotě. Používají se v průmyslu díky své přesnosti a stabilitě.
- Termočlánky: Vytvářejí napětí úměrné teplotě na základě Seebeckova jevu. Jsou vhodné pro velmi vysoké teploty, ale vyžadují kompenzaci studeného spoje.
- Polovodičové senzory: Například LM35 nebo TMP36, poskytují analogový výstup přímo úměrný teplotě, což usnadňuje jejich integraci s ADC mikrokontroleru.
- Digitální teplotní senzory: Jako DS18B20 poskytují teplotní data přímo ve formě digitálního výstupu (např. přes sběrnici 1-Wire), což eliminuje potřebu převodu analogového signálu.

1.6.1 Termistory

Termistory jsou teplotně závislé rezistory, jejichž odpor se výrazně mění s teplotou. Využívají se především pro měření, řízení nebo kompenzaci teploty v různých elektronických obvodech. Existují dva základní typy: NTC (Negative Temperature Coefficient), u kterých odpor s rostoucí teplotou klesá, a PTC (Positive Temperature Coefficient), u kterých odpor s teplotou naopak roste. [29]

NTC termistory se nejčastěji používají pro přesné měření teploty v rozsahu přibližně -50 °C až $+150\text{ °C}$. Jsou levné, malé a velmi citlivé, což je činí ideálními pro spotřební elektroniku, bateriové systémy nebo senzory prostředí. Měření probíhá pomocí děliče napětí a převodu signálu přes ADC mikrokontroleru. Nevýhodou NTC je jejich nelineární charakteristika, což vyžaduje kalibraci nebo kompenzaci výpočtem (např. pomocí Steinhart–Hartovy rovnice). [29]

PTC termistory se využívají častěji jako ochranné prvky – např. pro omezení náběhového proudu, jako samoresetovací pojistky nebo detektory přehřátí.

Na rozdíl od odporových teploměrů (RTD), jako je Pt1000, jsou termistory méně přesné, ale zároveň rychlejší, levnější a jednodušší na zapojení. Pro aplikace, kde je důležitá rychlá odezva a cena, jsou velmi vhodnou volbou.

1.6.2 Platinové teploměry

Platinové teploměry (RTD) jsou vysoce přesné senzory využívající změnu odporu platinového elementu v závislosti na teplotě. Jsou široce používány v průmyslových a laboratorních aplikacích díky své přesnosti, stabilitě a širokému rozsahu měření (-200 °C až $+850\text{ °C}$). Nejčastěji používané verze jsou Pt100 a Pt1000, kde odpor při 0 °C je $100\ \Omega$, respektive $1000\ \Omega$. Jejich téměř lineární závislost odporu na teplotě usnadňuje zpracování dat, zatímco dlouhodobá stabilita a chemická odolnost je činí vhodnými pro náročné podmínky. Nevýhodou je vyšší cena platiny a citlivost na mechanické poškození, což vyžaduje opatrnou manipulaci.

V kombinaci s mikrokontrolery se platinové teploměry připojují pomocí Wheatstoneova můstku a zesilovačů pro přesné měření malých změn odporu. Alternativně lze použít integrované obvody, jako MAX31865, které zjednodušují převod na digitální výstup a komunikaci přes SPI. Díky své přesnosti a spolehlivosti nacházejí tyto senzory uplatnění v chemickém průmyslu, potravinářství, laboratorních experimentech i dalších aplikacích vyžadujících kontrolu teploty. Platinové teploměry jsou zlatým standardem pro měření teploty, kde je kvalita měření klíčová. [30]



Obrázek 12 Teplotní čidlo PT1000[19]

1.6.3 Max31865

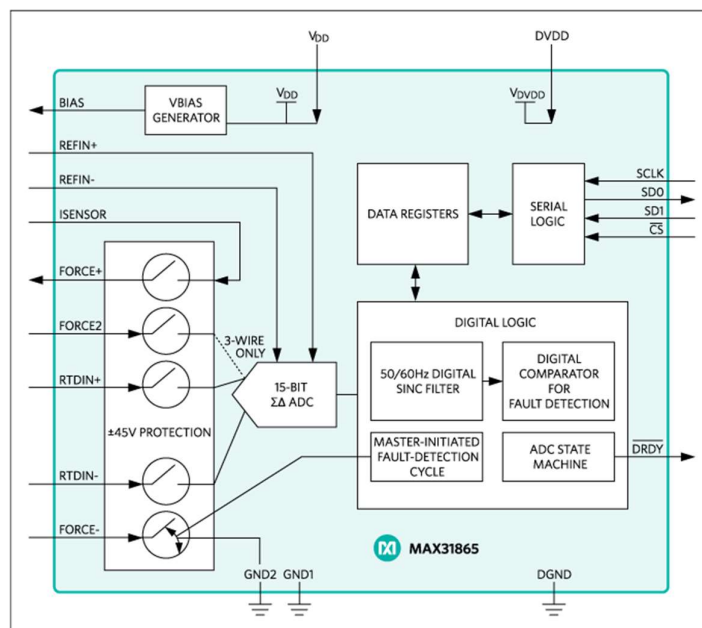
MAX31865 je integrovaný obvod navržený speciálně pro přesné měření teploty pomocí platinových teploměrů (RTD), jako jsou Pt100 a Pt1000. Tento čip převádí odpor RTD na digitální hodnoty, čímž výrazně zjednodušuje návrh měřicího systému a integraci do mikrokontrolerů. MAX31865 podporuje 2-, 3- i 4-vodičové zapojení RTD, což umožňuje kompenzovat chyby způsobené odporem připojovacích vodičů. [31]

Klíčové vlastnosti:

- Kompatibilita s RTD: Podpora platinových teploměrů Pt100 a Pt1000.
- Rozhraní: Digitální komunikace přes SPI, což zajišťuje snadné propojení s mikrokontrolery.
- Teplotní rozsah: Schopnost měřit teploty odpovídající rozsahu RTD (-200 °C až +850 °C).
- Integrovaná diagnostika: Detekce zkratu, přerušení vodiče a dalších chyb.
- Napájení: Pracuje s napětím v rozsahu 3,3 V až 5 V.
- Jednoduchá kalibrace: Interní 15bitový ADC poskytuje dostatečně přesné měření bez potřeby složité kalibrace.

MAX31865 je vybaven integrovaným vztažným odporem (ref. resistor), který zajišťuje přesná a stabilní měření. Data jsou přenášena přes SPI, což umožňuje rychlou a spolehlivou komunikaci s mikrokontrolery, jako je ATmega32 nebo Arduino. Diagnostické funkce navíc umožňují detekci chyb, jako je přerušení nebo zkrat vodičů, což je klíčové v průmyslových aplikacích. [31]

MAX31865 nachází využití v aplikacích vyžadujících vysokou přesnost a stabilitu, například v průmyslových procesech, laboratorních experimentech nebo řízení klimatizačních systémů. Díky své snadné implementaci a podpoře standardizovaných RTD senzorů zjednodušuje návrh měřicích systémů a zajišťuje spolehlivá a přesná měření teploty. Tento převodník je ideálním řešením pro projekty, které kombinují mikrokontrolery a platinové teploměry.[31]



Obrázek 13 Blokové schéma MAX31865 [31]

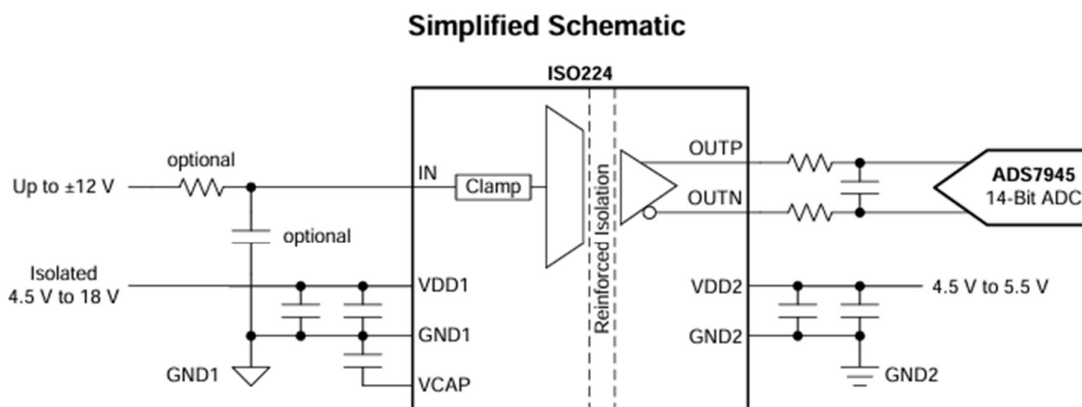
1.7 Měření napětí

Měření napětí pomocí mikrokontroleru je běžnou součástí mnoha embedded aplikací, a mikrokontroler ATmega324PA k tomu nabízí integrovaný 10bitový analogově-digitální převodník (ADC) s vícekanálovým vstupem. Tento převodník umožňuje převést analogové napětí v rozsahu 0 V až 5V (podle referenčního napětí) na digitální hodnotu, kterou lze dále zpracovat v programu. Pro napětí mimo rozsah mikrokontroleru je možné použít dělič napětí. Pokud má být napětí měřeno s vyšší přesností nebo mimo rozsah ADC, je možné využít externí ADC čipy s vyšším rozlišením (např. 12–24 bitů), které komunikují přes I²C nebo SPI.

V případě, že se měří napětí v obvodech s vyšším potenciálem nebo v systémech oddělených od logiky mikrokontroleru, je nutné galvanické oddělení. To zajišťuje bezpečnost a ochranu před přepětím i rušením. Galvanické oddělení se nejčastěji realizuje pomocí izolovaných zesilovačů (např. ISO224) nebo napětíových převodníků s optickým oddělením. Tyto obvody převádějí měřený signál na úroveň vhodnou pro ADC mikrokontroleru, přičemž oddělují země a snižují riziko poškození nebo zkreslení měření. Takto navržený systém zajišťuje bezpečné a přesné měření i v průmyslových aplikacích.

