

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Lukáš Kuřímský



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ZAŘÍZENÍ PRO AUTOMATIZOVANÁ TESTOVÁNÍ ŘÍDICÍCH JEDNOTEK PLYNOVÝCH KOTLŮ

DEVICE FOR AUTOMATED TESTING OF GAS BOILER CONTROLLERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Kuřímský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2021



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Lukáš Kuřimský

ID: 195376

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Zařízení pro automatizovaná testování řídicích jednotek plynových kotlů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte prototyp zařízení pro automatizované testování řídicí elektroniky plynových kotlů firmy Resideo se zaměřením testů na vyvíjený firmware. Zařízení bude simulovat okolí řídicí jednotky plynového kotle pro simulaci okrajových podmínek, provozních a chybových stavů. Zařízení bude komunikovat s nadřazeným systémem (PC) za použití protokolu Modbus a bude od něj galvanicky odděleno. Preferována je modulární koncepce návrhu s použitím součástek běžně používaných ve firmě Resideo. Základní bloky použité pro simulaci elektrického zařízení by měly být stavové spínače, odporové snímače teploty, analogové senzory, bloky pro simulaci čerpadel se zpětnou vazbou, průtokoměry s pulzním výstupem, ventilátorů a pro simulaci elektrických vlastností plamene. Vstupy testera by měly snímat stav řídicí jednotky plynového kotle.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 25.5.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

Konzultant: Ing. Michal Štěpánek, Resideo, Ademco CZ s.r.o.

doc. Ing. Lukáš Fucik, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací počítačem řízeného zařízení k testování řídicích jednotek plynových kotlů, především ve fázi vývoje. Důvodem vytvoření testovacího zařízení je nedostatečnost starších testovacích systémů a automatizace stávajícího testování. Testovací zařízení se skládá z různých jednotlivých karet. Karty po zasunutí do základní desky plní svou funkci v systému. Každá z karet má speciální funkcionalitu, která simuluje reálné podmínky vyvíjeného produktu.

Základem většiny karet je mikrokontrolér s jádrem Cortex-M, který pomocí protokolu MODBUS na komunikačním rozhraní RS-485 komunikuje s připojeným počítačem. Všechny karty jsou na této sběrnici spojeny paralelně a chovají se jako SLAVE, zatímco počítač se chová na sběrnici jako MASTER a dožaduje se tak dat, nebo posílá příkazy daným kartám.

Karty představují stavové spínače (spínací senzory), odporové a analogové senzory teploty, PWM vstupy a výstupy (pro simulaci zpětnovazebních čerpadel nebo průtokoměrů s pulsním výstupem). Jednou z karet je karta se simulátorem plamene, která simuluje elektrické vlastnosti plamene a jejíž součástí je i simulátor ventilátoru. O snímání výstupů řídicí jednotky se stará karta vstupů, která je určena pro digitální detekci přítomnosti napětí v rozsahu 5 až 230 V stejnosměrných i střídavých. Zároveň pro napájení testovaného zařízení střídavým napětím je vytvořena karta pro připojení napájení při nulovém napětí a odpojení při nulovém proudu.

Celé testovací zařízení by tak mělo plnohodnotně simulovat provozní i kritické podmínky pro testované zařízení. O napájení jednotlivých karet a jejich komunikaci s nadřazeným systémem se stará komunikační karta.

Pro každou kartu bylo navrženo, případně nasimulováno, schéma zapojení, následně ověřena funkce a na základě toho vytvořena každá karta včetně programového vybavení mikrokontroléru. Nejvhodnější řešení a funkce každé karty je pečlivě popsána a zhodnocena.

Všechny požadavky zadání v rámci práce byly splněny a celé testovací zařízení bylo ve čtyřech provedeních vyrobeno a ověřeno. Do budoucna je zařízení připraveno pro implementaci automatického simulátoru plamene a dalších vylepšení jednotlivých modulových karet.

KLÍČOVÁ SLOVA

Testovací zařízení, MODBUS, RS-485, testování elektronických zařízení, počítačem řízené testování, modulové karty, simulátor ventilátoru, simulátor plamene.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design and implementation of a computer-controlled device for testing gas boiler control units, especially in the development phase. The reason for creating a test facility is the inadequacy of older test systems and the automation of existing testing. The test device in development consists of individual different cards. Each of the cards inserted into the motherboard performs its function in the system. Each of the cards has a special functionality which simulates the real conditions of the developed product.

The basis of most cards is a microcontroller with a Cortex-M core, which communicates with the connected computer using the MODBUS protocol on the RS-485 communication interface. All cards on the bus are connected in parallel and behaves as a SLAVE, while the computer behaves as a MASTER and requests data or sends commands to the cards.

The cards represent status switches (switching sensors), resistance and analog temperature sensors, PWM inputs and outputs (for simulation of feedback pumps or flow meters with pulse output). The cards also include a flame simulator, which reliably simulates the electrical properties of the flame and at the same time acts as a fan simulator. The input of the control unit is taken care of by the input card, which is intended for digital detection of the voltage presence in the range of 5 to 230 V DC and AC. Simultaneously, a card for connecting the power supply at zero voltage and disconnecting at zero current is created to supply the tested device with alternating voltage.

A schematic diagram was designed or simulated for each card, then the function was verified and on this basis the whole card was created, including the microcontroller firmware. The most suitable solution and function of each card is carefully described and evaluated.

All the requirements of the assignment within the work were met and the whole test equipment was manufactured and verified in four versions. In the future, the device is ready for the implementation of an automatic flame simulator and other improvements of individual module cards.

KEYWORDS

Testing device, MODBUS, RS-485, electronic device testing, computer controlled testing, module cards, fan simulator, flame simulator.

KUŘÍMSKÝ, Lukáš. *Zařízení pro automatizovaná testování řídicích jednotek plynových kotlů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2021, 144 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Bc. Lukáš Kuřímský
VUT ID autora:	195376
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2020/21
Téma závěrečné práce:	Zařízení pro automatizovaná testování řídicích jednotek plynových kotlů

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského 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, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Pavlu Šteffanovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni a své rodině za psychickou a morální podporu. Především bych však chtěl poděkovat kolegovi a konzultantovi Ing. Michalu Štěpánkovi za cenné rady, užitečné zkušenosti a za vedení celého projektu ve firmě Resideo.

Obsah

Úvod	11
1 Teoretický rozbor požadavků	13
1.1 Testování zařízení z pohledu software/firmware	13
1.1.1 Rozdělení podle fáze testování	13
1.1.2 Rozdělení podle znalosti kódu	14
1.1.3 Rozdělení podle realizace testů	14
1.1.4 Rozdělení podle dimenzí kvality	14
1.2 Testování zařízení z pohledu hardware	15
1.2.1 Funkční testy	15
1.2.2 Testy elektromagnetické kompatibility (EMC)	15
1.2.3 Testy elektrické bezpečnosti	16
1.2.4 Testy měření obvodů	17
1.3 Typy používaných snímačů	17
1.3.1 Odporové teplotní snímače (termistory NTC a PTC)	17
1.3.2 Snímače s napěťovým nebo proudovým vysílačem	18
1.4 Elektrické vlastnosti plamene	19
1.4.1 Způsoby detekce plamene	20
1.4.2 Části plynového kotle	20
1.5 Ventilátory a jejich řízení	22
1.6 Regulátory PID	23
1.7 Čerpadla se zpětnovazebním řízením	24
1.8 Komunikace pomocí rozhraní RS-485	25
1.9 MODBUS protokol	26
2 Celkový koncept platformy	29
2.1 Blokové schéma funkčních a měřicích karet	31
2.2 Blokové schéma komunikační karty	32
2.3 MODBUS protokol a jeho použití	32
3 Řídící části funkčních a měřicích karet	33
3.1 Mikrokontrolér STM32	33
3.2 PSoC - Programmable System on Chip	34
3.3 Volba adresy aplikační karty	34
3.4 Programování mikrokontroléru a PSoC	35
3.5 Komunikační rozhraní RS-485	36
3.6 Základní deska	37

4	Aplikační části karet	38
4.1	Komunikační karta	38
4.1.1	Zdroj s integrovaným obvodem LMR16030	40
4.1.2	Zdroj s integrovaným obvodem LTC3115	41
4.1.3	Výsledná komunikační karta	42
4.1.4	Problém se zámkem (glitchem) při použití integrovaných obvodů SP485	44
4.1.5	Řešení problému s glitchem u integrovaných obvodů SP485	45
4.2	Karta výstupů	46
4.2.1	Výsledná karta výstupů	47
4.2.2	Přehled MODBUS registrů	48
4.2.3	Zapojení konektorů	49
4.3	Karta analogových výstupů	49
4.3.1	Výsledná karta analogových výstupů	52
4.3.2	Měření chyby nastavené hodnoty	53
4.3.3	Přehled MODBUS registrů	56
4.3.4	Zapojení konektorů	57
4.4	Karta digitálních vstupů	57
4.4.1	Simulace digitálního vstupu	59
4.4.2	Teplotní management digitálních vstupů	61
4.4.3	Ověření simulace a výpočtů digitálního vstupu	62
4.4.4	Měření frekvence a střidy pomocí digitálních vstupů	64
4.4.5	Výsledná karta digitálních vstupů	65
4.4.6	Přehled MODBUS registrů	67
4.4.7	Zapojení konektorů	68
4.5	Karta digitálních potenciometrů	68
4.5.1	Verifikace digitálních potenciometrů	71
4.5.2	Výsledná karta digitálních potenciometrů	72
4.5.3	Ověření reálných vlastností digitálních potenciometrů	72
4.5.4	Přehled MODBUS registrů	75
4.5.5	Zapojení konektorů	76
4.6	Karta PWM vstupů a výstupů	76
4.6.1	Nastavitelný napájecí zdroj napětí	78
4.6.2	Digitální část PSoC použitá pro měření a generování PWM signálů	80
4.6.3	Výsledná karta PWM vstupů a výstupů	82
4.6.4	Ověření vlastností PWM vstupů a výstupů	83
4.6.5	Přehled MODBUS registrů	85
4.6.6	Zapojení konektorů	85

4.7	Karta pro napájení DUT	87
4.7.1	Simulace detektoru průchodu napětí nulou a průchodu proudem nulou	91
4.7.2	Ověření simulace detektorů průchodu napětí nulou a průchodu proudem nulou	92
4.7.3	Řešení problému s nestabilním detektorem průchodu proudem nulou	92
4.7.4	Ověření sepnutí a rozepnutí výstupů	95
4.7.5	Výsledná karta pro napájení DUT	96
4.7.6	Přehled MODBUS registrů	98
4.7.7	Zapojení konektorů	98
4.8	Karta simulátoru plamene	98
4.8.1	Měření vlastností plamene	99
4.8.2	Simulátor ventilátoru	105
4.8.3	Detektor polohy škrťacího ventilu	107
4.8.4	Simulátor plamene	108
4.8.5	Výsledná karta simulátoru plamene	109
4.8.6	Ověření funkce simulátoru plamene	110
4.8.7	Přehled MODBUS registrů	112
4.8.8	Zapojení konektorů	112
5	Ovládací software	114
5.1	Příklady ovládání karet	114
6	Prototyp testovacího zařízení	116
	Závěr	117
	Literatura	123
	Seznam symbolů a zkratk	132
	Seznam příloh	141
A	Obsah elektronické přílohy	142
B	Zdrojové kódy	143

Úvod

Nedílnou součástí vývoje elektronických zařízení je provádění testů funkčnosti, spolehlivosti, elektromagnetické kompatibility a samotné testování bezchybnosti firmware vyvíjeného produktu. Je tak potřeba vytvořit co nejbližší podmínky testovanému zařízení (DUT) pro nasimulování reálného prostředí. Zařízení se však ve většině případů testují nejen v pracovních podmínkách, ale i v extrémních situacích, a proto by navrhované zařízení mělo umožnit nastavení širokého rozsahu použitých parametrů. Testovací zařízení bude primárně určené pro vývojáře elektronických zařízení zaměřených na implementaci programového vybavení a jeho testování. Dále by mohlo být využito při provádění tzv. life-testů (testů životnosti zařízení) a pro testování elektronických částí vyvíjených zařízení.