1.7.1 ISO224

ISO224 je precizní izolovaný diferenční zesilovač od společnosti Texas Instruments, určený pro měření napětí ve vysokonapětíových nebo průmyslových systémech, kde je vyžadováno galvanické oddělení. Využívá kapacitní izolační technologii, která umožňuje bezpečný přenos analogového signálu přes izolační bariéru bez přímého elektrického spojení. Zařízení poskytuje jednotkové zesílení a vysokou linearitu, což je ideální pro přímé měření napětí např. na děliči, nebo výstupu senzoru.[32]



Obrázek 14 Zjednodušené schéma ISO224 [33]

1.8 Regulátory a měniče

Měniče a regulátory napětí jsou základní součásti napájecích obvodů v elektronice. Spínané měniče (DC-DC) umožňují efektivní konverzi napětí s vysokou účinností, zatímco lineární regulátory poskytují jednodušší řešení s nižším rušením, ale za cenu vyšší ztrátovosti. Vhodná volba závisí na požadovaném rozsahu vstupního napětí, stabilitě výstupu a dostupném prostoru. Ve vestavných systémech se často kombinuje spínaný měnič pro hrubou regulaci s lineárním stabilizátorem pro citlivé části systému.[34]

1.8.1 TEN4-2411

TEN 4-2411 je izolovaný spínaný DC-DC měnič od společnosti Traco Power, určený pro průmyslové aplikace s požadavkem na široký vstupní napěťový rozsah a vysokou spolehlivost. Nabízí vstupní rozsah 9 až 36 V a stabilní výstupní napětí 5 V při výkonu až 4 W. Díky integrovaným ochranám a filtraci nevyžaduje složitý návrh podpůrných obvodů, což z něj činí vhodné řešení pro kompaktní napájecí systémy s omezeným prostorem. [35]

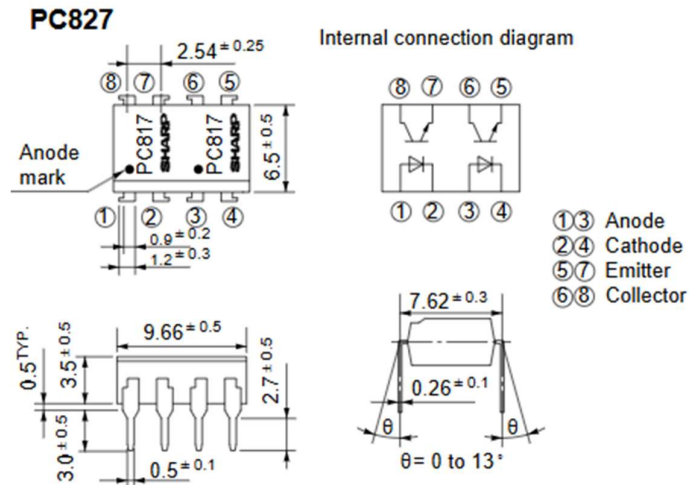
1.8.2 LM3940

LM3940 je lineární nízkonapěťový regulátor od společnosti Texas Instruments, navržený pro převod z 5 V na stabilní výstupní napětí 3,3 V. Je ideální pro aplikace, kde je potřeba napájet nízkonapěťové logické obvody z běžného 5V zdroje. Výhodou tohoto regulátoru je jednoduché zapojení bez nutnosti složitých externích komponent a nízký výstupní šum, což z něj činí vhodnou volbu pro napájení citlivé logiky a analogových částí systému.[36]

1.9 Optočleny

Optočleny (optické izolátory) jsou elektronické součástky sloužící ke galvanickému oddělení mezi dvěma částmi obvodu. Fungují na principu převodu elektrického signálu na světelný a zpět – uvnitř pouzdra je umístěna LED dioda a fototranzistor (případně jiný světlo citlivý prvek). Když na vstupní stranu optočlenu přivedeme proud, LED se rozsvítí a aktivuje výstupní prvek, aniž by došlo k elektrickému propojení. Optočleny se běžně používají pro oddělení logických obvodů od výkonových, pro přenos signálů mezi různými napěťovými úrovněmi nebo jako ochrana proti rušení a přepětí.

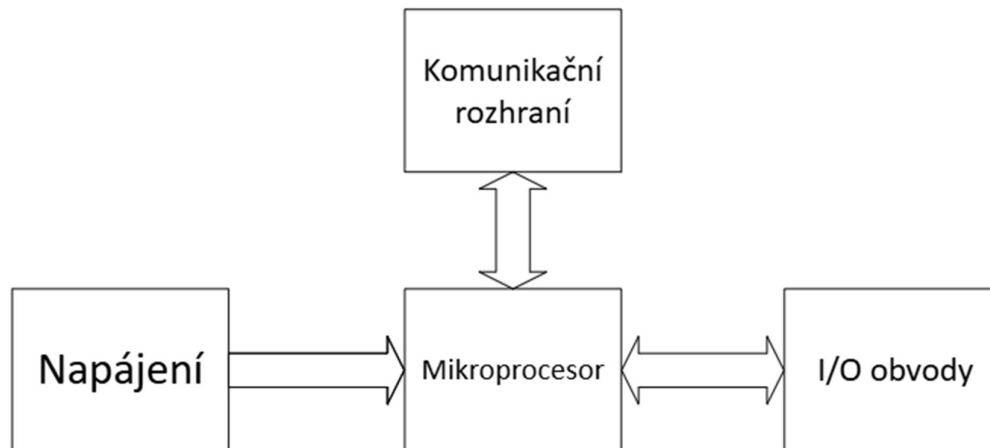
Příkladem je PC827. Čtyřpinový duální optočlen vyráběný společností Sharp (nyní pod značkou LITE-ON), který obsahuje dvě LED diody a dva fototranzistory v jednom pouzdře. Je určen pro nízkorychlostní signálové přenosy a často se používá v automatizačních, komunikačních nebo izolačních aplikacích. Díky jednoduchému zapojení, vysoké izolační pevnosti a spolehlivosti je vhodný pro oddělení mikrokontrolerů od relé, logických vstupů nebo dalších zařízení pracujících na jiném potenciálu.[37]



Obrázek 15 Optočlen PC827 [38]

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Návrh zařízení

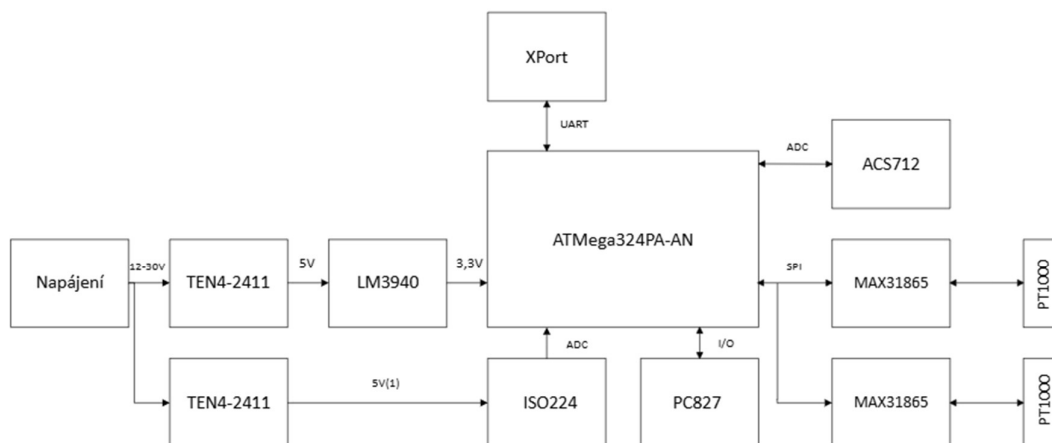


Obrázek 16 Jednoduché blokové schéma převodníku [Autorská práce (Microsofti visio)]

Na Obrázku 16 jsou vyznačeny základní části ze kterých se převodník skládá. Hlavní součástí je mikroprocesor, který ovládá vstupní výstupní obvody a komunikuje s ethernetovým modulem. I/O obvody zařizují měření požadovaných veličin a tyto výsledky posílají do mikroprocesoru který je zpracuje a následně odešle na komunikační rozhraní.

Na Obrázku 17 jsou vidět jednotlivé bloky podrobněji a z jakých součástek se skládají. Napájení je zajištěno pomocí dvou DC-DC měničů TEN4-2411 od společnosti Traco Power zvolených pro jejich velmi velký rozsah vstupního napětí, velký jmenovitý výkon a integraci filtrace díky které nepotřebují žádné podpůrné obvody. Důvod nutnosti použít dva je dán požadavkem na galvanické oddělení měřených veličin a logických výstupů. Regulátor napětí LM3940 od společnosti Texas Instruments byl zvolen pro jeho jednoduchost a také že při plném výkonu nepotřebuje žádné chlazení. Mikroprocesor ATmega324PA-AN od společnosti Microchip byl zvolen pro svou nízkou spotřebu, širokou podporu vývojových nástrojů a bohatou sadu periférií. Poskytuje několik sériových rozhraní a analogově-digitální převodník, což umožňuje zpracování signálů. Lantronix XPort byl zvolen pro svou kompaktnost, nízkou spotřebu a snadnou integraci. Tento modul poskytuje kompletní ethernetovou konektivitu v pouzdře velikosti konektoru RJ45, což minimalizuje nároky na prostor. Podpora standardních protokolů, jako je TCP/IP a HTTP, usnadňuje komunikaci s dalšími systémy. MAX31865 byl zvolen pro svou specializaci na měření odporových teplotních čidel PT1000, s vysokou přesností. Jeho podpora 2-, 3- a 4-vodičového zapojení zjednodušuje návrh obvodu a eliminuje potřebu externí kompenzace. Díky podpoře SPI komunikace je snadné jej integrovat s mikrokontrolery. ACS712 byl zvolen schopnost měřit střídavý i stejnosměrný proud s galvanickým oddělením. Princip Hallova jevu umožňuje bezkontaktní měření bez zásahu do obvodu. Lineární analogový výstup usnadňuje převod na digitální hodnoty pomocí ADC mikrokontroleru. ISO224 byl vybrán jako izolovaný operační zesilovač určený pro precizní

měření napětí v aplikacích s požadavkem na galvanické oddělení. Jeho vysoká přesnost a stabilita umožňují přesný přenos signálů i v průmyslových podmínkách. PC827 byl vybrán jako optočlen pro bezpečné oddělení logických signálů mezi částmi obvodu pracujícími na různých napětích. Poskytuje spolehlivou izolaci a chrání citlivé části elektroniky před rušením a přepětím. Díky dvojitému kanálu umožňuje efektivní přenos dvou nezávislých signálů v kompaktním provedení. Nízká spotřeba a dlouhá životnost přispívají k jeho vhodnosti pro průmyslové nasazení.

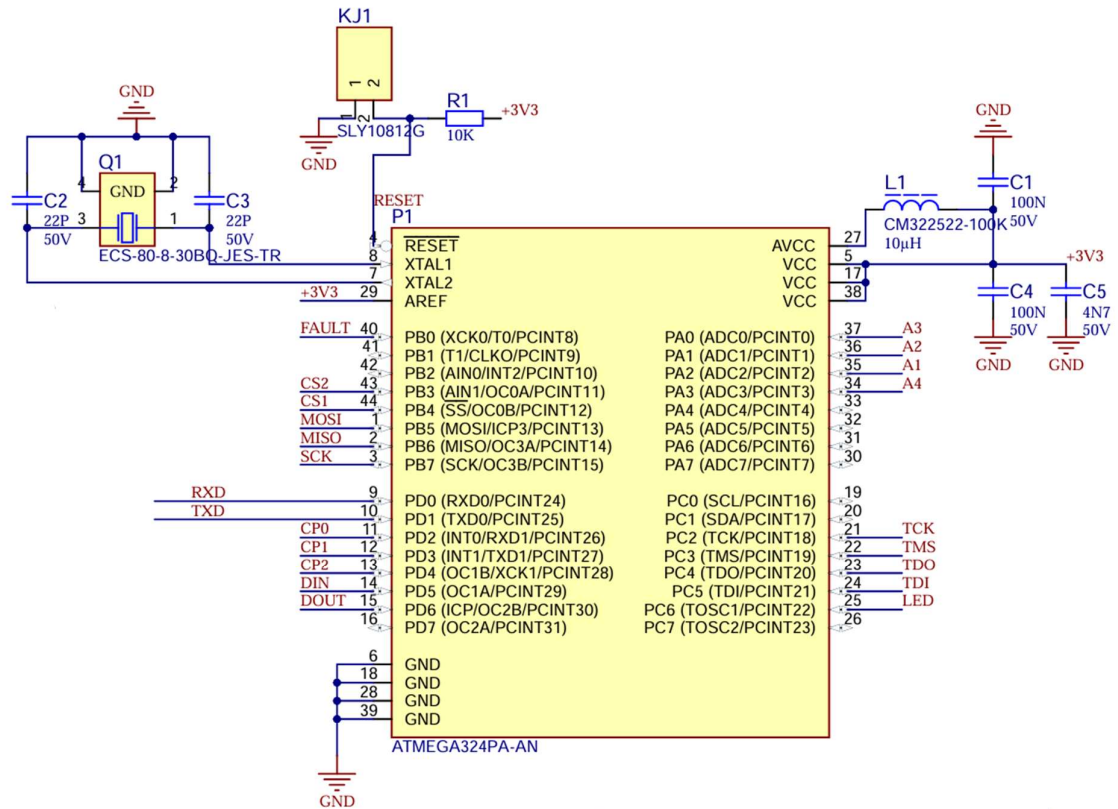


Obrázek 17 Podrobnější blokové schéma převodníku [Autorská práce (Microsoft visio)]

2.1.1 Návrh obvodů pro řízení

Pro zajištění kompatibility s moduly MAX31865 a Xport, které pracují na 3,3V logice, byl celý systém navržen s napájením 3,3V. To ovlivnilo i volbu hodinového oscilátoru, protože běžně používaný 16MHz krystal by nebyl při tomto napětí spolehlivý. Místo něj byl použit 8MHz oscilátor, což zajišťuje stabilní provoz a umožňuje využití interního dělení frekvence pro optimální výkon mikrokontroleru ATmega324PA-AN. Krystal je doplněn dvojicí 22pF kondenzátorů pro správnou stabilizaci.

Resetovací obvod je realizován pomocí kolíkové lišty s pull-up rezistorem 10 k Ω , což umožňuje jednoduchý ruční reset propojením s GND. Napájení mikrokontroleru je filtrováno sadou blokovacích kondenzátorů, které eliminují rušení a stabilizují napětí. Pro analogovou část, zejména pro referenční napětí ADC, je použit LC filtr složený z indukčnosti 10 μ H a kondenzátorů 100 nF a 4,7 nF. Tento filtr minimalizuje šum a zajišťuje přesnější měření analogových signálů.

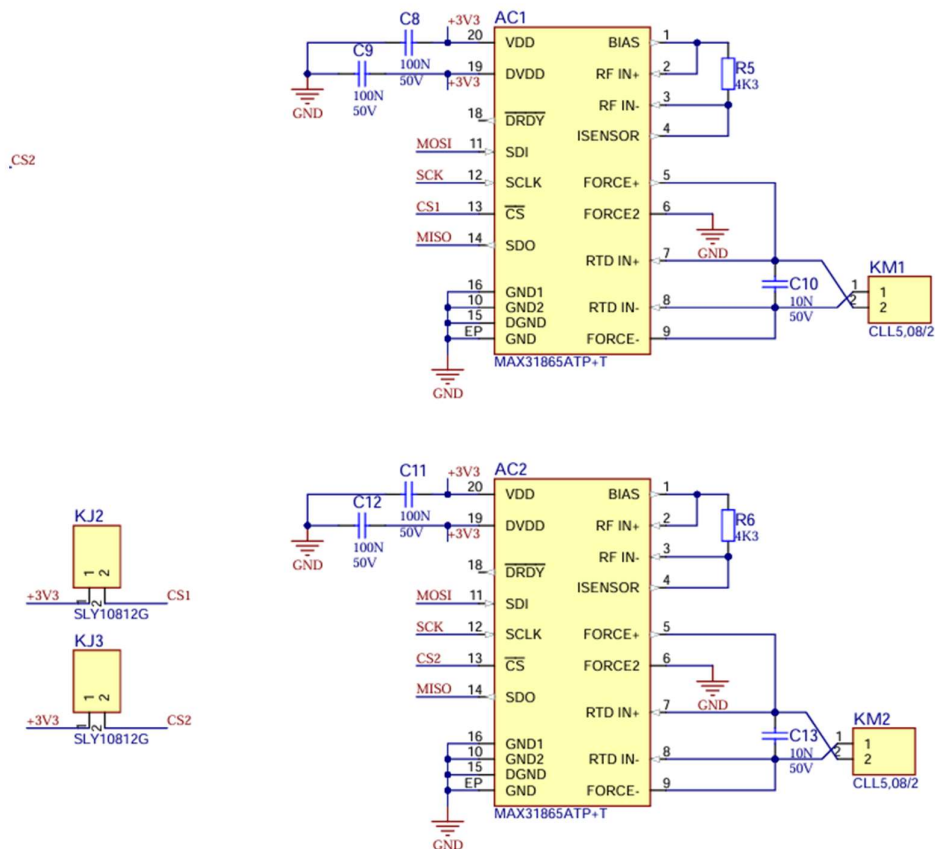


Obrázek 18 Zapojení mikroprocesoru [Autorská práce (Altium Designer)]

2.1.2 Návrh obvodů pro měření teploty

MAX31865 je specializovaný převodník určený pro přesné měření odporových teplotních senzorů (RTD), v tomto případě dvou vodičového snímače PT1000. Obvod byl navržen přesně podle doporučeného zapojení v datasheetu, což zajišťuje jeho optimální funkčnost. Napájení je realizováno 3,3V, což je kompatibilní s řídicí jednotkou a dalšími periferiemi v systému. Pro zajištění stabilního provozu jsou na vstupu umístěny blokové kondenzátory (100 nF) eliminující vysokofrekvenční rušení. Datová komunikace probíhá přes SPI sběrnici, přičemž každému převodníku je přiřazen samostatný CS signál pro správné adresování.

Klíčovou součástí obvodu je referenční rezistor 4,3 k Ω , který hraje zásadní roli při měření odporu snímače PT1000. Tento odpor nastavuje referenční proud protékající teplotním senzorem, což umožňuje přesné vyhodnocení změn odporu v závislosti na teplotě. Správná volba hodnoty rezistoru minimalizuje vlastní ohřev snímače a zajišťuje stabilní měření. Signál z PT1000 je pak porovnáván s referenčním napětím, což převodník využívá k výpočtu aktuální teploty. Díky tomuto řešení je měření spolehlivé a vhodné i pro průmyslové aplikace s vysokými nároky na přesnost.



Obrázek 19 Zapojení MAX31865 [Autorská práce (Altium Designer)]

2.1.3 Návrh obvodů proměření napětí

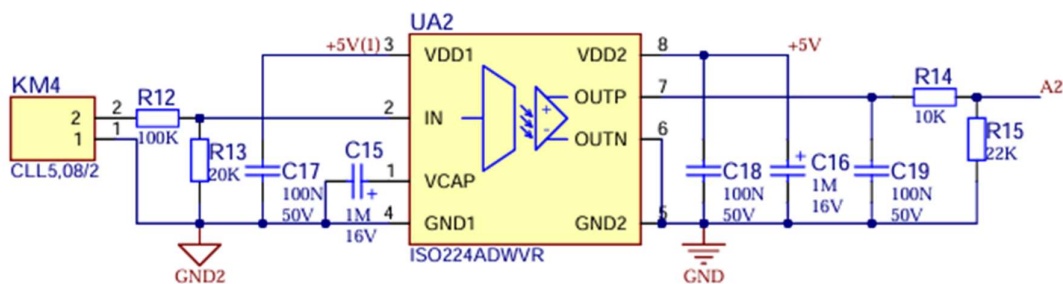
Měření napětí je realizováno pomocí AD převodníku integrovaného v mikroprocesoru ATmega32pa. Ten je 10bitový a nabízí tak při rozsahu měření 30V rozlišení podle rovnice:

$$\text{citlivost} = \frac{\text{rozsah měření}}{2^{\text{počet bitů ADC}}}$$

$$\frac{30}{2^{10}} = \frac{30}{1024} = 29,3mV$$

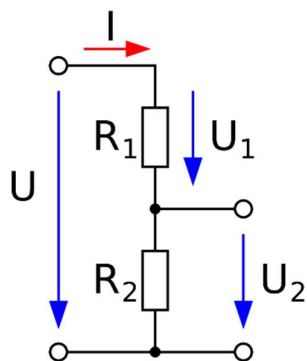
Citlivost je poměr rozsahu měření a počtu kombinací analogově-digitálního převodníku. Výsledkem je nejmenší možná změna napětí, kterou dokáže ADC naměřit.

Pro galvanické oddělení měření napětí byl zvolen diferenciální zesilovač ISO224 od společnosti Texas Instruments. Používá kapacitní izolační technologii k přenosu signálu mezi primární a sekundární stranou, čímž eliminuje přímé elektrické spojení a zvyšuje odolnost proti rušení.



Obrázek 20 zapojení ISO224 [Autorská práce (Altium Designer)]

Kromě doporučeného zapojení daného výrobcem obsahuje na vstupní straně napěťový dělič z rezistorů R12 a R13, který vstupní napětí až 30 V sníží na 5 V. Podobné je to i na výstupní straně kde odpory R14 a R15 sníží napětí na 3,3 V. Rezistory byly zvoleny podle vzorce pro výpočet odporových děličů:



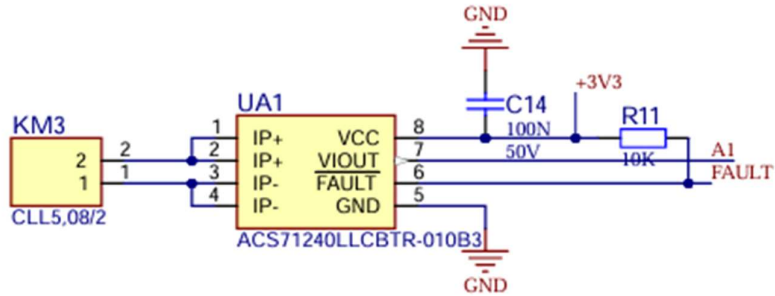
$$U_2 = U * \frac{R_2}{R_1 + R_2} [V]$$

Obrázek 21 Odporový dělič [39]

Díky tomu, že obě strany zesilovače jsou napájeny stejnou úrovní napětí je jeho přenosový poměr 1:1.

2.1.4 Návrh obvodů pro měření proudu

ACS712 byl zvolen pro jeho schopnost měřit AC i DC proud s galvanickým oddělením a jednoduchou integrací díky analogovému výstupu.