Základní požadavky, které firma shrnula, jsou specifikovány v osmi popsáných měřicích a aplikačních kartách:

- **Karta digitálních vstupů** - měla by obsahovat digitální vstupy s možností připojení širokého rozsahu vstupních napětí, ať už stejnosměrných, nebo střídavých. Zároveň by mělo být umožněno nastavit prahovou hodnotu pro možnost detekce různých napětí.
- **Karta výstupů** - měla by obsahovat digitálně řízené spínače s možností spínání jak malého, tak nízkého napětí.
- **Karta analogových výstupů** - měla by obsahovat analogové výstupy, které po nastavení generují napětí od 0 V do 10 V stejnosměrných, nebo proud od 0 mA do 24 mA.
- **Karta digitálních potenciometrů** - měla by simulovat NTC teplotní snímače. Odpor teplotních snímačů bude nutné řídit v hodnotách od 0 Ω do 100 k Ω s krokem menším než 30 Ω . Kromě nastavení odporu musí karta umět simulovat i odpojený snímač teploty a zkratovaný snímač teploty.
- **Karta PWM vstupů a výstupů** - měla by obsahovat vstupy pro měření frekvence a střídavy vstupujícího signálu a výstupy pro generování PWM signálu s nastavitelnou frekvencí a střídou. Frekvence, která je potřeba měřit, je v rozsahu od desítek Hz až po cirká 20 kHz. Přesnost střídavy by měla být do 1 % pro celý rozsah.
- **Karta pro napájení DUT** - je určena pro napájení testovaného zařízení střídavým proudem. Celkem by měly být k dispozici tři spínané kanály pro možnost ovládní napájení, včetně detekce vstupního napětí a indikace proudu pro každý kanál.
- **Karta simulátoru plamene** - měla by umožňovat simulaci elektrických vlastností plamene společně se simulací ventilátoru.
- **Komunikační karta** - měla by být kartou komunikační a napájecí. Pro ko-

unikaci mezi ostatními kartami se na ní bude nacházet izolovaný převodník mezi USB a RS-485 a pro napájení ostatních karet se bude na této kartě nacházet napájecí zdroj/měnič.

Každá z karet musí obsahovat bezpečnostní galvanické oddělení mezi stranou testovacího zařízení a testovaného zařízení.

Výhodou tohoto zařízení by měla být komunikace pomocí rozhraní RS-485 s protokolem přenosu nazvaným MODBUS. Důvodem volby rozhraní RS-485 s protokolem MODBUS je skutečnost, že se tento druh komunikace využívá nejen na starších testovacích systémech, ale i na většině nově vyvíjených produktech. Proto kvůli zachování zpětné kompatibility s ostatními systémy a výrobky je výhodné použít stejný komunikační systém. Testovací zařízení by tak mělo být buď plnou náhradou, nebo možným rozšířením stávajících testovacích systémů. Zařízení je vyvíjeno z důvodu funkční nedostatečnosti starších testovacích systémů a jejich nedostupnosti, jelikož byly vyvíjeny již zaniklou externí firmou.

Hlavním cílem diplomové práce je návrh celého systému a jednotlivých dílčích částí, výroba, otestování, vývoj programového vybavení a prověření funkčnosti testovacího zařízení na několika zásuvných kartách. Další částí bude i ovládací software v podobě skriptu napsaného v programovacím jazyce Python.

Součástí vývoje by mělo být i měření elektrických vlastností plamene pro vytvoření simulátoru plamene, který by měl simulovat spalovací proces. Elektrické vlastnosti simulátoru by měly být omezeny pouze na simulaci daného měřeného hořáku.

Motivací je možnost získání znalostí a zkušeností od specialistů ve svém oboru a reálný vývoj interního produktu.

1 Teoretický rozbor požadavků

1.1 Testování zařízení z pohledu software/firmware

1.1.1 Rozdělení podle fáze testování

Jednotkové testy

Jedná se o jedny z prvních testů, které řeší programátoři. Výsledkem testů je ověření kódu a funkčnosti v rámci jednotky (unit) [1]. Jednotkou může být samostatně testovatelná část programu. Se zaměřením na procedurální programování se jednotkou stává funkce, program, procedura a podobně [2]. Se zaměřením na objektově orientované programování se jednotkou stává třída nebo konkrétní metoda [2]. Testovaná část by měla být oddělena od ostatních částí a být na nich nezávislá. U těchto testů se využívá automatizace. Za účelem odizolování ostatních částí programu se vytvářejí pomocné objekty (mock objekty), které simulují předpokládaný kontext [3].

Modulové testy

Oproti jednotkovým testům je snaha o testování větší části kódu (celého modulu, nebo komponenty) v rámci celého projektu [1, 4]. Od unit testů se jinak výrazně neliší. Na starosti je mají obvykle programátoři.

Integrační testy

Jsou doménou test inženýrů, kteří po programátorech ověřují funkčnost jednotlivých modulů, nebo komponent jako celek. Integrační testy mají za úkol vyzkoušet komunikaci mezi interními systémy, které využívá nadřazená aplikace [1].

Funkční testy

Funkční testování provádí taktéž test inženýři a předmětem ověřování je funkčnost dílčí části v celém systému. Dále se mohou dělit na testy regresní (opakované testování staršího použitého kódu v novém systému), smoke testy (ověření kritických funkcionalit před funkčním testováním celého systému), sanity testy (zjištění funkčnosti, objevení dalších problémů při drobnějších úpravách v kódu) a testy použitelnosti (ve smyslu psát kód univerzálněji) [1, 5].

Systémové testy

Jedná se o nejvyšší úroveň testů v rámci vývojového týmu, které slouží k ověření splnění očekávané funkce specifikované zákazníkem [1].

Akceptační testy

Akceptační testy jsou testy, které provádí zákazník a které slouží k ověření splnění očekávané funkce, již si zákazník specifikoval [1].

1.1.2 Rozdělení podle znalosti kódu

White Box testy

Těmi mohou být například jednotkové testy, které jsou psané na základě znalosti psaného kódu [1].

Black box testy

Bez znalosti kódu (ale se znalostí zadání) se provádí testování a na kód je hleděno jako na černou skříňku (black box) [1]. Příklady těchto testů jsou funkční a akceptační testy. Sledují se výstupy reagující na základě vstupů.

1.1.3 Rozdělení podle realizace testů

Manuální testy

Tyto testy jsou prováděny nejčastěji test inženýrem podle naplánovaných testovacích požadavků (test case) [1].

Automatizované testy

Jsou testy, pro které se připraví skript (např. Python), nebo jakákoliv jiná procedura, která cyklicky, nebo pomocí popsaných scénářů, za pomoci krátkých programů provádí automatické testování (nastavování vstupů a sledování výstupů) daného systému [1, 3]. Tyto typy testů velmi výrazně zkracují čas testování, ale nelze jimi nahradit všechny typy testů [6].

Exploratory testy

Jde spíše o manuální testování, avšak neprovádí se podle předem připraveného scénáře. Test inženýr si předem zapíše, co bude testovat a zaměřuje se na testování jako na „myšlenkovou“ činnost [1, 5]. Cílem testů je zkoumat, jak se chová testovaný software / firmware.

1.1.4 Rozdělení podle dimenzí kvality

Dimenze kvality jsou definovány normou ISO/IEC 25010:2011 a slouží k přehledu toho, co všechno spadá pod dimenze kvality [3, 4]. Do těchto dimenzí patří: funkčnost

(správné chování systému podle funkční specifikace), výkon (zda systém není příliš pomalý), kompatibilita (možnost kombinace s jinými systémy), použitelnost (zda je systém uživatelsky přívětivý, zda se dobře ovládá), spolehlivost (zkoumání funkce při výpadcích, přetížení), bezpečnost (zda je systém chráněný a zda je bezpečný pro okolí), udržitelnost (možnosti upgrade, testování, modularita) a přenositelnost (mezi systémy, zařízeními) [1].

1.2 Testování zařízení z pohledu hardware

Testování elektronických zařízení z pohledu hardware lze rozdělit na několik kategorií.

1.2.1 Funkční testy

Stejně jako u softwarových/firmwarových testů se provádí testy funkčnosti zařízení. Mezi ně patří testy za normálních podmínek, za okrajových teplotních podmínek, při kondenzaci a zvýšené vlhkosti, při teplotních stresech nebo testy podpětí, přepětí a výpadků [7]. U zařízení se zkoumají projevy těchto vlivů na funkčnosti obvodů a elektronických součástek.

1.2.2 Testy elektromagnetické kompatibility (EMC)

EMC testy se skládají z EMS (elektromagnetická odolnost) a EMI (elektromagnetické vyzařování). Každá skupina výrobků má normou určenými i další testy, které by měla splňovat [7]. Vypsány jsou jen některé z konkrétních testů.

Testy elektromagnetické odolnosti

EMS testy se dále dělí na:

- **ESD testy** (podle normy EN61000-4.2) - jedná se o test odolnosti zařízení proti přímému a nepřímému elektrostatickému výboji s nábojem dle normy.
- **Testy imunity vůči elektromagnetickému poli** (podle normy EN61000-4.3) - zařízení umístěné v bezodrazové komoře je ozařováno elektromagnetickým polem s určitou intenzitou dle normy.
- **Burst testy** (podle normy EN61000-4.4) - skupina opakovaných pulsů o vysokém napětí vysílaných na napájecí svorky testovaného zařízení. Test představuje rušení v síti vlivem spínání indukivní zátěže.
- **Surge testy** (podle normy EN61000-4.5) - impulzy definovaného tvaru vysílané na napájecí svorky zařízení. Test představuje úder blesku do vedení v blízkém okolí.

- **Testy imunity na napájecích svorkách** (podle normy EN61000-4.6) - na napájecí svorky se vysílá definovaný signál v rozmezí 150 kHz až 30 MHz. Simuluje se elektromagnetické rušení šířené vedením.
- **Testy imunity na poklesy a přerušení napájecího napětí** (podle normy EN61000-4.11) - speciální testy pro pokles napětí o určitou úroveň, nebo úplné odpojení napájecího napětí. Simuluje se výpadek elektrické sítě.

Vyhodnocení testů elektromagnetické odolnosti

Imunitní testy se po provedení hodnotí čtyřmi kategoriemi (třídami) podle problémů a ověřené funkčnosti.

- **Kategorie A:** Normální činnost v rozsahu mezi specifikace.
- **Kategorie B:** Dočasné zhoršení nebo ztráta funkce činnosti, která se obnoví (například reset mikrokontroléru).
- **Kategorie C:** Dočasné zhoršení nebo ztráta funkce činnosti s potřebou zásahu obsluhy (nutnost resetovat manuálně).
- **Kategorie D:** Dočasné zhoršení nebo ztráta funkce činnosti, která se neobnoví (poškození zařízení, ztráta dat, poškození programu).

Dle typu výrobku je pak nutné splňovat konkrétní skupinu (např. pro většinu prostředí je nutné splňovat vždy třídu A, v některých prostředích se spokojíme i s třídou B, pokud lze posoudit krátkodobý výpadek s obnovením funkce jako splňující požadavek) [7].

Testy elektromagnetického vyzařování

EMI testy se dále dělí na mnoho dalších testů v závislosti na skupinu výrobků. Uvedené jsou jen dva zásadní typy [7]:

- **Vyzařování elektromagnetickým polem** (radiated emission) - testované zařízení se umístí do bezodrazové komory a uvede se do běžného provozu. Měří se tak vyzařování rušení elektromagnetickým polem, které testované zařízení generuje. Rušení se měří v rozsahu od 30 MHz do 1 GHz.
- **Vyzařování po vodičích** (conducted emission) - není nutno zařízení umístit do bezodrazové komory. Na napájecích svorkách se měří rušení v rozsahu od 9 kHz do 30 MHz.

1.2.3 Testy elektrické bezpečnosti

Testy elektrické bezpečnosti se zabývají bezpečnostními záležitostmi testovaného zařízení. Řeší se zde izolační vzdálenosti mezi vodiči živými a mezi živými a neživými částmi (například mezi vodiči na plošných spojích a součástkami). Dále se provádějí

testy jako ohřev výkonově zatěžovaných elektronických součástek, provádějí se testy izolační bezpečnosti, měří se únikový proud přes ochranný vodič a podobně [7]. Tyto testy mají velmi zásadní vliv na návrh zařízení.

1.2.4 Testy měření obvodů

Mezi tyto testy se řadí ta nejběžnější možná měření spojená se simulacemi. U navržených obvodů se zkoumá teplota součástek, spotřeba obvodů, provádějí se nejrůznější měření napájecích zdrojů, FMEA analýzy, vytváření krajních případů hodnot součástek, které by v rámci obvodu mohly být osazeny, a podobně [7].