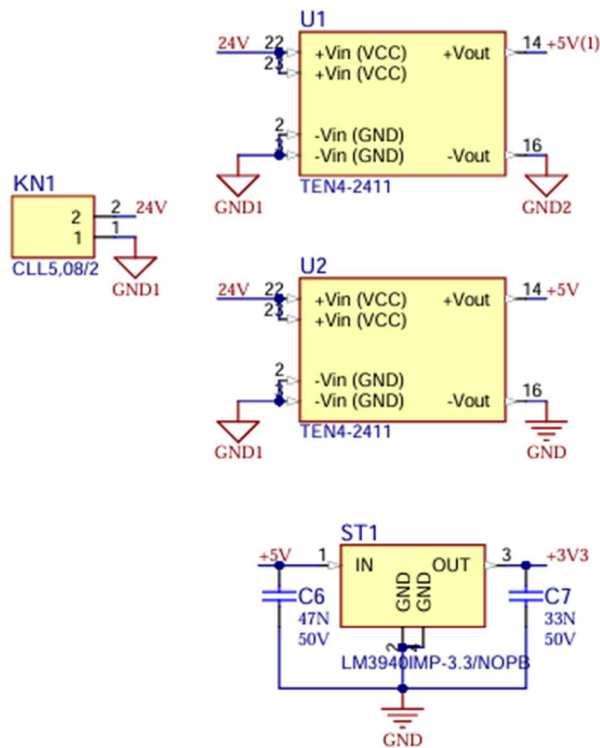


Obrázek 22 Zapojení ACS712 [Autorská práce (Altium Designer)]

Vstup ACS712 je připojen přímo na svorkovnici KM3. Výstup VOUT je připojen přímo k AD převodníku. Negovaný výstup FAULT slouží k detekci překročení maximálního možného proudu, který je pro tuto verzi ± 10 A.

2.1.5 Návrh napájení

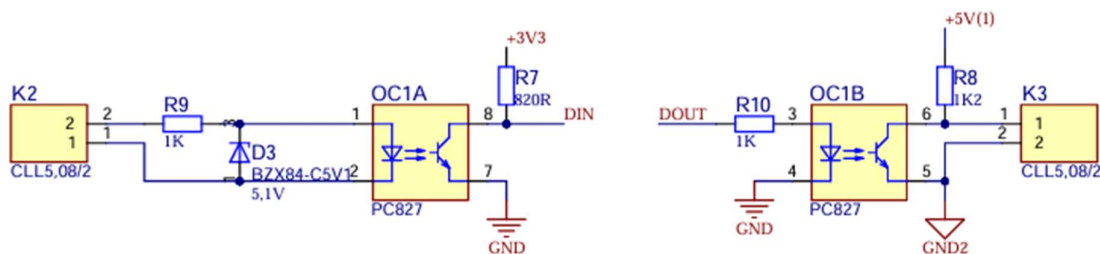
Pro napájení byly v souladu se zadáním zvoleny měniče TEN4-2411. Oba jsou připojeny k napájecí svorkovnici KN1 a jejich výstup je 5 V. Výstup jednoho z nich je připojen na regulátor, který převede 5 V na 3,3 V které jsou potřeba pro napájení Xport a MAX31865. Důvod použití dvou měničů je dán požadavkem na galvanické oddělení měření a logického výstupu.



Obrázek 23 Zapojení napájecích obvodů [Autorská práce (Altium Designer)]

2.1.6 Návrh logických vstupů a výstupů

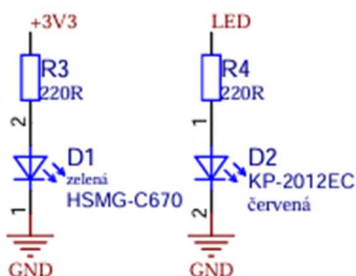
Pro galvanické oddělení logických vstupů a výstupů je použita dvojice optočlenů PC817. Vstupní obvod je kromě odporu pro omezení proudu diodou vybaven ještě Zenerovou diodou jako ochranu proti přepólování a přepětí. Výstupní obvod je napájen izolovaným napětím stejným jako izolační zesilovač ISO224.



Obrázek 24 Logický vstup a výstup [Autorská práce (Altium Designer)]

2.1.7 Návrh podpůrných obvodů

Jako podpůrné obvody jsou brány takové, které jsou důležité pro správný chod zařízení, jeho naprogramování, signalizaci napájení a stavů, nebo diagnostiku. Mezi ně patří dvě signalizační LED (Obrázek 25). Jedna připojená na napájecí napětí mikrokontroleru a druhá programovatelná připojená na digitální pin s možností použití PWM pro možnost zobrazení více stavů zařízení.



Obrázek 25 Zapojení LED [Autorská práce (Altium Designer)]

Dalším obvodem je termistor s hodnotou odporu 10 kΩ při 25° C. Ten je zapojen do napěťového děliče společně s rezistorem 10 kΩ aby bylo možné změřit změnu jeho odporu. (Obrázek 26)

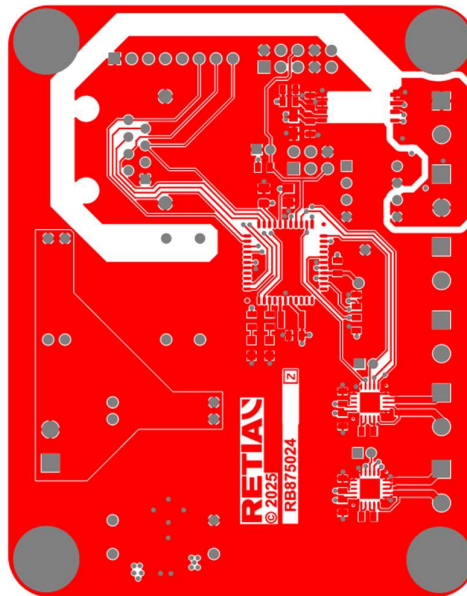


Obrázek 26 Zapojení termistoru [Autorská práce (Altium Designer)]

Posledními komponenty jsou kolíkové lišty sloužící pro programování mikrokontroleru nebo pro řešení problémů spojených s ožíváním a diagnostikou zařízení. Lišta KJ1 slouží pro resetování mikrokontroleru, a to připojením negovaného pinu RESET na zem. Lišty KJ2 a KJ3 slouží pro připojení negovaných pinů CS1 a CS2 na hodnotu logické 1 a tím zajištění neaktivity převodníků MAX31865 pokud by programování mikrokontroleru probíhalo přes společnou sběrnici SPI.

2.2 Návrh DPS

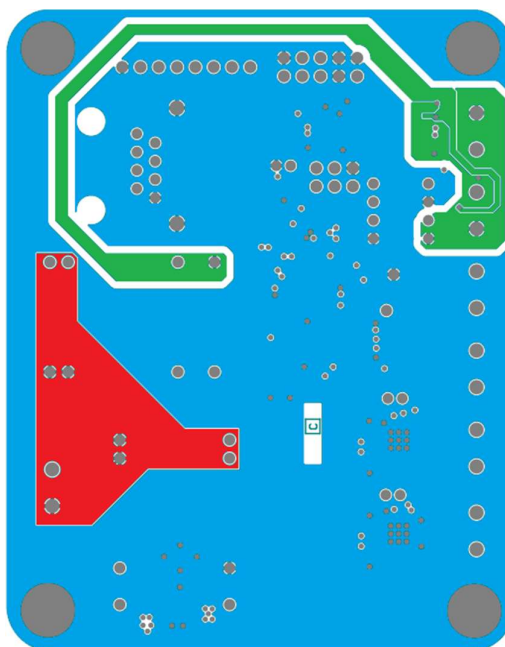
Návrh desky plošných spojů byl proveden v souladu s doporučeními výrobců použitých součástek a obecnými zásadami pro návrh spolehlivých průmyslových zařízení. S ohledem na složitost zapojení, počet signálových cest a požadavky na galvanické oddělení byl zvolen čtyřvrstvý návrh. Dvě vnitřní vrstvy jsou vyhrazeny primárně pro rozvody napájení a zemí, což zajišťuje stabilní referenční potenciál a minimalizaci rušení. Návrh respektuje oddělení různých napájecích větví a zemí tak, aby se na sousedních vrstvách nesetkávaly různé potenciály, čímž se předešlo možným parazitním kapacitám a zkratům mezi oddělenými částmi systému.



Obrázek 27 Deska plošných spojů (vrstva Z (top)) [Autorská práce (Altium Designer)]

Rozmístění součástek bylo zvoleno s přihlédnutím na požadavek minimalizaci fyzické velikosti desky. Konektory byly rozmístěny podle jejich funkcí tak že napájecí a komunikační (RJ45) konektory jsou na levém kraji a konektory určené pro měření nebo obsluhu vstupně výstupních digitálních pinů jsou napravo. V dolní části se nacházejí signalizační a stavové LED a v horní části jsou kolíkové lišty pro programování desky a možné připojení rozšiřujících modulů. V rozích jsou umístěny otvory pro montáž zařízení.

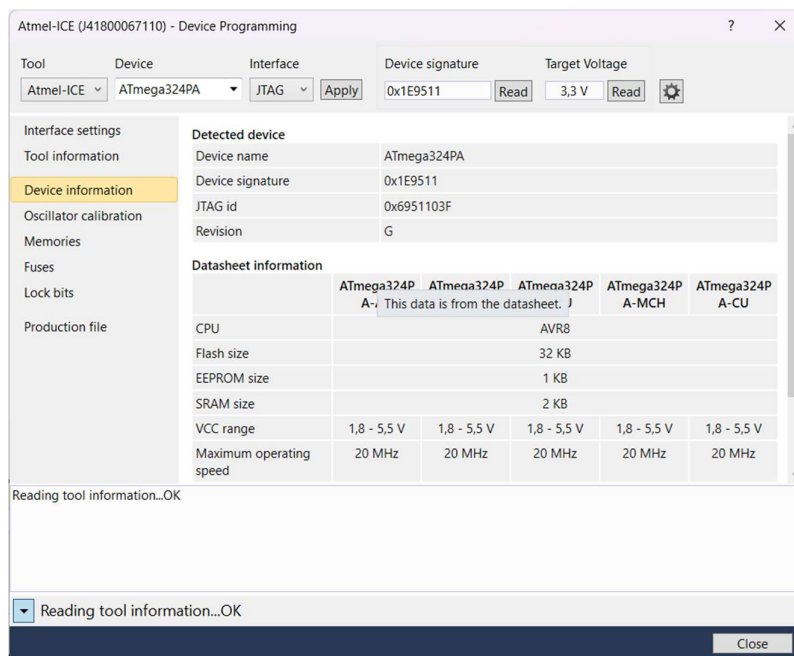
Na Obrázek 28 je barevně vyznačeno rozdělení napájecích napětí v rámci DPS. Modře je označena oblast s napětím +3,3 V, která slouží k napájení mikrokontroleru, převodníků MAX31865 a modulu Xport. Červeně je vyznačeno vstupní napětí přivedené z konektoru ke vstupům DC-DC měničů TEN4-2411. Zeleně je pak znázorněno oddělené napájecí napětí určené pro izolované obvody, konkrétně pro napájení zesilovačů ISO224 a optočlenů, kde je vyžadována galvanická izolace.



Obrázek 28 Ilustrativní vyznačení různých napěťových hladin a galvanicky oddělených částí DPS [Autorská práce (Altium Designer)]

2.3 Oživování

V rámci oživení desky bylo nutné udělat hned několik kroků. Na desku byla nejprve osazena napájecí část, procesor, Modul Xport, pomocné obvody procesoru a kolíkové lišty určené pro programování. Následně byly proměřeny vodivé cesty napájení a po připojení ke stejnosměrnému napětí +12V bylo na kolíkových lištách naměřeno správné napětí 5V a 3,3V. Připojené napájení indikuje i LED připojená přímo k napětí 3,3V. Pro programování procesoru ATMEGA324PA byl zvolen program Microchip studio (Obrázek 29).



Obrázek 29 Informace o připojeném zařízení v programu Microchip Studio

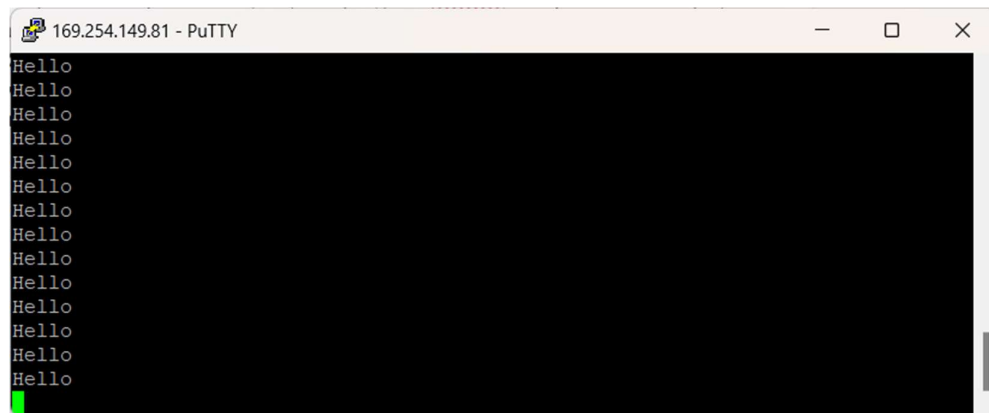
Tento program dříve známý jako Atmel Studio je oficiální vývojové prostředí pro mikrokontrolery AVR a SAM od společnosti Microchip. Nabízí plnou integraci s nástroji pro ladění, programování a simulaci, podporuje jazyk C/C++ a je kompatibilní s programátory jako Atmel-ICE. Díky grafickému nastavení periferií, práci s fuse bity a podpoře projektů pro AVR-GCC je ideálním nástrojem pro vývoj embedded aplikací. Dále byl k programování použit programátor Atmel ICE. Komunikace mezi deskou a programátorem je možná dvěma způsoby. Prvním je SPI a druhým JTAG.

Po připojení desky k Atmel ICE program správně rozpoznal zařízení a po napsání programu na rozblikání stavové LED byl úspěšně nahrán do flash paměti procesoru. LED poté začala přerušovaně svítit



Obrázek 30 fotografie z oživování desky (autorská práce)

Jako další bylo potřeba nastavit Xport. K tomu slouží program DeviceInstaller od společnosti Lantronix, který prohledá dostupnou síť a vypíše informace o dostupných zařízeních. Tyto informace obsahují především: IP adresu, masku, Hardwarovou adresu nebo telnet port. Poté je nutné otevřít prohlížeč a zadat zjištěnou IP adresu Xportu. Tím otevřeme WebManager kde nastavíme rychlost přenosu a protokol k sériové komunikaci na desce a nastavení telnet portu. K přímému připojení přes telnet protokol byl využit program PuTTY což je volně dostupný terminálový program pro Windows, který slouží k navazování síťových spojení pomocí protokolů Telnet, SSH, rlogin a raw TCP. Umožňuje komunikaci s mikrokontrolery, síťovými zařízeními nebo servery prostřednictvím textového rozhraní. K ověření funkčnosti připojení byl do procesoru nahrán program, který cyklicky posílá sérii znaků „Hello“ do Xportu a ten poté do počítače ().



Obrázek 31 Testovací výstup v programu PuTTY

Komunikace mezi procesorem a Ethernet modulem probíhá po dvojici vodičů TXD a RXD s protokolem UART. Je nutností nastavit obě zařízení na stejnou přenosovou rychlost. V našem případě Baudrate 9600 Bd. Testování logického vstupu a výstupu bylo provedeno za pomoci LED a tlačítka. Pro tento účel byl také napsán speciální program, který četl stav pinu na vstupu a po jeho změně změnil stav výstupu.

K ověření funkčnosti ADC převodníku byl na desku dosazen termistor zapojený jako napěťový dělič s rezistorem o hodnotě $10\text{K}\Omega$. Do zařízení byl nahrán program, který změří napětí na děliči, vypočítá z něj hodnotu teploty a tu pošle do počítače. Stejným způsobem bylo otestováno měření napětí a proudu. Napětí bylo měřeno pomocí laboratorního zdroje Diametral P230R51D, kde bylo nastaveno napětí. To bylo na desce změřeno a výsledek byl odeslán na počítač. Pro otestování funkčnosti měření proudu bylo sestaven obvod (nebo prostě malý odpor) a výsledná hodnota proudu byla stejně jako v případě napětí odeslána na počítač. Pro měření teploty byl napsán testovací program, který obsluhuje sběrnici SPI a který střídavě vyzývá převodníky MAX31865 aby poslali změřenou hodnotu teploty. Výsledek se poté odešle do počítače.



Obrázek 32 fotografie hotové desky (autorská práce)

2.4 Program

Program funguje cyklicky, obsahuje nekonečný loop while kde se cyklicky volají funkce obsluhující jednotlivé vstupy. Po získání parametrů ze všech vstupů se výsledek odešle pomocí protokolu TCP ho odešle na Telnet terminál na počítač. Pro komunikaci na druhou stranu stačí napsat znak „A“ do Telnet terminálu v PuTTY. V programu se po přijetí znaku zavolá přerušení a přepne se stav na logickém výstupu. Data jsou do počítače posílána ve formátu:

$$T1, T2, Td, U, I, L$$

Kde:

T1 = teplota z teploměru 1 [°C]

T2 = teplota z teploměru 2 [°C]

Td = teplota na desce [°C]

U = změřené napětí [mV]

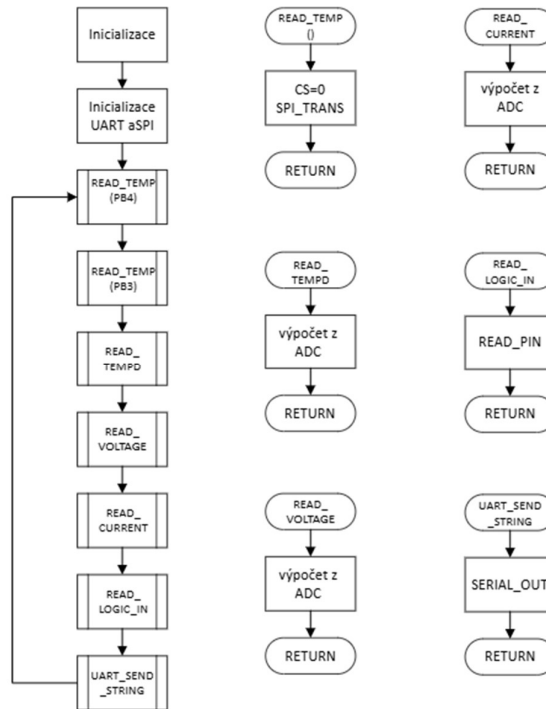
I = změřený proud [mA]

L = stav na logickém vstupu [1/0]

Např:

$$23.85,999.99,32.15,10065,1150,1$$

Pro detekci odpojení nebo chyby komunikace se u teploměrů využívá hodnota 999.99.



Obrázek 33 Vývojový diagram [autorská práce (Microsoft Visio)]

2.4.1 Způsob zpracování naměřených dat

Zvýšení spolehlivosti měření bylo zajištěno jednoduchou metodou filtrace, při které se naměřená data nejprve seřadí podle velikosti, poté se odstraní nejvyšší a nejnižší hodnota (tzv. ořezání extrémů) a ze zbytku se spočítá aritmetický průměr. Tento postup pomáhá potlačit vliv náhodných špiček nebo rušení a zajišťuje stabilnější a reprezentativnější výstupní hodnotu.

Níže je uvedený příklad kódu k vypočtení průměrné hodnoty a odstranění extrémů:

```

...
void sort_adc_values(uint16_t* arr, uint8_t len){
    for (uint8_t i = 0; i < len - 1; i++){
        for (uint8_t j = 0; j < len - i - 1; j++){
            if (arr[j] > arr[j + 1]){
                uint16_t tmp = arr[j];
                arr[j] = arr[j + 1];
                arr[j + 1] = tmp;
            }
        }
    }
}
...
uint16_t samples[20];
for (uint8_t i = 0; i < 20; i++){
    samples[i] = ADC_read();
    _delay_ms(100);
}
sort_adc_values(samples, 20);
uint32_t adc_sum = 0;
for (uint8_t i = 2; i < 18; i++) {
    adc_sum += samples[i];
}
uint16_t adc_avg = adc_sum / 16;
...

```



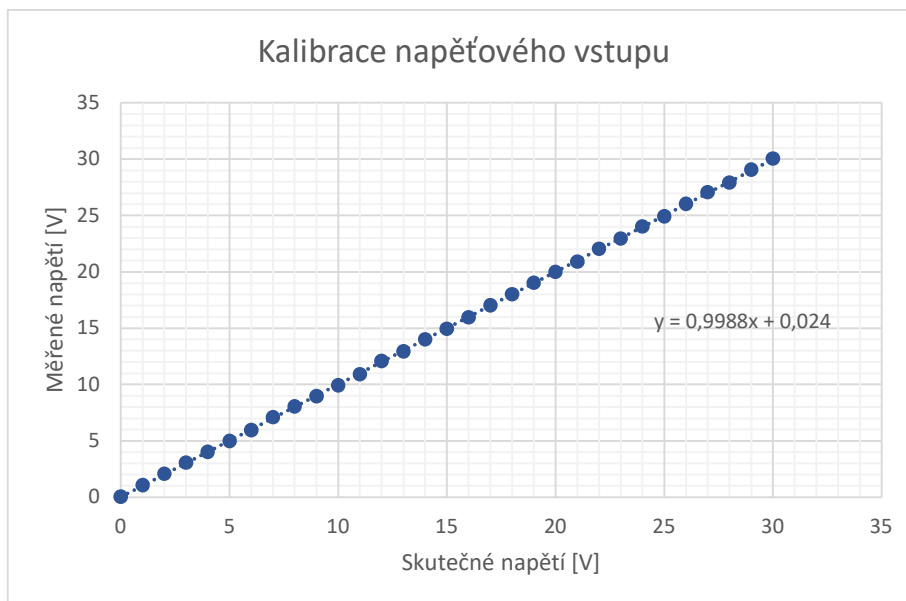
Obrázek 34 Diagram zpracování naměřených hodnot [autorská práce (Microsoft Visio)]

2.5 Měření

Měření bylo provedeno za účelem kalibrace použitých senzorů, aby bylo možné určit jejich chování v konkrétních podmínkách. Důraz byl kladen na co nejpřesnější provedení měření – včetně stabilního napájení, omezení rušení a opakovaného snímání s následným zpracováním dat. Cílem bylo zajistit, aby výstupní hodnoty odpovídaly skutečným fyzikálním veličinám co nejvěrněji.