1.3 Typy používaných snímačů

Pro správnou funkci řídicí jednotky plynového kotle je zapotřebí kontrolovat čidla a snímače teploty. V případě odpojení čidla nebo jeho poškození pak řídicí jednotka tento stav detekuje a vyhodnotí problém. Používaná čidla firmou Resideo se nejčastěji dělí mezi odporové teplotní snímače (jejichž zástupci jsou převážně NTC snímače) a snímače s napěťovým nebo proudovým vysílačem (převážně s rozsahem 0 až 10 V, nebo 0 až 24 mA).

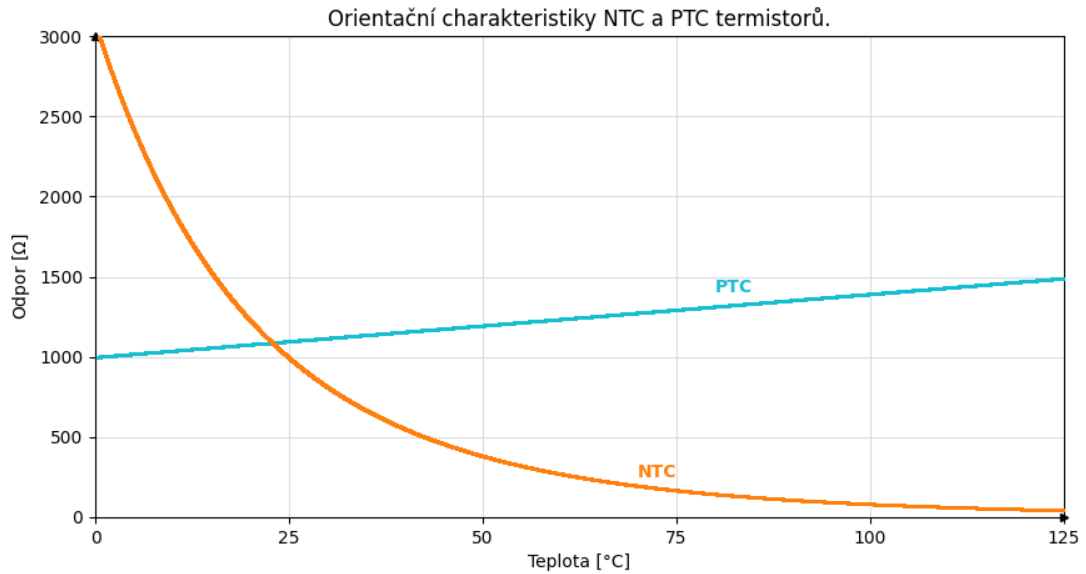
1.3.1 Odporové teplotní snímače (termistory NTC a PTC)

Odporové snímače, nazývané jako termistory, jsou součástky, jejichž odpor je závislý na teplotě. V průmyslu se tyto senzory nejčastěji používají pro měření teploty, tedy jako teplotní snímače. Rozlišují se dva typy termistorů – PTC a NTC. Každý NTC nebo PTC termistor má danou charakteristiku závislosti změny odporu na změně teploty, která je nelineární a je potřeba ji znát pro převod hodnoty odporu na teplotu [8]. Přibližné charakteristiky NTC a PTC snímačů jsou zobrazeny na obrázku 1.1.

U PTC termistoru (někdy nazývaný jako pozistor) se při zvyšující okolní teplotě zvedá odpor [9]. Většinou tak slouží k omezení proudu obvodem při ohřátí součástky, k níž je umístěn jako ochranný prvek.

NTC termistor (někdy nazývaný jako negistor) je opakem pozistoru, má negativní teplotní koeficient a vyznačuje se poklesem odporu při zvyšující se okolní teplotě [9]. Nejčastěji se používá NTC termistor jako teplotní snímač z důvodu vysoké změny odporu s teplotou.

Oba typy PTC i NTC termistorů se identifikují odporem při pokojové teplotě 25 °C. Nejčastějším PTC termistorem, který se používá, je platinová PT100 (PTC termistor) s odporem 100 Ω při teplotě 25 °C. NTC termistory mívají hodnoty odporu řádově 10 až 100 kΩ při teplotě 25 °C.



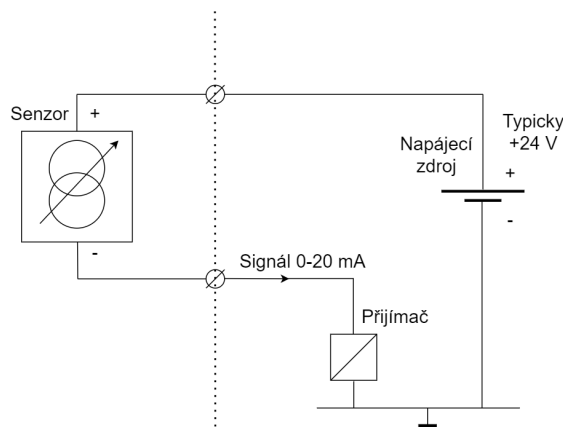
Obr. 1.1: Orientační charakteristiky závislosti elektrického odporu na teplotě u NTC a PTC termistorů.

1.3.2 Snímače s napěťovým nebo proudovým vysílačem

Analogové signály 0 - 10 V a 4 - 20 mA jsou unifikovaným výstupním signálem z nejrůznějších čidel, senzorů a převodníků.

Proudový vysílač

Proudový vysílač, nebo častěji proudová smyčka, se vyznačuje svými odolnými vlastnostmi vůči elektromagnetickému rušení. Snímač s proudovým vysílačem často nemá další napájení a napájí se tak z minimální hodnoty proudu do 4 mA. Proudová smyčka vzhledem ke Kirchhoffovým zákonům využívá důsledek, kdy proud tekoucí uzavřenou smyčkou má ve všech místech smyčky stejnou velikost. Proudové vysílače jsou skvělé pro velké vzdálenosti mezi měřeným prvkem a měřicím systémem. Určené jsou i do prostředí s vysokou hladinou elektromagnetického rušení, kde nelze použít reprezentaci signálu napětím. Vysílačem může být pro jednoduchost regulovaný zdroj proudu a přijímač, který bude měřit napěťový úbytek na přesném odporu s nízkou impedancí (bočník). Výhodou je jednoduchá detekce přerušení kabelu ke snímači, neboť tekoucí proud bude nižší než 4 mA. Rozhraní 20 mA proudové smyčky je standardizováno v normě DIN 66258 [10, 11]. Napájecí napětí smyčky bývá většinou 24 V stejnosměrných. Blokové schéma proudové smyčky je zobrazeno na obrázku 1.2.



Obr. 1.2: Dvou vodičové provedení proudové smyčky. Převzato z [12].

Napěťový vysílač

Rozhraní 0 - 10 V, případně 0 - 5 V, se používá na krátké vzdálenosti jako výstup teplotních nebo vlhkostních snímačů a často také v oblasti stmívačů svítidel [10, 11]. Nevýhodou oproti proudovému vysílači je menší odolnost vůči elektromagnetickému rušení. Převážně se jedná o zařízení jako motory, ventilátory, napájecí zdroje i relé, které mohou degradovat takto citlivý signál. Zároveň je nevýhodou citlivost na poklesy napětí, které způsobuje odpor delších vodičů. Jedinou výhodou těchto napěťových rozhraní tak zůstává cena, která je nižší, než u proudového vysílače.

1.4 Elektrické vlastnosti plamene

Proces spalování je složitý a často stochastický proces. Plamen způsobuje, že je proud veden přednostně v jednom směru. Tento jev se nazývá usměrnění plamene [13].

Svým způsobem si lze představit, že se plamen chová jako velmi špatný elektrický vodič s vysokým odporem a zároveň jako horší vakuová dioda. Flame rod, neboli elektroda plamene, působí jako jedna elektroda, která je pomyslně připojena k plameni. Druhou elektrodou, proti které dochází k měření, je kovový povrch spalovací komory připojený k zemnímu potenciálu. Plamen se musí dotýkat kovového povrchu, aby došlo k vytvoření uzavřeného obvodu. V rámci usměrňujícího efektu plamene dojde při aplikaci střídavého napětí k vytvoření stejnosměrného proudu, který lze detekovat. Pro detekci je nutno vzhledem k velikosti odporu plamene a diodové charakteristice použít zdroj vyššího napětí (typicky okolo 80 až 300 V). Při hoření pak elektroda vykazuje vlastnosti usměrňujícího efektu plamene, který probíhá podobně jako ve vakuové diodě [13]. Pokud se plamen odtáhne od elektrody plamene,

dojde tak k přerušení detekce plamene, neboť se ztratí propojení se zemním potenciálem. Plamen má nelineární charakteristiku (podobnou diodě), která umožňuje velmi spolehlivě rozlišit stav mezi správným plamenem, nehořícím plamenem, zkratem nebo odporem (v důsledku sazí nebo vlhkosti) mezi elektrodou a zemí. Je důležité správný plamen, nebo případně jiné stavy plamene, sledovat, aby nedošlo k explozi v důsledku nahromadění nespáleného plynu.

Plamen se dělí do dvou základních typů v závislosti ke spalování. První je plamen vytvořený předem smíchanou směsí plynu a vzduchu, u kterého dojde před zapálením ke smíchání plynu a vzduchu, a tak k vytvoření dokonalé směsi k hoření. Druhý se nazývá difúzní plamen. U něj dochází k difúzi vzduchu do plynu až v plamenu. Difúzní plamen má nižší účinnost než plamen s předem smíchanou směsí.

Poměr mezi množstvím vzduchu, který je skutečně přiváděn do spalovací komory, a teoretickým množstvím vzduchu, který je nutný pro ideální spalování, je vyjádřen součinitelem přebytku vzduchu, jinak označovaným jako λ [14]. Poměr λ pro stechiometricky přesné spalování činí hodnotu 1.

1.4.1 Způsoby detekce plamene

Detekce plamene je v procesech plynových kotlů velmi důležitá. Řídicí systém musí zjistit přítomnost plamene, když je otevřen plynový ventil. Pokud by se tak nestalo, nespálené palivo by se hromadilo a mohlo by způsobit udušení, nebo s případným zdrojem vznícení i výbuch. K detekci plamene se nejčastěji používají dvě hlavní metody.

První je za pomoci optického detektoru, který sleduje ultrafialovou složku světla, kterou plamen produkuje. Plamen obecně produkuje široké spektrum energie od infračerveného až po ultrafialové. Senzory pro infračervené světlo jsou mnohdy levnější než ultrafialové, avšak infračervené senzory jsou snadněji oklamatelné, neboť stěny spalovacích komor mají tendenci vyzařovat viditelnou a infračervenou energii po určité době po ztrátě plamene.

Druhá metoda využívá elektrické vlastnosti (usměrňovacího efektu) plamene snímané prostřednictvím kovové elektrody umístěné do plamene. Tato elektroda je jen kovová tyč v keramickém izolátoru, která umožňuje montáž na stěnu spalovací komory. Oproti ultrafialovému senzoru jsou tyto elektrody plamene levnější, a proto se využívají častěji pro detekci plamene.

1.4.2 Části plynového kotle

Plynový kotel se skládá z několika základních částí. Spalovací komora je základem celého systému a v ní dochází k procesu spalování. O přívod paliva (plynu) se stará

v případě nejjednoduššího systému plynový ventil. Mnohdy je přívod paliva doplněn o zařízení, které řídí množství plynu vstupujícího do systému. Plynový ventil a ventilátor jsou svedeny do trubky s otvorem, ve které dochází ke smíchání vzduchu s plynem před jeho spalováním.

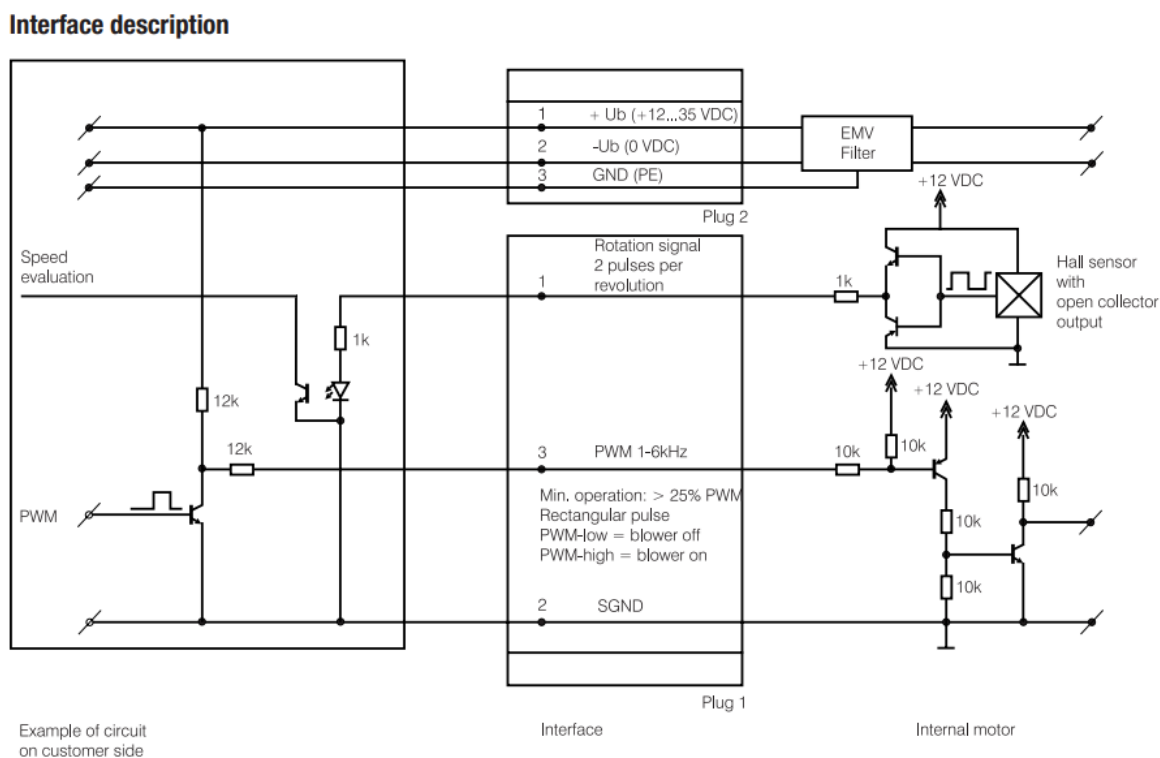


Obr. 1.3: Řez plynovým kotlem Bosch Nefit ProLine Eco HRW24/CW4. Převzato z [15].

Další částí je spalovací hořák, na který trubka navazuje, a ve kterém dochází k procesu spalování. O vhánění vzduchu do systému se stará ventilátor, který svými otáčkami ovládá výkon spalovacího systému. Celý systém ovládá řídicí deska plynového kotle s uživatelským rozhraním pro nastavení parametrů a ovládání zařízení. Vytvořené teplo ve spalovací komoře poté ohřívá vodu v trubkách, která systémem prochází. Průtok vody v systému zajišťuje oběhové čerpadlo. O odvod spalin se stará přívod pro komínovou trubku, který je případně doplněn o odtahový ventilátor. Příklad možného systému plynového kotle, na kterém bude později provedeno měření elektrických vlastností plamene, je na obrázku 1.3.

1.5 Ventilátory a jejich řízení

Ventilátory je možné řídit dvěma základními způsoby - lineárně (ventilátory s komutátorovým motorem) nebo pomocí PWM regulace (ventilátory s bezkartáčovým motorem). Lineární řízení spočívá v řízení napětí přímo připojeného na ventilátor. PWM regulace se používá nejčastěji u ventilátorů s bezkartáčovými motory.



Obr. 1.4: Standardní rozhraní pro řízení ventilátoru firmy EBM Papst. Převzato z [16].

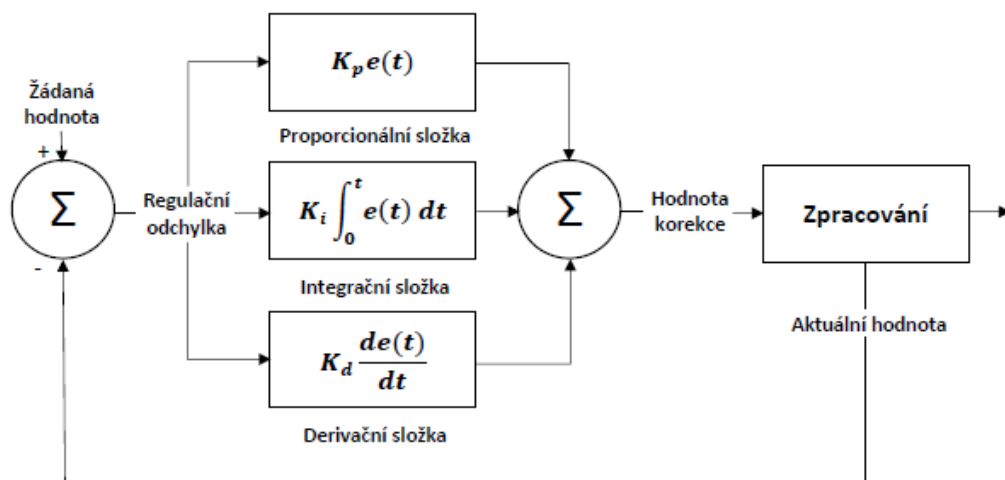
Ventilátory, které se používají u řídicích desek plynových kotlů firmy Resideo, obsahují převážně zpětnovazební řízení otáček PWM regulací. Elektronika kotle obsahuje regulátor, jehož vstupem jsou požadované otáčky, výstupem je signál PWM do řídicí elektroniky ventilátoru a zpětnou vazbu tvoří signál označovaný jako TACHO (frekvence úměrná počtu otáček ventilátoru). Protože testování s reálným ventilátorem je prostorově i hlukově náročné, využívá se často při testování namísto ventilátoru simulátor, který na základě PWM signálu simuluje TACHO signál. Jedno ze standardních rozhraní pro řízení ventilátoru od firmy EBM Papst lze vidět na obrázku 1.4.

Levá oblast obrázku se v přibližné podobě nachází na řídicí desce kotle, pravá část je na straně ventilátoru. Otáčky ventilátoru snímá Hallova sonda, která za pomoci okolních obvodů vytvoří napěťovou úroveň pro spínání (například optočlenu

na straně řídicí desky kotle). PWM signál, který řídí otáčky ventilátoru, je převeden obvykle na stejnosměrnou hodnotu napětí, která ovládá okolní obvody a řídí tak motor ventilátoru.

1.6 Regulátory PID

PID regulátor patří mezi regulátory spojitě a skládá se ze tří základních složek: proporcionální, integrační a derivační. V systémech, které je potřeba řídit, se umístí před řízenou soustavu. Do regulátoru vstupuje regulační odchylka a vystupuje akční veličina (řídicí prvek výstupu).



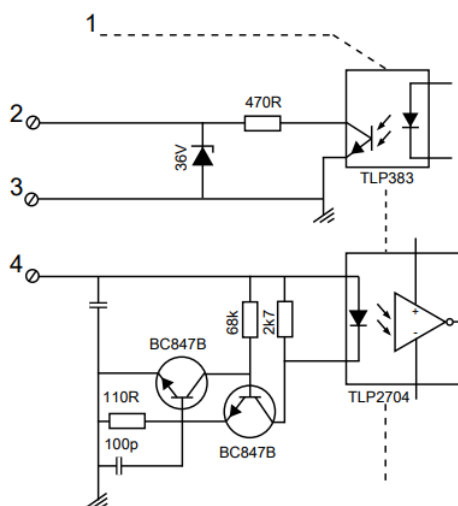
Obr. 1.5: Základní schéma PID regulátoru.

Proporcionální složka se chová jako P regulátor a tedy jen jako jednoduchý zesilovač. Akční veličina je u proporcionální složky přímo úměrná regulační odchylce. Integrační složka se chová jako I regulátor, což je regulátor, u kterého je akční veličina přímo úměrná integrálu regulační odchylky. Derivační složka se chová jako D regulátor, u kterého je akční veličina přímo úměrná derivaci regulační odchylky. Každá z těchto složek má vlastní konstantu, která nastavuje danou složku regulátoru. Proporcionální konstanta se bude projevit rozdílem mezi požadovanou a aktuální hodnotou. Integrační složka nezačne působit okamžitě, neboť je časově závislá. V daném případě je integrace sumací chybových hodnot. Derivační složka je víceméně rozdíl aktuální chybové hodnoty s předchozí chybovou hodnotou. Všechny tři hodnoty se doplňují, avšak pro zajištění stability je potřeba správně nastavit jejich konstanty [17, 18]. Popis zapojení jednoduchého systému s PID regulátorem je na obrázku 1.5.

Regulátor typu PID je však často nevhodným řešením pro některé typy systémů. Proto se pro účely, jako je řízení ventilátoru, používají spíše redukované varianty PID regulátorů jako jsou PI nebo PD regulátory. Svým způsobem se jedná o PID regulátor, který má vyřazenou některou ze složek. Tento krok je mnohdy nezbytný pro zajištění stability, nebo pro nastavení parametrů regulátoru [17, 18].

1.7 Čerpadla se zpětnovazebním řízením

Oběhová čerpadla, jinak nazývaná cirkulační čerpadla, jsou určena k zajištění oběhu média (nejčastěji vody v topném systému). Čerpadla se obvykle používají pro kotle, topná tělesa nebo rozvod teplé vody pro domácnost [19]. Oběhová čerpadla mohou sloužit jak pro oběh teplé vody, tak i pro chlazení v klimatizacích nebo v solárních systémech.



Obr. 1.6: Standardní rozhraní pro řízení čerpadla firmy Grundfos. Převzato z [20].

Regulace výkonu u těchto čerpadel může být plynulá (dle diferenčního tlaku) nebo víceúrovňová ruční (ty se dnes již nepoužívají [21]). Pro jeho správnou funkci je potřeba dostatečný průtok vody. Čerpadlo musí být v souladu s tlakem vody a činností kotle. Cirkulace vody je čerpadlem regulována optimálně dle potřeby a co nejekonomičtěji po celou dobu hoření kotle. Po ukončení hoření se čerpadlo vypíná až po dochlazení hořáku plynového kotle.

Oběhová čerpadla, která je zapotřebí řídit a kontrolovat, pracují na principu nízkonapěťové PWM modulace, kde otáčky závisí na vstupním signálu [20]. Příklad standardního rozhraní pro řízení čerpadla firmy Grundfos je na obrázku 1.6. Frekvence vstupního signálu by se měla pohybovat v rozmezí 100 Hz až 4 kHz [22].

Střída PWM signálu určuje rychlost čerpadla. Zpětnovazební signál má fixní frekvenci 75 Hz [22]. Amplituda vstupního signálu by měla dosahovat hodnot 4 až 24 V [20].

PWM rozhraní čerpadla převádí externí signál na typ signálu, který může mikrokontrolér jednoduše zpracovat. Rozhraní zároveň zajišťuje galvanické oddělení, takže uživatel nebude v kontaktu se síťovým napětím, jestliže se dotkne signálních vodičů připojených k čerpadlu [19, 21]. Typy čerpadel odlišné použitím (tepelné, chladičí nebo solární systémy) se liší způsobem řízení (jejich rychlost se řídí opačně) [21].

Vstupní PWM signál do čerpadla má rozdělené rozsahy podle tabulky 1.1. Řízení je rozděleno tak, aby bylo možné ovládat rychlost otáček čerpadla.

Tab. 1.1: Přehled stavů pro vstupní PWM signál čerpadla. Převzato z [20, 22].

Střída PWM signálu [%]	Status čerpadla
≤ 10	Maximální otáčky čerpadla
>10 a zároveň ≤ 84	Proměnné otáčky mezi maximálními a minimálními
>84 a zároveň ≤ 91	Minimální otáčky čerpadla
>91 a zároveň ≤ 95	Hysterezní rozsah (zapnuto/vypnuto)
>95 a zároveň ≤ 100	Pohotovostní režim, vypnuto

Zpětnovazební signál v tabulce 1.2 je rozdělen tak, aby signál nazpět signalizoval buď spotřebu čerpadla, nebo chybové stavy.

Tab. 1.2: Přehled stavů pro zpětnovazební PWM signál čerpadla. Převzato z [20, 22].

Střída PWM signálu [%]	Status čerpadla
0 - 70	Výkon čerpadla
75	Varování
85	Varování: Elektrická chyba
90	Varování: Chyba, čerpadlo blokováno
95	Pohotovostní režim, vypnuto

Obě tabulky jsou příkladem PWM řídicích signálů a zpětnovazebních signálů některých čerpadel firmy Grundfos často používaných u řídicích jednotek plynových kotlů firmy Resideo.