2.5.1 Měření napětí

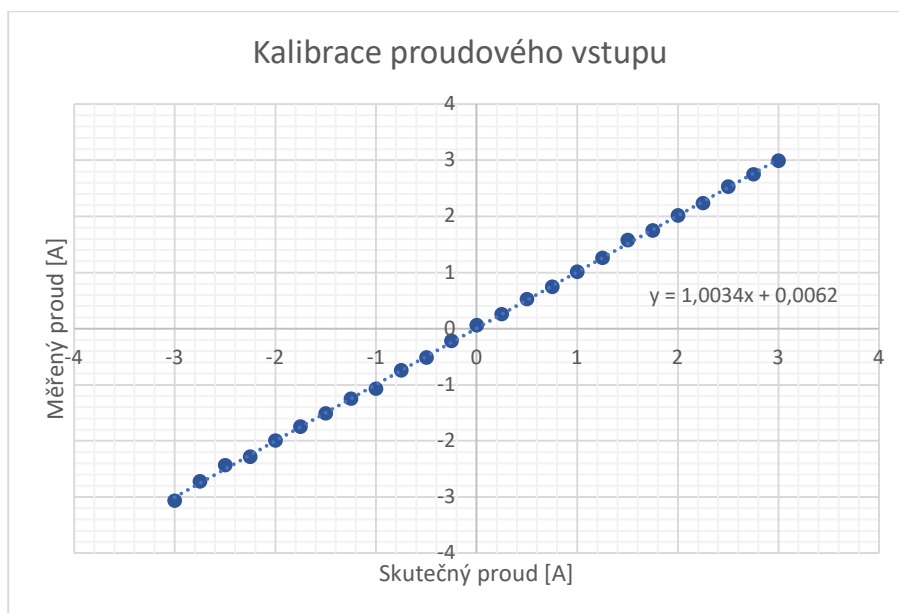
Pro měření napětí byl vstup zapojen do laboratorního zdroje Diametral na kterém bylo postupně zvyšováno napětí. Velikost napětí byla také kontrolována multimetrem. Výsledky byly zapisovány do tabulky (Tabulka 1) a byl z nich vytvořen graf (Graf 1). Pro přesnější výpočet byly multimetrem přeměřeny hodnoty rezistorů v napěťových děličích na vstupu a výstupu izolačního zesilovače ISO224 a byl z nich vypočten přesnější převodový poměr.



Graf 1 Graf kalibrace napěťového vstupu [Autorská práce (Microsoft Excel)]

2.5.2 Měření proudu

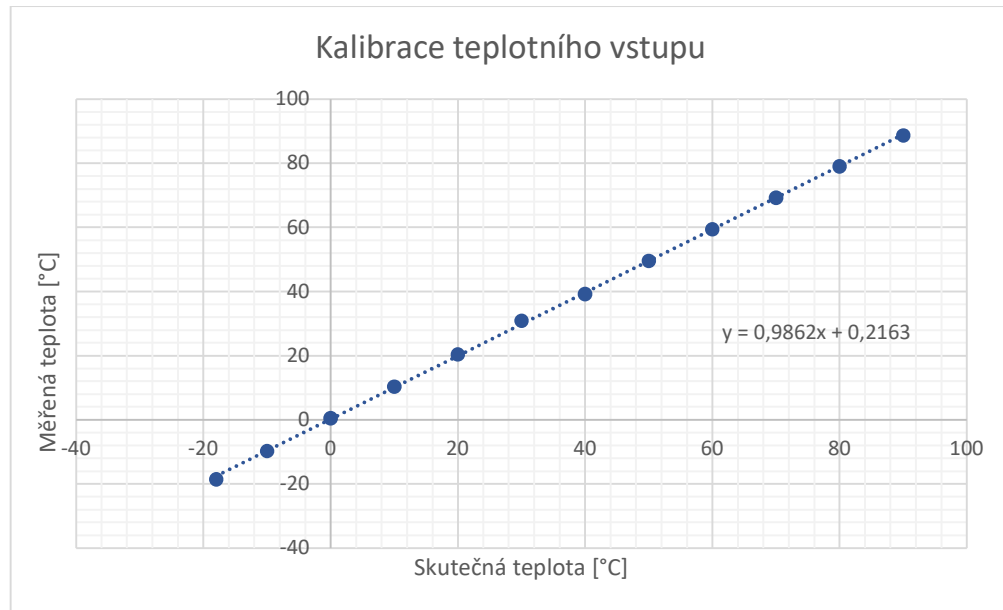
Proud byl měřen za pomoci rezistoru s hodnotou 47Ω . Na laboratorním zdroji Diametral bylo zvyšováno napětí a tím i proud na vstupu do ACS712. Ten byl přeměřen multimetrem a výsledky byly zapisovány do tabulky (Graf 2) ze které byl vytvořen graf (Tabulka 2) a vypočteny chyby.



Graf 2 Graf kalibrace proudového vstupu [Autorská práce (Microsoft Excel)]

2.5.3 Měření teploty

Měření teploty probíhalo pomocí teplotního senzoru PT1000 a převodníků MAX31865. Hodnota teploty byla kontrolována potravinářským teploměrem [název]. Měření probíhalo za pomoci vroucí vody nalité do kovové nádoby, kde byly umístěny oba teploměry. Během postupného chladnutí byla voda míchána, aby se předešlo rozdílným hodnotám v různých oblastech nádoby. Data byla zaznamenávána do tabulky (Tabulka 3) z nichž byl vytvořen graf (Graf 3). Teploty pod bodem mrazu byly měřeny v chladícím boxu s nastavitelnou teplotou.



Graf 3 Graf kalibrace teplotního vstupu [Autorská práce (Microsoft Excel)]

ZÁVĚR

Závěrem lze zhodnotit, že celý návrh i realizace měřicího systému byly vedeny s důrazem na praktické využití v průmyslovém prostředí, kde jsou kladeny vysoké nároky na spolehlivost, přesnost a odolnost. Systém byl navržen modulárně a s možností dalšího rozšíření, přičemž vychází z kombinace běžně dostupných (COTS) komponent a osvědčených konstrukčních přístupů.

Klíčovým prvkem systému je mikrokontroler ATmega324PA, zvolený pro jeho nízkou spotřebu, širokou podporu vývojových nástrojů a dostatečný počet periférií. Pro měření teploty byl použit platinový teploměr PT1000 v kombinaci s převodníkem MAX31865, což umožňuje přesné a stabilní měření v rozsahu požadovaném zadáním. Měření napětí bylo realizováno pomocí galvanicky odděleného zesilovače ISO224, který bezpečně převádí rozdílové napětí na signál vhodný pro ADC. Pro měření proudu byl integrován senzor ACS712, umožňující jednoduché a izolované měření jak stejnosměrného, tak střídavého proudu.

Pro přenos dat byl zvolen ethernetový modul WIZ850io, případně Xport, přičemž obě varianty poskytují spolehlivou komunikaci po síti TCP/IP. Implementace protokolů jako Telnet umožňuje jednoduchý přístup k datům bez nutnosti složitého rozhraní. Celý systém je navržen s ohledem na galvanické oddělení měřených částí, čemuž odpovídá i návrh čtyřvrstvé DPS, kde jsou vnitřní vrstvy vyhrazeny pro napájení a země, které jsou mezi sebou pečlivě odděleny tak, aby se minimalizovalo riziko rušení nebo poruchy.

Napájecí část systému je řešena kombinací DC-DC měničů TEN4-2411 a lineárního regulátoru LM3940, čímž je zajištěna dostatečná stabilita a efektivita napájení i při různorodých vstupech (12–30 V). Výstupní napětí 3,3 V slouží jako hlavní napájecí větev pro logické části systému, zatímco oddělené větve napájejí analogové a izolační části, jako jsou optické členy PC827 nebo samotný ISO224.

Měření bylo provedeno s důrazem na přesnost a opakovatelnost, včetně základní kalibrace senzorů a numerického zpracování dat – například odebráním extrémních hodnot a průměrováním zbývajících vzorků. Tím bylo dosaženo vyšší odolnosti vůči špičkám a rušení. Vývoj a ladění probíhaly v prostředí Microchip Studio, které ve spojení s rozhraním JTAG umožnilo krokové ladění a přístup do paměti i registrů mikrokontroleru.

Celkově lze systém hodnotit jako robustní, efektivně navržený a připravený pro reálné nasazení. Kombinuje přesné měření, jednoduché zpracování dat a standardizovanou komunikaci, čímž se stává vhodným řešením nejen pro laboratorní účely, ale i pro provoz za ztížených podmínek.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Vlček, J., 2008. D/A a A/D převodníky. [online] TZB-info. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/docu/texty/0001/000102_da_ad_prevodniky.pdf [Citováno 12. 12. 2024].
- [2] Wikipedie, 2024. Kompenzační sledovací A/D převodník. [online] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/A/D_p%C5%99evodn%C3%ADk#/media/Soubor:Kompenzacni_sledovaci_AD.png [Citováno 12. 12. 2024].
- [3] Advantech, n.d. ADAM-6015: 7-kanálový modul pro vstup RTD. [online] Dostupné z: https://www.advantech.com/en/products/a67f7853-013a-4b50-9b20-01798c56b090/adam-6015/mod_9c835a28-5c91-49fc-9de1-ec7f1dd3a82d [Citováno 14. 4. 2025].
- [4] Advantech. Obrázek modulu ADAM-6015: 7-kanálový modul pro vstup RTD. [online]. [cit. 12. 12. 2024]. Dostupné z: https://www.advantech.com/en/products/a67f7853-013a-4b50-9b20-01798c56b090/adam-6015/mod_9c835a28-5c91-49fc-9de1-ec7f1dd3a82d
- [5] Texas Instruments, n.d. ADS1113, ADS1114, and ADS1115 Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator. [online] Dostupné z: <https://www.ti.com/product/ADS1115> [Citováno 14. 4. 2025].
- [6] Texas Instruments, n.d. ADC0804 8-Bit μ P Compatible A/D Converters. [online] Dostupné z: <https://www.ti.com/product/ADC0804> [Citováno 14. 4. 2025].
- [7] Wikipedie, 2025. Jednočipový počítač. [online] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Jedno%C4%8Dipov%C3%BD_po%C4%8D%C3%ADta%C4%8D [Citováno 14. 4. 2025].
- [8] Vahid alpha, n.d. Microcontrollers Atmega32 Atmega8. [online] Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/Microcontrollers_Atmega32_Atmega8.jpg [Citováno 12. 12. 2024].
- [9] Microchip Technology, n.d. ATmega32 Datasheet. [online] Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega32.pdf> [Citováno 12. 12. 2024].
- [10] Reichelt elektronik, n.d. Debugger/Programmer for ARM Cortex-M – AT ATMEL-ICE. [online] Dostupné z: https://www.reichelt.com/de/en/shop/product/debugger_programmer_for_arm_cortex-m-143878 [Citováno 14. 4. 2025].
- [11] Microchip Technology, 2024. ATmega324PA Datasheet. [online] Microchip.com. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega324PA> [Citováno 14. 4. 2024].
- [12] Microchip Technology, 2024. Atmel-ICE User Guide. [online] Microchip.com. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/development-tool/ATATMEL-ICE> [Citováno 14. 4. 2024].
- [13] Cburnett. SPI timing diagram msbfirst. [online]. 6. ledna 2022 [cit. 12. 12. 2024]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:SPI_timing_diagram_msbfirst.svg