1.8 Komunikace pomocí rozhraní RS-485

Standard RS-485 je označen jako EIA-485 a jedná se o sériovou komunikaci používanou převážně v průmyslovém prostředí. Rozhraní je určeno do průmyslových aplikací, neboť má velmi silnou odolnost vůči elektromagnetickému rušení. Toho je dosaženo použitím diferenčního páru, nejčastěji pomocí krouceného páru vodičů na straně RS-485. Pokud dojde k indukci rušení do vodičů, rušení se projeví na obou

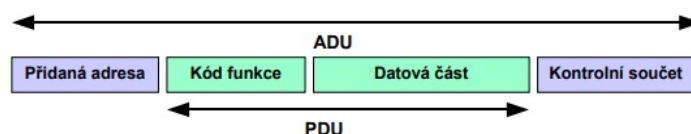
vodičích. Přenos signálu se však vyhodnocuje z napětí mezi vodiči diferenčního páru, a proto indukované (součtové, aditivní) rušení nebude mít na přenos téměř žádný vliv. Tento typ rozhraní lze použít na vzdálenosti v řádech až kilometrů. Oproti lince RS-232, která pracuje s napěťovými úrovněmi ± 12 V, jsou úrovně komunikačního rozhraní RS-485 menší, typicky je rozdíl napětí mezi vodiči okolo 2 V [23]. Linku lze provést jako poloduplexní nebo plněduplexní. Poloduplexní používá jeden pár vodičů pro příjem i vysílání a je nutno mezi těmito dvěma stavy přepínat, zatímco plněduplexní má vodiče čtyři a může tak zároveň přijímat i vysílat. Aby komunikace probíhala na velké vzdálenosti správně, musí být podle toho komunikační vedení přizpůsobené. Toho se dosahuje použitím terminačních rezistorů na koncích vedení. Kromě terminačních rezistorů jsou důležité i rezistory polarizační. To je v podstatě Pull-up rezistor na kladnější linku a Pull-down rezistor na zápornější linku. Tyto rezistory zajišťují, aby přijímače detekovaly správně klidovou úroveň, pokud vysílač nevysílá (obzvláště pokud je přítomné rušení) [24].

1.9 MODBUS protokol

Jedná se o komunikační protokol na úrovni aplikační vrstvy ISO/OSI modelu. Umožňuje komunikovat mezi klientem a nadřazeným systémem. Vytvořen byl roku 1979 firmou MODICON. Podpora tohoto protokolu je na většině komunikačních rozhraní, nejčastěji typu RS-232 nebo RS-485. Komunikace je postavena na metodě požadavek-odpověď, kde požadovaná funkce je upřesněna pomocí kódu funkce v požadavku [25].

Protokol MODBUS definuje dvě části struktury zprávy. Základní tvar zprávy je zobrazen na obrázku 1.7.

1. **PDU (Protocol Data Unit)** - obsahující datovou část a kód funkce.
2. **ADU (Application Data Unit)** - obsahující PDU + přidanou adresu kam požadavek nebo odpověď směřuje a kontrolní součet (CRC).

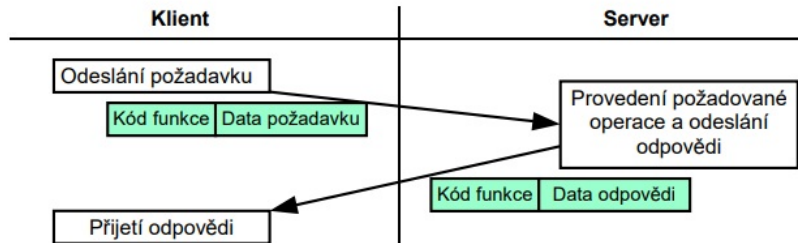


Obr. 1.7: Základní tvar MODBUS zprávy. Převzato z [25].

Data jsou vždy formátována do 16-bitových registrů, 1-bitových registrů (ty však nejsou v dnešní době příliš používány), nebo do záznamů (záznamní soubory).

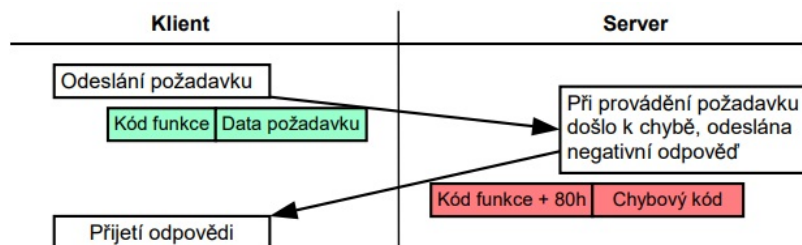
Kód funkce udává, o jakou operaci s daty se jedná (např. zápis do jednoho registru (0x06), zápis do více registrů (0x10) nebo vyčtení registrů (0x03)). Data mohou být jakkoliv interpretována, pokud klient i server pracují správně s daty.

Vykonávání operace může dopadnout pouze dvěma způsoby. Prvním je bezchybné provedení požadavku, které je vidět na obrázku 1.8. Na odeslání požadavku reaguje server provedením operace a odesláním správné odpovědi, na kterou již klient nemusí reagovat. Tato situace je znázorněna na obrázku 1.9.



Obr. 1.8: Vykonávání operace s MODBUS protokolem s bezchybným provedením požadavku. Převzato z [25].

Druhým je řešení požadavku v případě, že dojde k chybě. Pokud však dojde při přenosu k jakékoliv chybě (špatné odeslání dat a podobně), je ze strany serveru odeslána chybová odpověď a klient by na ni měl reagovat.



Obr. 1.9: Vykonávání operace s MODBUS protokolem s chybným provedením požadavku. Převzato z [25].

Přehled struktury pro funkční kód 0x03, tedy vyčtení registrů (Read Holding Registers), je zobrazen v tabulce 1.3. Funkce slouží ke čtení obsahu 1 až 125 registrů v šířce 16 bitů v souvislém bloku. V požadavku se specifikuje adresa prvního čteného registru a počet registrů, jež je třeba číst. Odpovědí od serveru je zpráva s kódem funkce, počtem bajtů a hodnotou registrů.

Přehled struktury pro funkční kód 0x06, tedy zápis do jednoho registru (Write Single Register), je zobrazen v tabulce 1.4. Funkce slouží k zápisu obsahu jednoho

Tab. 1.3: Přehled struktury funkčního kódu 0x03 protokolu MODBUS [25].

Typ zprávy:	Část ADU:	Velikost:	Hodnota:
Požadavek:	Kód funkce	1 bajt	0x03
	Počáteční adresa	2 bajty	0x0000 až 0xFFFF
	Počet registrů	2 bajty	1 - 125
Odpověď:	Kód funkce	1 bajt	0x03
	Počet bajtů	1 bajt	2*N
	Hodnoty registrů	2*N bajtů	
Chyba:	Kód funkce	1 bajt	0x83
	Chybový kód	1 bajt	01, 02, 03 nebo 04

16-bitového registru. V požadavku se specifikuje adresa zapisovaného registru a hodnota, jež je třeba zapsat. Odpovědí od serveru je zpráva s kódem funkce, adresou registru a hodnotou registru.

Tab. 1.4: Přehled struktury funkčního kódu 0x06 protokolu MODBUS [25].

Typ zprávy:	Část ADU:	Velikost:	Hodnota:
Požadavek:	Kód funkce	1 bajt	0x06
	Adresa registru	2 bajty	0x0000 až 0xFFFF
	Hodnota registru	2 bajty	0x0000 až 0xFFFF
Odpověď:	Kód funkce	1 bajt	0x06
	Adresa registru	2 bajty	0x0000 až 0xFFFF
	Hodnota registru	2 bajty	0x0000 až 0xFFFF
Chyba:	Kód funkce	1 bajt	0x86
	Chybový kód	1 bajt	01, 02, 03 nebo 04

Přehled struktury pro funkční kód 0x10, tedy zápis do více registrů (Write Multiple Registers), je zobrazen v tabulce 1.5.

Tab. 1.5: Přehled struktury funkčního kódu 0x10 protokolu MODBUS [25].

Typ zprávy:	Část ADU:	Velikost:	Hodnota:
Požadavek:	Kód funkce	1 bajt	0x10
	Počáteční adresa	2 bajty	0x0000 až 0xFFFF
	Počet registrů	2 bajty	1 - 120
	Počet bajtů	1 bajt	2*N
	Hodnoty registrů	2*N bajtů	
Odpověď:	Kód funkce	1 bajt	0x10
	Počáteční adresa	2 bajty	0x0000 až 0xFFFF
	Počet registrů	2 bajty	1 - 120
Chyba:	Kód funkce	1 bajt	0x90
	Chybový kód	1 bajt	01, 02, 03 nebo 04

Funkce slouží k zápisu obsahu více 16-bitových registrů. V požadavku se specifikuje adresa počátečního registru, počet registrů, počet bajtů a hodnoty, jež je třeba zapsat. Odpovědí od serveru je zpráva s kódem funkce, počáteční adresou a počtem registrů.

Definovaných funkčních kódů je pochopitelně mnohem více a jsou více přiblíženy daným funkcím pro průmyslové systémy a řešení.

2 Celkový koncept platformy

Spolu se základní myšlenkou vývojářů ve firmě Resideo bylo nutno vytvořit požadavky na celkový koncept. Testovací zařízení by mělo být postaveno na modulární koncepci s možností rozšíření simulujícími a snímacími kartami. Nabízí se jako řešení využít samostatné testovací zařízení (deska obsahující všechny funkční i měřicí náležitosti), nebo modulární testovací zařízení (podobně jako základní deska v počítači).

Aby nebylo nutné konstruovat krabičku nebo kryt na vyvíjené testovací zařízení, byl zvolen modulární koncept Eurocard, tedy desky (karty) unifikovaného rozměru 100x160 mm. Jako kryt je pro tento koncept přímo předpřipravená forma subracku nazvaná Eurorack, která by místo zadní stěny měla upevněnou základní desku s konektory DIN 41612 (konektory jsou standardizovány jako IEC 60603-2). Rozdělení jednotlivých pinů bude vlastní a nebude tak sjednoceno s žádným standardem pro STEbus, VMEbus nebo podobné sběrnice kvůli budoucím možnostem rozšíření tohoto testovacího zařízení.

Právě z důvodu možnosti rozšíření je volena modulární koncepce. Koncept samostatného úplného testovacího zařízení na jedné DPS je kvůli rozměrové náročnosti a budoucímu rozšíření nevhodný.

Proto bylo rozhodnuto, že se zařízení bude řešit modulárně pomocí zásuvných karet se společnou sběrnici, kde každá karta bude mít unikátní adresu a bude plnit svoji funkci, ke které je určena. Základní deska, do které se budou zásuvné karty připojovat, bude upevněna v subracku EuropacPro. Výběrem subracku jsou tak dimenzovány i rozměry a připojovací konektor pro zásuvné karty, které budou mít standardní Evropský formát Eurocard o rozměrech 100x160 mm. Ovládání zařízení bude řešeno pomocí připojeného počítače přes komunikační a napájecí kartu, která bude jednou ze zásuvných karet. Úplná autonomnost systému se prozatím neuvažuje. Do testovacího zařízení by mělo být možno umístit až 13 zásuvných karet.

Jako zdroj pro napájení byl primárně zvolen výstup z bezpečnostního rozvaděče s jističí a stop tlačítkem na obrázku 2.1, který poskytuje napájení 24 V střídavých s maximálním dodaným proudem 2 A. Sekundárně, pro možnost testů v laboratořích, by měla být možnost připojit jako zdroj pro napájení nabíječku na notebook, nebo podobný napájecí adaptér s napětím od 19 V (do 30 V) stejnosměrných. K usměrnění a stabilizaci bude sloužit komunikační karta. Ta kromě převodníku mezi USB a RS-485 bude mít na sobě kompletní zdroj s výstupním napětím 24 V stejnosměrných. Toto napětí bylo zvoleno podle standardního napájecího napětí na vyvíjených produktech.