- [14] Autor neznámý. Duty Cycle Examples. [online]. [cit. 12. 12. 2024]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b8/Duty_Cycle_Examples.png
- [15] Arduino. PWM – Pulse Width Modulation [online]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/Foundations/PWM> [cit. 2024-12-12].
- [16] Microchip Technology, 2024. USART Communication. [online] Microchip Technology Inc. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/technologies/usart> [Citováno 14. 4. 2024].
- [17] Lantronix, n.d. XPort Embedded Ethernet Module. [online] Dostupné z: <https://www.lantronix.com/products/xport/> [Citováno 14. 4. 2025].
- [18] Novozámský, A., 2007. Asynchronní 8bitový přenos. [online] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Asynchronn%C3%AD_8bitov%C3%BD_p%C5%99enos.png [Citováno 14. 4. 2025].
- [19] Alza.cz, n.d. MDT Technologies Teplotní čidlo PT1000, délka 3 m. [online] Dostupné z: <https://www.alza.cz/mdt-technologies-teplotni-cidlo-pt1000-delka-3-m-d12301933.htm> [Citováno 14. 4. 2025].
- [20] Wikipedia, 2024. JTAG. [online] Wikipedia, The Free Encyclopedia. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/JTAG> [Citováno 14. 4. 2024].
- [21] Microchip Technology, 2024. AVR JTAG Interface. [online] Microchip Technology Inc. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/application-notes/atmel-8863-avr328-usart-start> [Citováno 14. 4. 2024].
- [22] Cisco Systems, 2024. The OSI Model. [online] Cisco.com. Dostupné z: <https://www.cisco.com/c/en/us/about/press/internet-protocol-journal/blogs/2006/osi-model.html> [Citováno 14. 4. 2024].
- [23] Offnfopt, 2013. OSI Model v1. [online] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:OSI_Model_v1.svg [Citováno 14. 4. 2025].
- [24] Cisco Systems, n.d. Ethernet Technologies for Industrial Automation. [online] Dostupné z: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions.html> [Citováno 12. 12. 2024].
- [25] Siemens, n.d. Industrial Ethernet Basics. [online] Dostupné z: <https://new.siemens.com/global/en.html> [Citováno 12. 12. 2024].
- [26] Wikipedia, 2024. Telnet. [online] Wikipedia, The Free Encyclopedia. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Telnet> [Citováno 14. 4. 2024].
- [27] Allegro Microsystems, n.d. ACS712 Datasheet. [online] Dostupné z: <https://www.allegromicro.com/en/products/current-sensor-ics/acs712> [Citováno 12. 12. 2024].
- [28] Allegro MicroSystems, n.d. ACS712: Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC. [online] Dostupné z: <https://www.allegromicro.com/en/Products/Sense/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS712> [Citováno 12. 12. 2024].

- [29] WIKIPEDIA. Thermistor [online]. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2024. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermistor> [cit. 2024-04-14].
- [30] Adafruit, n.d. MAX31865 RTD PT100 or PT1000 Amplifier. [online] Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier/overview> [Citováno 14. 4. 2025].
- [31] Analog Devices, n.d. MAX31865: RTD-to-Digital Converter. [online] Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/max31865.html> [Citováno 14. 4. 2025].
- [32] TEXAS INSTRUMENTS. ISO224 PRECISION ISOLATED AMPLIFIER DATASHEET [ONLINE]. TI.COM, ©2024. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.TI.COM/PRODUCT/ISO224](https://www.ti.com/product/ISO224) [CIT. 2024-04-14].
- [33] TEXAS INSTRUMENTS, 2018. ISO224 REINFORCED ISOLATED AMPLIFIER WITH SINGLE-ENDED INPUT OF ± 12 V AND DIFFERENTIAL OUTPUT OF ± 4 V. REV. A. [ONLINE] DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.TI.COM/LIT/DS/SYMLINK/ISO224.PDF](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso224.pdf) [CITOVÁNO 14. 4. 2025].
- [34] TEXAS INSTRUMENTS, 2024. VOLTAGE REGULATORS AND POWER MANAGEMENT GUIDE. [ONLINE] TI.COM. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.TI.COM/POWER-MANAGEMENT/VOLTAGE-REGULATORS/OVERVIEW.HTML](https://www.ti.com/power-management/voltage-regulators/overview.html) [CITOVÁNO 14. 4. 2024].
- [35] TRACO POWER, 2024. TEN 4 SERIES DATASHEET. [ONLINE] TRACO POWER. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.TRACOPOWER.COM/INT/MODEL/TEN-4-2411](https://www.tracopower.com/int/model/ten-4-2411) [CITOVÁNO 14. 4. 2024].
- [36] TEXAS INSTRUMENTS, 2024. LM3940 LOW DROPOUT REGULATOR DATASHEET. [ONLINE] TI.COM. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.TI.COM/PRODUCT/LM3940](https://www.ti.com/product/LM3940) [CITOVÁNO 14. 4. 2024].
- [37] LITE-ON, 2024. PC827 DATASHEET. [ONLINE] LITE-ON TECHNOLOGY CORPORATION. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://OPTOELECTRONICS.LITEON.COM/UPLOAD/DOWNLOAD/DS70-2007-0012/PC827.PDF](https://optoelectronics.liteon.com/upload/download/ds70-2007-0012/PC827.pdf) [CITOVÁNO 14. 4. 2024].
- [38] SHARP CORPORATION, N.D. PC827: HIGH DENSITY MOUNTING TYPE PHOTOCOUPLER. [ONLINE] DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.ALLDATASHEET.COM/DATASHEET-PDF/VIEW/43372/SHARP/PC827.HTML](https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/43372/SHARP/PC827.html) [CITOVÁNO 14. 4. 2025].
- [39] BIEZL, 2007. EINFACHER UNBELASTETER SPANNUNGSTEILER. [ONLINE] DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://CS.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SOUBOR:EINFACHER-UNBELASTETER-SPANNUNGSTEILER.SVG](https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Einfacher-unbelasteter-spannungsteiler.svg) [CITOVÁNO 14. 4. 2025].

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Tabulka kalibrace napěťového vstupu

Příloha B: Tabulka kalibrace proudového vstupu

Příloha C: Tabulka kalibrace teplotního vstupu

Příloha D: Schéma

PŘÍLOHA A: Tabulka kalibrace napět'ového vstupu

VIN [V]	VMER [V]	ΔX [%]
0	0,044	-
1	1,066	-6,6
2	2,087	-4,35
3	3,055	-1,83
4	4,023	-0,57
5	4,991	0,18
6	5,959	0,68
7	7,088	-1,25
8	8,056	-0,7
9	8,97	0,33
10	9,938	0,62
11	10,906	0,85
12	12,089	-0,74
13	12,95	0,38
14	14,025	-0,17
15	14,939	0,40
16	15,961	0,24
17	17,037	-0,21
18	18,005	-0,02
19	19,026	-0,13
20	19,994	0,03
21	20,908	0,43
22	22,038	-0,17
23	22,952	0,20
24	24,027	-0,11
25	24,941	0,23
26	26,017	-0,06
27	27,06	-0,22
28	27,917	0,29
29	29,067	-0,23
30	30,05	-0,16

Tabulka 1 Tabulka naměřeného napětí

PŘÍLOHA B: Tabulka kalibrace proudového vstupu

I_{in} [A]	I_{mer} [A]	Δ X [%]
-3	-3,066	-2,2
-2,75	-2,724	0,94
-2,5	-2,431	2,76
-2,25	-2,284	-1,51
-2	-1,991	0,45
-1,75	-1,747	0,17
-1,5	-1,51	-0,66
-1,25	-1,246	0,32
-1	-1,07	-7
-0,75	-0,747	0,4
-0,5	-0,513	-2,6
-0,25	-0,219	12,4
0	0,061	-
0,25	0,256	-2,4
0,5	0,525	-5
0,75	0,745	0,66
1	1,014	-1,4
1,25	1,258	-0,64
1,5	1,574	-4,93
1,75	1,747	0,17
2	2,016	-0,8
2,25	2,236	0,62
2,5	2,529	-1,16
2,75	2,749	0,03
3	2,993	0,23

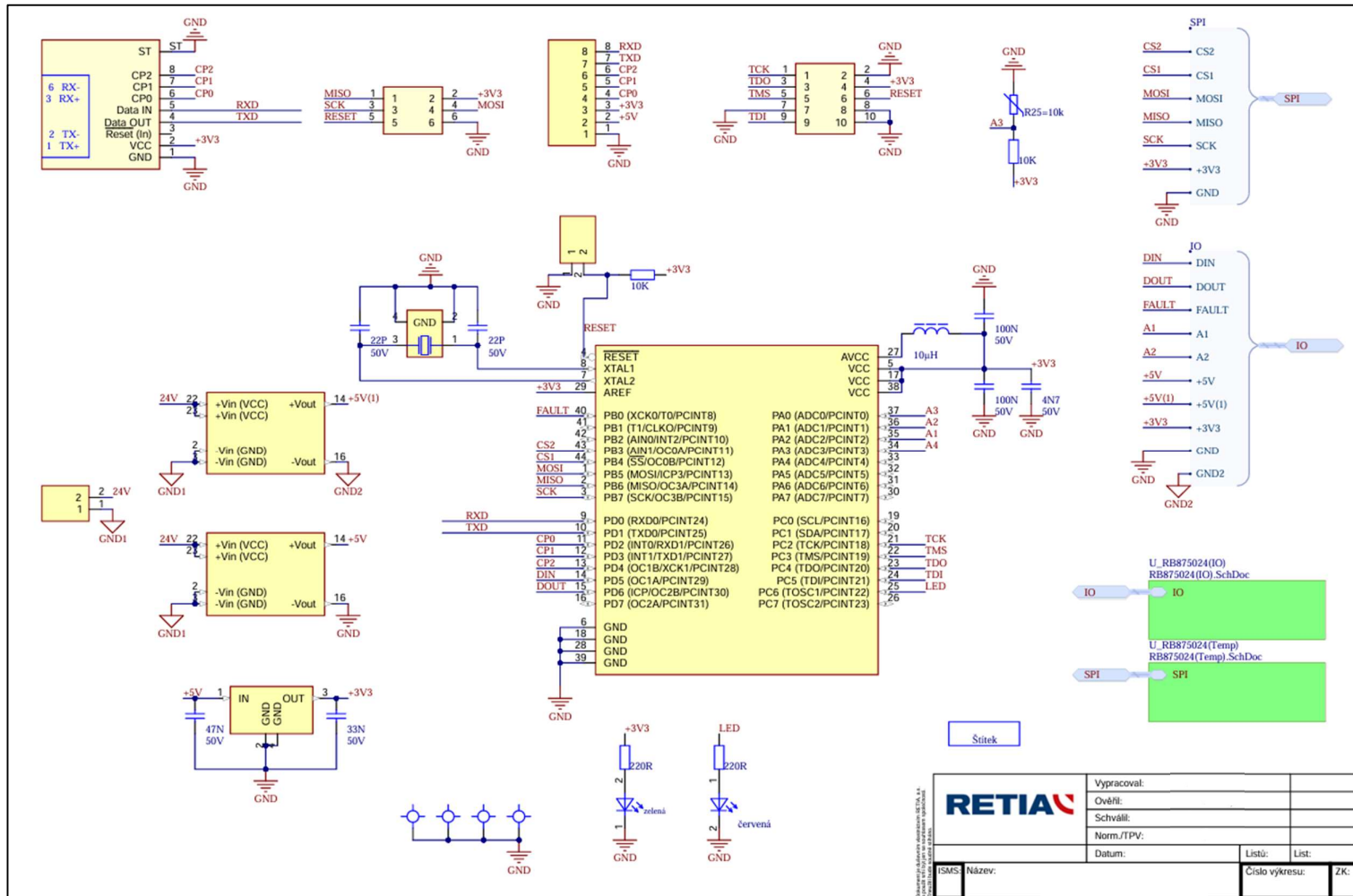
Tabulka 2 Tabulka naměřeného proudu

PŘÍLOHA C: Tabulka kalibrace teplotního vstupu

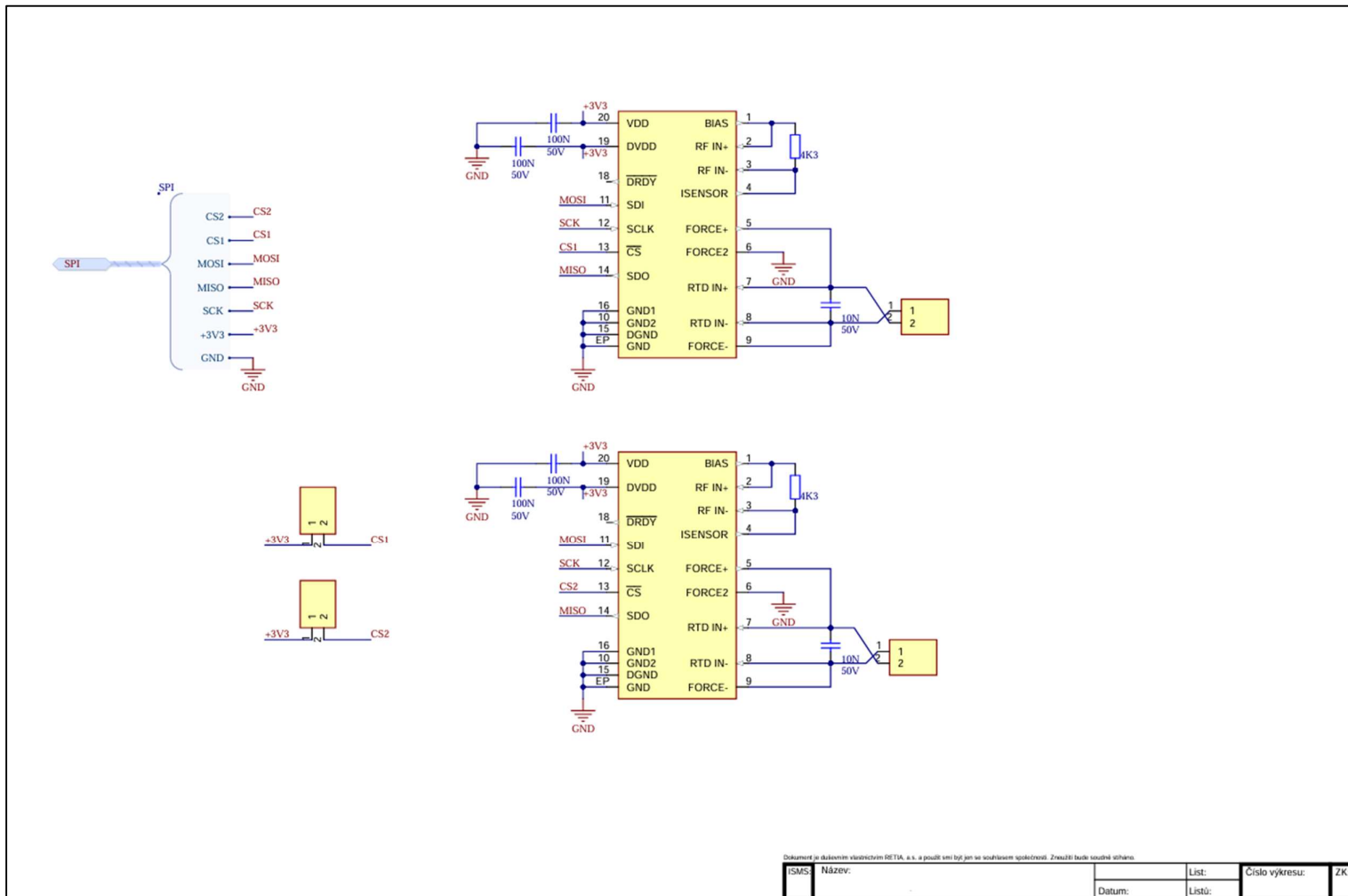
TIN	TMER	ΔX [%]
-18	-18,56	-3,11
-10	-9,73	2,7
0	0,51	-
10	10,37	-3,7
20	20,39	-1,95
30	30,83	-2,76
40	39,25	1,87
50	49,52	0,96
60	59,37	1,05
70	69,21	1,12
80	78,96	1,3
90	88,65	1,5

Tabulka 3 Tabulka naměřené teploty

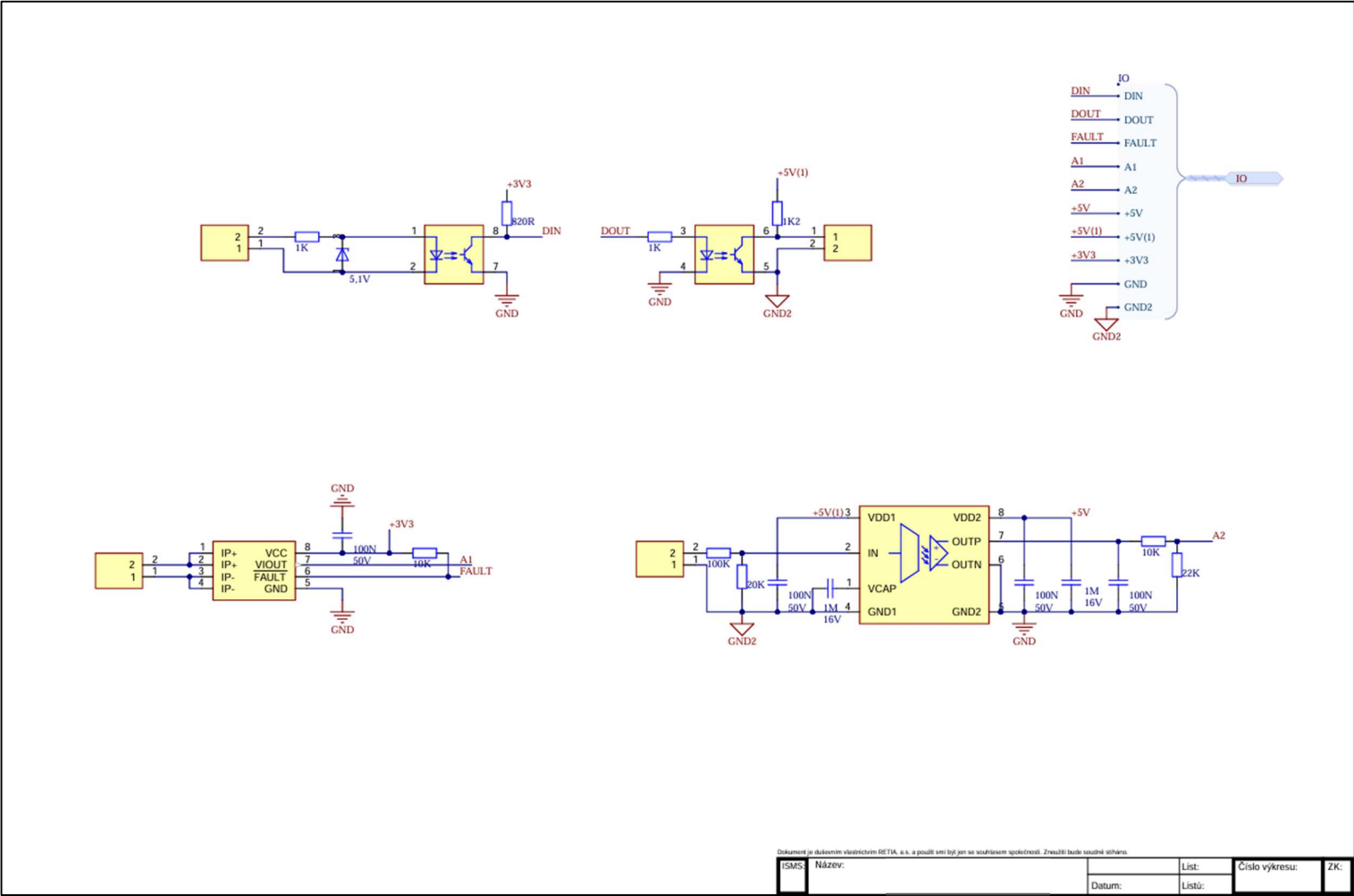
PŘÍLOHA D: Schéma 1/3



PŘÍLOHA D: Schéma 2/3



PŘÍLOHA D: Schéma 3/3



Dokument je důstojným vlastnictvím DEITA, a.s. a použití není příp. jen se souhlasem společnosti. Změny budou součástí úpravy.

ISMS	Název:	List:	Číslo výkresu:	ZK:
	Datum:	Listů:		