Jednotlivé aplikační karty se budou skládat ze základní části (mikrokontrolér, napájecí zdroje, enkodér pro výběr adresy a komunikační rozhraní) a aplikační části (di-



Obr. 2.1: Rozvaděč s jisticími prvky a výstupem 24 V~.

gitální vstupy, reléové výstupy, analogové výstupy, odporové výstupy, PWM vstupy a výstupy). Řídicím obvodem bude mikrokontrolér STM32L073VBT6 s 32-bitovým jádrem ARM Cortex-M0+, který bude obsahovat většina funkčních nebo měřicích karet a bude komunikovat pomocí sériové sběrnice s nadřazeným systémem pomocí protokolu MODBUS. Mikrokontrolér STM32L073VBT6 byl zvolen na základě výběru ze součástkové základny používaných mikrokontrolérů ve firmě Resideo. Daný mikrokontrolér bude pouze na kartách, kde nebude požadována speciální funkcionality, kterou by nedokázal obsloužit. Aby byla komunikace jednoznačná, je nutno každé kartě přiřadit adresu. Výběr adresy bude proveden pomocí manuálního hexadecimálního enkodéru. Programování mikrokontroléru bude umožněno pomocí rozhraní SWD, a to přes programátor J-Link s vestavěným debuggerem.

Pro zlepšení efektivity a zmenšení součástkové základny se nabízejí k využití integrované podoby DC/DC měničů pro stabilizaci napájecích napětí. V některých případech bude odebíraný výkon přes napájecí měniče velký a bylo by problematické jednoduchý stabilizátor uchladit. DC/DC měniče jsou zvoleny z důvodu snížení výkonových ztrát.

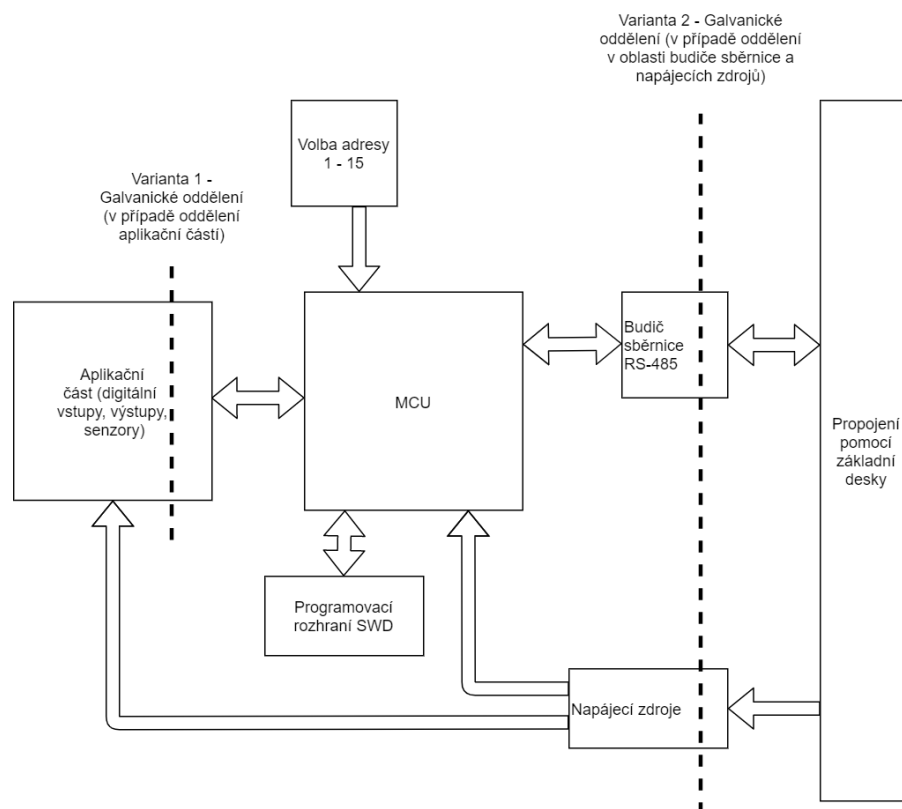
Další částí je samotná komunikace s ostatními kartami. Zde musí být použito převodníku ze sběrnice UART na sběrnici RS-485, která je hlavní páteřní sběrnice mezi kartami a nadřazeným systémem. K převodu mezi sběrnicemi poslouží převodník MAX485 při napájení 5 V (MAX3485 v případě napájení 3,3 V, nebo v případě potřeby bezpečnostní izolace oddělovač s převodníkem ISO3082), který zajistí plnou hardwarovou podporu pro komunikaci. Součástí převodníku by měl být přepínač pro připojení polarizačních rezistorů a terminační rezistor. Ty by měly být připojeny na koncích vedení, tedy mezi první kartou a poslední kartou v testovacím zařízení.

Na všech deskách je nutné mít galvanické oddělení, a to z důvodů zvýšené bezpečnosti při poruše a z důvodu funkčního oddělení a zamezení zemních smyček. Galvanické oddělení u některých karet nebude muset být provedeno v oblasti napájecího zdroje a převodníku komunikace (varianta 2), neboť k němu poslouží sama aplikační část (například relé jako digitálně řízený výstup, zobrazeno na obrázku 2.2 jako varianta 1). Vždy je však nutné vytvořit 5 mm izolační vzdálenost mezi oddělenými částmi z důvodu použitého napětí do 250 V střídavých [26, 27].

Řízení všech karet bude umožněno buď prostřednictvím aplikace vyvinuté softwarovými inženýry firmy Resideo, nebo pomocí navrženého Python skriptu. Aplikace po vytvoření komunikační stránky v cyklickém režimu vyčítá data ze zařízení, nebo posílá data do zařízení. Tato možnost je určena spíše pro manuální ovládání řídicích desek bez automatizace. Ovládání pomocí skriptu je pak určeno k automatizaci a zjednodušení aplikačních a funkčních testů pro vývoj firmware.

2.1 Blokové schéma funkčních a měřicích karet

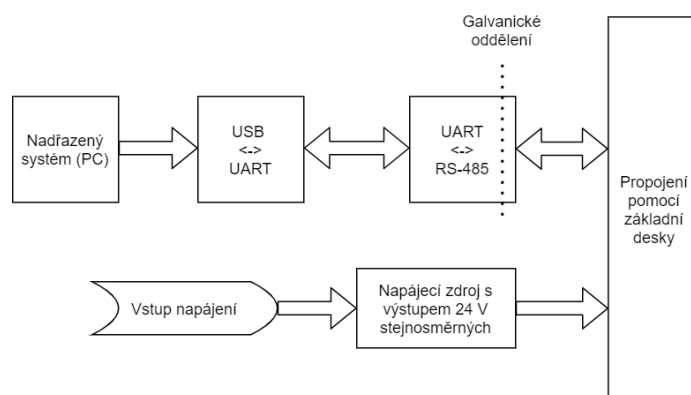
Celý tento rozbor je popsán v kapitole 2 a zakreslen do blokového schématu na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Blokové schéma funkčních a měřicích karet.

2.2 Blokové schéma komunikační karty

Celý tento rozbor je popsán v kapitole 2 a zakreslen do blokového schématu na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: Blokové schéma komunikační karty.

2.3 MODBUS protokol a jeho použití

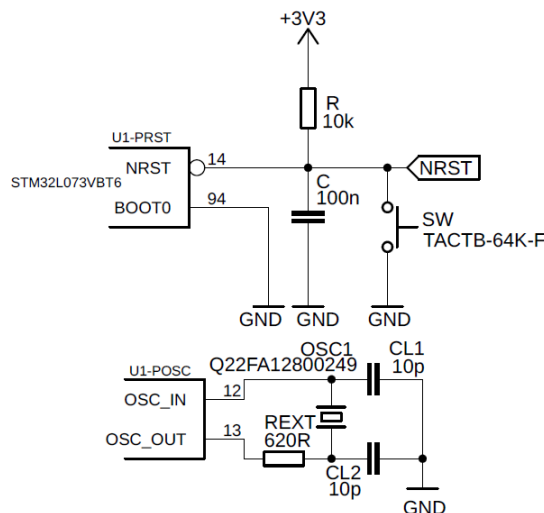
Praktické použití protokolu MODBUS bude pomocí 3 základních funkčních kódů. Budou jimi zápis do jednoho registru (0x06), zápis do více registrů (0x10) a vyčtení registrů (0x03). Každý z nich je definován strukturou popsanou v kapitole 1.9, kterou je potřeba dodržet podle specifikace. Pomocí těchto funkčních kódů bude mezi nadřazeným systémem (PC) a všemi kartami probíhat komunikace. Měřicí karty budou do svých registrů ukládat naměřená data, a tak budou k dispozici pro vyčtení pomocí nadřazeného systému (PC). Funkční karty budou naopak řízeny zápisem z nadřazeného systému (PC), a tak je lze libovolně ovládat. Samozřejmostí je ošetření všech chybových stavů, nevalidních hodnot a problémů při komunikaci.

3 Řídicí části funkčních a měřicích karet

Většina modulových karet bude obsahovat stejný mikrokontrolér STM32L073VBT6. Okolní náležitosti jako oscilátor, zapojení resetovacího obvodu, blokování vstupního napájení kondenzátory, 16-ti polohový rotační enkodér pro určení adresy modulu nebo zapojení programovacího konektoru jsou na všech těchto kartách zapojeny ve stejném provedení. U některých modulových karet jsou periférie připojené na jiné vstupy než u ostatních karet, a to z důvodů optimalizace plochy na DPS, které obsahují velké množství elektronických součástek.

3.1 Mikrokontrolér STM32

Mikrokontrolér STM32L073VBT6 společnosti ST Microelectronics tvoří součástkovou základnu společnosti Resideo, proto byl záměrně zvolen vzhledem k rozsáhlému použití na různých produktech. Mikrokontrolér tak bude základem většiny aplikačních karet a bude zajišťovat komunikaci mezi měřicí nebo funkční částí a nadřazeným systémem (PC).



Obr. 3.1: Zapojení krystalu HSI a reset periférie mikrokontroléru STM32 dle aplikačních poznámek AN2867 [28].

Na obrázku 3.1 lze vidět zapojení krystalu a reset periférie k mikrokontroléru STM32L073VBT6 [29]. Zapojení mikrokontroléru bude podléhat aplikačním poznámkám společnosti ST Microelectronics jako jsou AN2867 pro návrh a výpočet oscilátoru HSI [28] a AN4467 pro základní zapojení součástek pro správnou funkci mikrokontroléru [30]. Zapojený HSI krystal FA-128 osciluje při frekvenci 24 MHz [31]

a jeho frekvence v mikrokontroléru bude vnitřní periférií PLL navýšena až na frekvenci 32 MHz. Při programování pak bude nutné nastavení funkce periférií a využití možností jejich ovládání popsané v referenčním listu mikrokontroléru. Součástí referenčního listu jsou i ukázkové příklady kódů pro ovládání periférií [32].

3.2 PSoC - Programmable System on Chip

Jelikož měření frekvence a střídý vstupního signálu, a zároveň i generování výstupního PWM signálu, jsou časově velmi náročné operace, je pro tuto činnost zvoleno místo mikrokontroléru STM32L073VBT6 integrovaný obvod typu PSoC, neboli Programmable System on Chip firmy Cypress. Použití integrovaného obvodu typu PSoC s označením CY8C5467AXI-LP108 je plánováno pouze na kartu pro měření a generování PWM signálů. Jedná se o integrovaný obvod, který kombinuje vlastnosti mikrokontroléru s jádrem ARM a menšího PLD (programovatelného logického obvodu) [33]. Myšlenkou je využít programovatelné pole pro rychlé zpracování a vzorkování vstupního signálu, a to na až čtyřech kanálech, stejně tak jako generování výstupního PWM signálu. Mikrokontrolér pak bude obstarávat komunikaci a vyčítání hodnot z hradlového pole včetně přepočítání výsledných hodnot.

3.3 Volba adresy aplikační karty

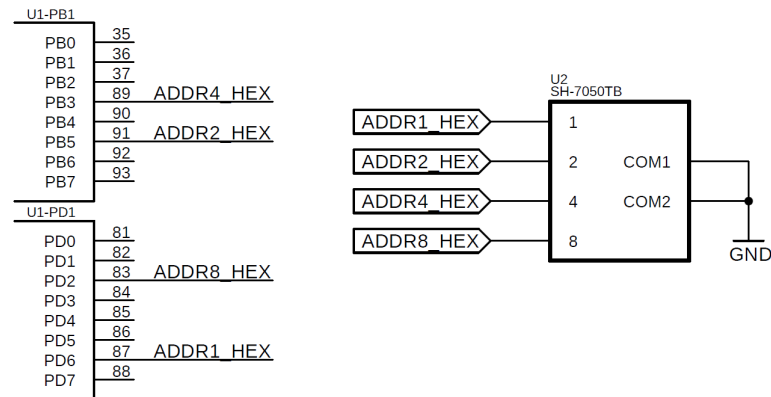
Volba adresy dané aplikační karty je umožněna prostřednictvím 16-ti polohového rotačního enkodéru. Vstupy, na kterých je paralelní enkodér připojen, jsou nastaveny ve vstupním režimu s Pull-up rezistory. Hodnota adresy je tak čtena binárně v hodnotách od "0000" do "1111".

Tab. 3.1: Přehled enkódování adres funkčních a měřicích karet.

Pozice enkodéru	MODBUS adresa
0	16
1	1
2	2
...	...
14	14
15	15

Celkem je možno připojit až 16 různých karet na jednu základní desku. Pozice enkodéru 0 je reprezentována jako adresa 16, neboť adresu 0 nelze pro samostatnou kartu u MODBUS protokolu použít. Enkódování adres je naznačeno v tabulce 3.1. V případě nedostatku adres pro jeden testovací systém lze připojit pod novou instancí druhý testovací systém, avšak samozřejmě s jinou komunikační a napájecí

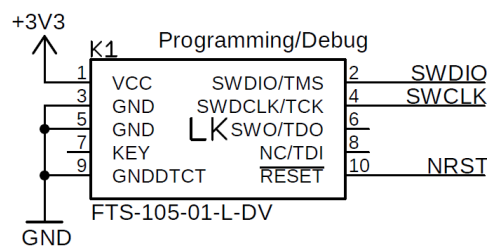
deskou. Na základní desce lze vytažením propojek rozdělit sběrnici do několika segmentů. Zapojení enkodéru k mikrokontroléru lze vidět na obrázku 3.2.



Obr. 3.2: Zapojení 16-ti polohového rotačního enkodéru pro volbu adresy karty.

3.4 Programování mikrokontroléru a PSoC

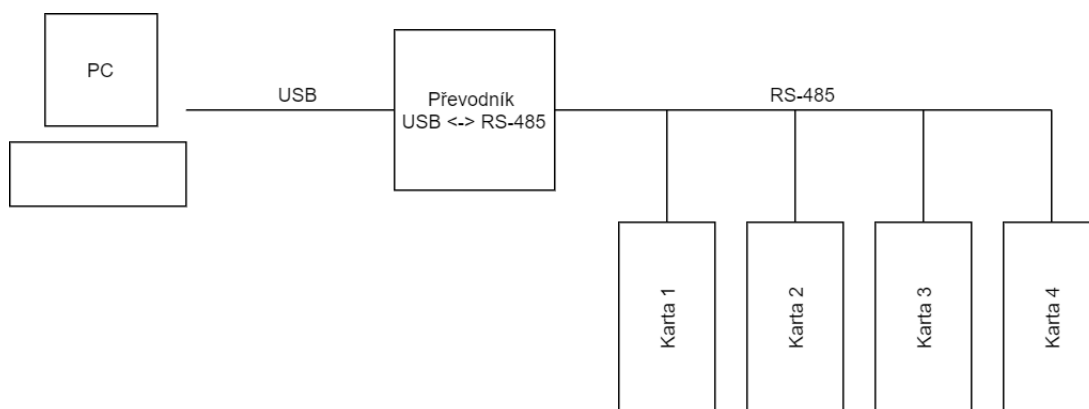
K programování paměti mikrokontroléru STM32L073VTB6 bude využit programátor/debugger J-Link firmy Segger připojený přes rozhraní SWD (Serial Wire Debug). Rozhraní využívá pouze dva signály ke komunikaci (SWDIO pro data a SWCLK pro hodinový signál) a signál RESET [29], [34]. Stejné rozhraní využívá i PSoC mikrokontrolér CY8C5467AXI-LP108, jen je k programování nutno využít programátor PSoC MiniProg3. Tento programátor rovněž podporuje ladění kódu v aplikaci (debugging). Zapojení programovacího konektoru je na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Zapojení programovacího/debugovacího konektoru pro připojení programátoru s rozhraním SWD k mikrokontroléru.

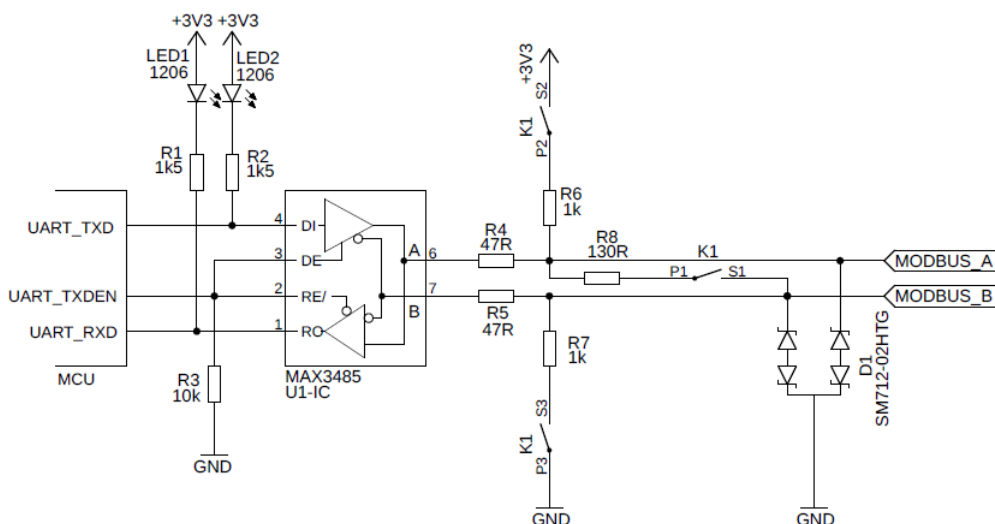
3.5 Komunikační rozhraní RS-485

Součástí řídicí části všech funkčních a měřicích karet je také převodník na komunikační rozhraní UART/RS-485. Dvou vodičové poloduplexní sériové spojení umožňuje připojení více zařízení do jednoho komunikačního rozhraní. Proto bude rozhraní RS-485 využito jako páteřní síť mezi komunikační kartou a všemi měřicími a funkčními kartami. Nadřazený systém (PC) bude poté ke komunikační kartě připojen pomocí komunikačního rozhraní USB. Rozvedení páteřní sítě mezi kartami a nadřazeným systémem (PC) je zobrazeno na obrázku 3.4



Obr. 3.4: Blokové schéma páteřní sítě a jejího propojení s kartami pomocí RS-485.

Jelikož některé desky potřebují kromě napájecího napětí 3,3 V ještě napájecí napětí 5 V, jsou na těchto kartách použity převodníky komunikačního rozhraní UART na RS-485 typu MAX485.

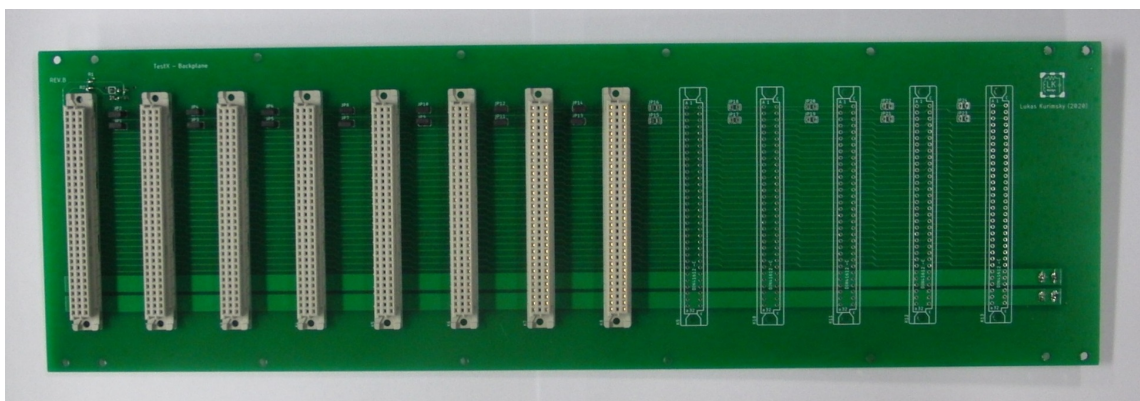


Obr. 3.5: Zapojení převodníku mezi rozhraním UART a RS-485.

U karet s DC/DC převodníkem s výstupem 5 V je použitý integrovaný obvod MAX485 [35] a u karet s výstupem pouze 3,3 V je použitý integrovaný obvod MAX3485 [36]. U desek, kde není v aplikační části dosaženo galvanického oddělení, je oddělení provedeno na straně napájecích zdrojů a převodníků komunikace. Zde lze využít izolovaného převodníku ISO3082 [37]. Standardní komunikační rychlost rozhraní RS-485 je 115200 baudů za sekundu [24]. V dnešní době se to může jevit jako poměrně pomalý přenos dat, avšak pro způsob a možnosti testování, vzhledem k nutnosti použití MODBUS protokolu po tomto komunikačním rozhraní, je to dostatečné. Součástí zapojení je 3-pólový přepínač, který po sepnutí připojí terminační a polarizační rezistory pro správné zakončení vedení. Součástí jsou signalizační LED diody pro optickou kontrolu komunikace. Celé zapojení s integrovaným obvodem MAX3485 je zobrazeno na obrázku 3.5. Ochrana sběrnice RS-485 je tvořena integrovaným obvodem SM712 s interními diodovými poli.

3.6 Základní deska

Základní deska spojuje jednotlivé aplikační karty dohromady pomocí rozvodu sběrnice RS-485 a rozvodu napájecího napětí. Pro budoucí možnou mezimikrokontrolérovou komunikaci je základní deska navržena tak, že jsou paralelně spojeny všechny piny konektorů DIN 41612 mezi jednotlivými kartami. Páteřní síť RS-485 je na základní desce možné pro část desky pomocí vytažení propojek odpojit a vytvořit tak možnost více páteřních linek na jedné základní desce. V případě nepřipojení komunikační karty lze napájet testovací zařízení externě zdrojem napětí +24 V (pomocí dvou Fast-On konektorů na zadní straně základní desky). Stejně tak je připravený i 6-pinový Micro-Fit konektor pro možné připojení externího komunikačního převodníku rozhraní na RS-485. Základní desku lze vidět na obrázku 3.6.

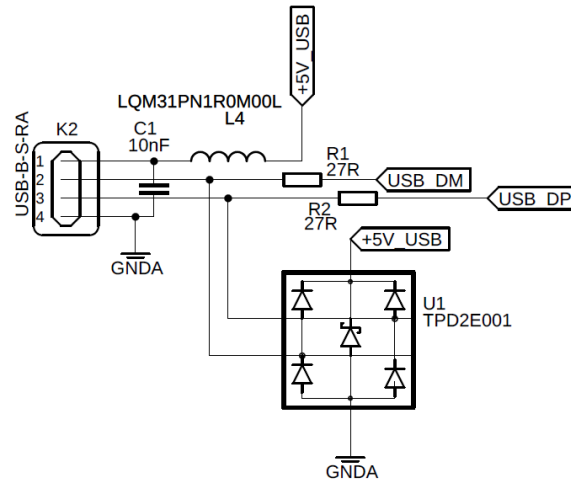


Obr. 3.6: Základní deska pro připojení aplikačních karet.

4 Aplikační části karet

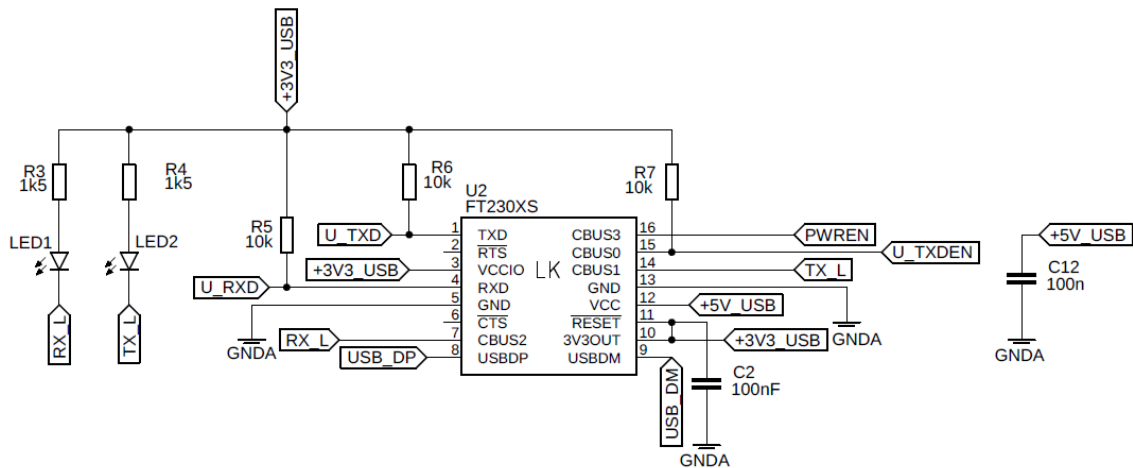
4.1 Komunikační karta

Komunikační karta, jako nejdůležitější z karet, slouží k převodu mezi rozhraními USB a RS-485 pro komunikaci s nadřazeným systémem (PC) a napájení testovacího zařízení napětím 24 V stejnosměrných. Základem je USB konektor spojující nadřazený systém se základní deskou, což je zobrazeno na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: USB vstup na komunikační kartě s ESD ochranou.

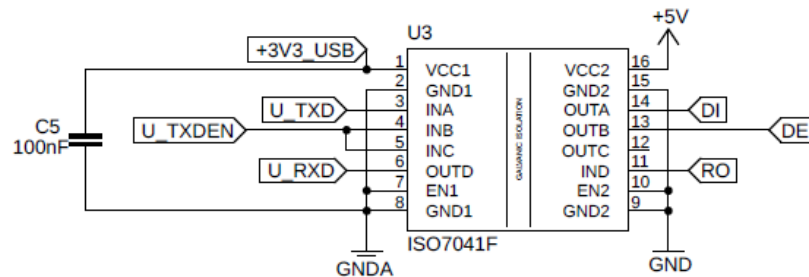
Bezprostředně za USB konektorem se nachází ESD ochrana tvořená integrovaným obvodem TPD2E001 [38] a ochrannými rezistory s hodnotou 27 Ω chránící převodník FT230XS [39].



Obr. 4.2: Zapojení převodníku USB na UART.

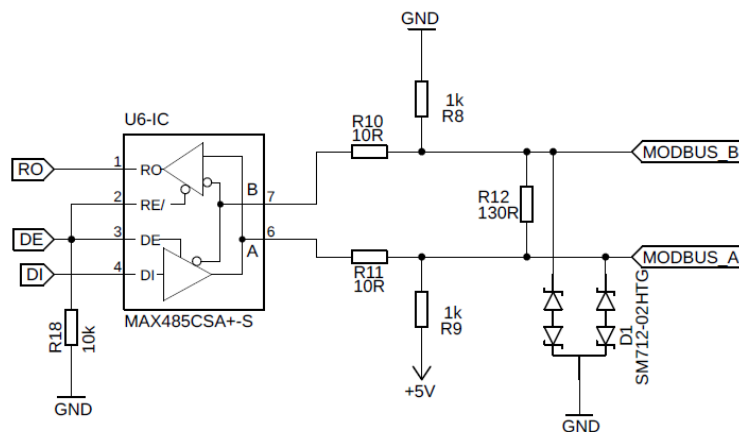
Integrovaný obvod FT230XS zapojený na obrázku 4.2 slouží pro převod mezi sběrnicemi USB a UART [39]. Část USB vstupu převodníku je napájena z USB konektoru napětím 5 V. Probíhající komunikace je signalizována pomocí LED diod.

Dále je komunikace po sběrnici UART izolována pomocí galvanicky odděleného izolátoru ISO7041 [40]. Oddělení slouží k ochraně nadřazeného systému (PC) v případě poruchy. Zapojení izolátoru je zobrazeno na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Zapojení izolátoru komunikace pro galvanické oddělení.

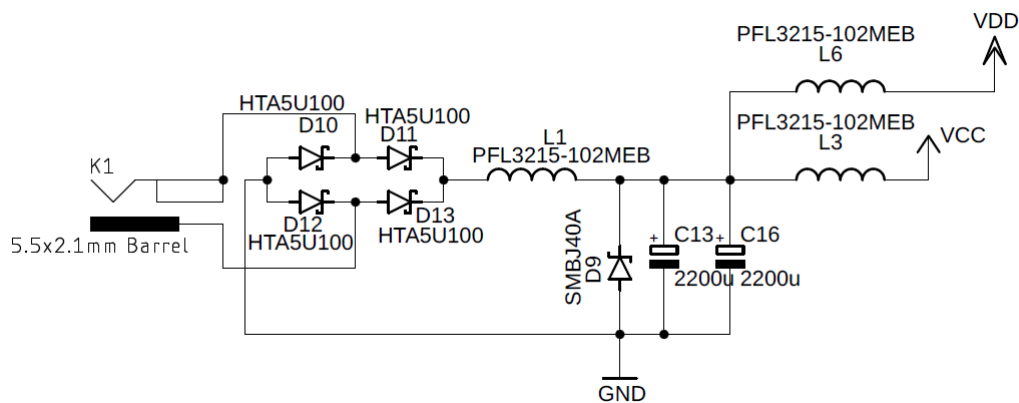
Za izolačním obvodem se již nachází jen převodník mezi sběrnicemi UART a RS-485 typu MAX485 [35]. Ten je zapojen podle standardu a na komunikační desce jako na počátku vedení (každý komunikační systém by měl obsahovat alespoň jednu komunikační kartu) jsou napřímo připojeny polarizační a terminační rezistory. Komunikační karta pro správné přizpůsobení vedení musí být umístěna na fyzickém začátku vedení. Společně s rezistory je samozřejmostí ochrana před přechodovými jevy v podobě integrovaných ochranných diod SM712 [41]. Zapojení převodníku je zobrazeno na obrázku 4.4.



Obr. 4.4: Převodník UART na RS-485 s ochranou.

Komunikační karta zároveň slouží jako napájecí zdroj pro rozvod 24 V stejnosměrného napájecího napětí. Pro připojení střídavého nebo stejnosměrného vstup-

ního napětí slouží konektor typu DC Jack 5,5x2,1 mm. Jelikož odběr všech zapojených karet může být poměrně velký (předpoklad je do 1 A), je nutné zajistit dostatečně výkonný napájecí zdroj. Pro otestování byly zvoleny dva napájecí zdroje, kde první varianta je snižující měnič typu step-down a druhá varianta je měnič typu SEPIC. Nevýhodou těchto měničů je poměrně velké elektromagnetické rušení vyzařováním. Proto je nutné vytvořit co nejméně vyzařující návrh desky plošných spojů napájecího zdroje. Kvůli snížení emisí elektromagnetického rušení byly při návrhu DPS respektovány aplikační poznámky společnosti Linear Technology, kde zmenšením horkých smyček může dojít k velmi výraznému snížení emisí [42]. Před měniči napětí se ještě musí nacházet vstupní usměrňovač a filtrační kondenzátory. Vstupní usměrňovací můstek je tvořen kvůli snížení ztrátového výkonu na diodách Schottkyho diodami HTA5U100, které mají definované napětí 0,55 V při proudu 2,5 A [43]. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 4.5. Pro filtrování špiček a zákmitů se do vstupních obvodů osazují i tlumivky PFL3215 s hodnotou 10 nH [44].

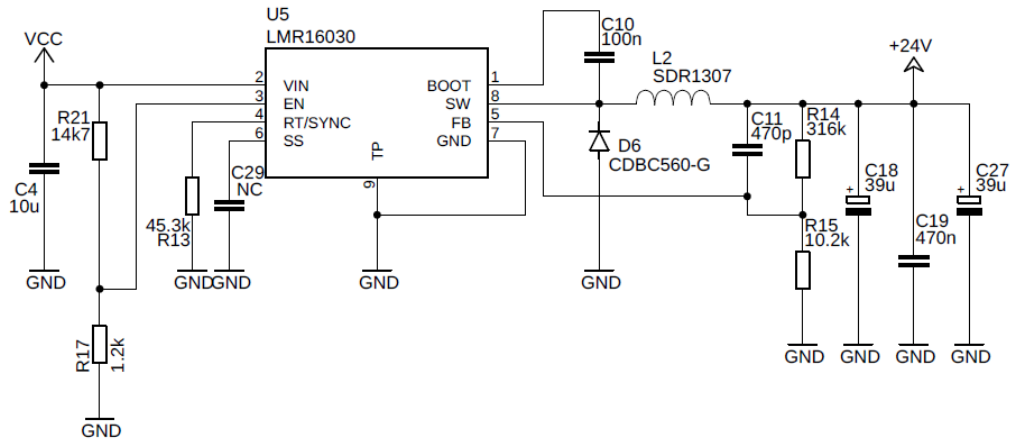


Obr. 4.5: Vstupní usměrňovací můstek tvořený Schottkyho diodami s filtračními kondenzátory.

4.1.1 Zdroj s integrovaným obvodem LMR16030

První varianta zdroje s integrovaným řídicím obvodem LMR16030 [45] je zobrazena na obrázku 4.6. Zapojení i výpočty obou napájecích zdrojů byly vytvořeny za pomoci aplikace WEBENCH[®] Design Center firmy Texas Instruments (vygenerovaný dokument s výpočty a simulacemi je v příloze A). Tato varianta je určena pouze pro napájení pomocí 24 V střídavých z rozvaděče.

Prvky L3 a C4 jsou vstupním filtrem pro měnič LMR16030. Rezistory R21 a R17 se starají o správný náběh zdroje až při nastavené hodnotě napětí pomocí



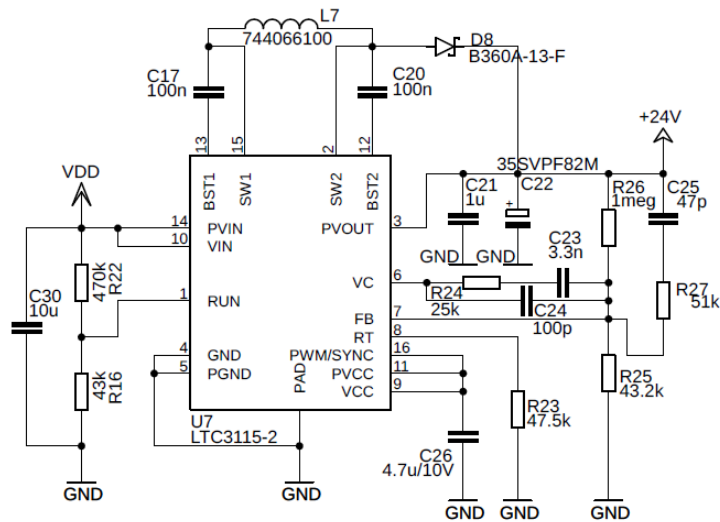
Obr. 4.6: První varianta napájecího zdroje s integrovaným obvodem LMR16030.

děliče a vnitřního komparátoru. Rezistor R13 se stará o časování vnitřního frekvenčního generátoru. Standardní topologie obsahuje induktor L2 a diodu D6, které jsou pro snižující měnič typické. Pro řízení napětí jsou na výstup umístěny rezistory R14 a R15 tvořící dělič zpětné vazby, aby na spodním rezistoru byla hodnota napětí 0,75 V. O stabilitu zpětnovazebného napětí se stará kondenzátor C11. Měnič pracuje na vysokém kmitočtu, proto je nutné dodržet základní pravidla daná výrobcem. Na výstupu jsou připojeny dva elektrolytické kondenzátory s kapacitou 39 μF s nízkou hodnotou ESR a paralelně k nim keramický kondenzátor o hodnotě 470 nF. Kondenzátor C10 se používá pro vnitřní napěťový regulátor, který je určený k řízení vnitřního spínače.

4.1.2 Zdroj s integrovaným obvodem LTC3115

Druhá varianta zdroje s integrovaným řídicím obvodem LTC3115 je zobrazena na obrázku 4.7 a je určena pro napájení i nižším napětím, než je výstupní napětí 24 V stejnosměrných. Zapojení zpětnovazebné sítě je pro tento typ měniče klíčové a je nutno ho v maximální možné míře dodržet. Zapojení zdroje bylo převzato z katalogového listu měniče [46]. Zvolena byla druhá varianta s integrovaným obvodem LTC3115 pro možnost kombinovaného napájení z rozvaděče, nebo z napájecího zdroje pro notebook.

Stejně jako u předchozí varianty měniče napětí, i u této varianty je nutné použít dělič napětí pro spuštění měniče až při dosažení vstupního napětí na hodnotu 14,5 V (určeno děličem napětí R22 a R16, vstupní reference je 1,21 V). Pomocí rezistorů R26 a R25 je nastaveno výstupní napětí tak, aby na rezistoru R25 bylo napětí 1 V. Pro stabilitu napájení interní logiky je použitý kondenzátor C26 s hodnotou 4,7 μF . Měnič typu SEPIC využívá dvou spínačů připojených k induktoru L7.



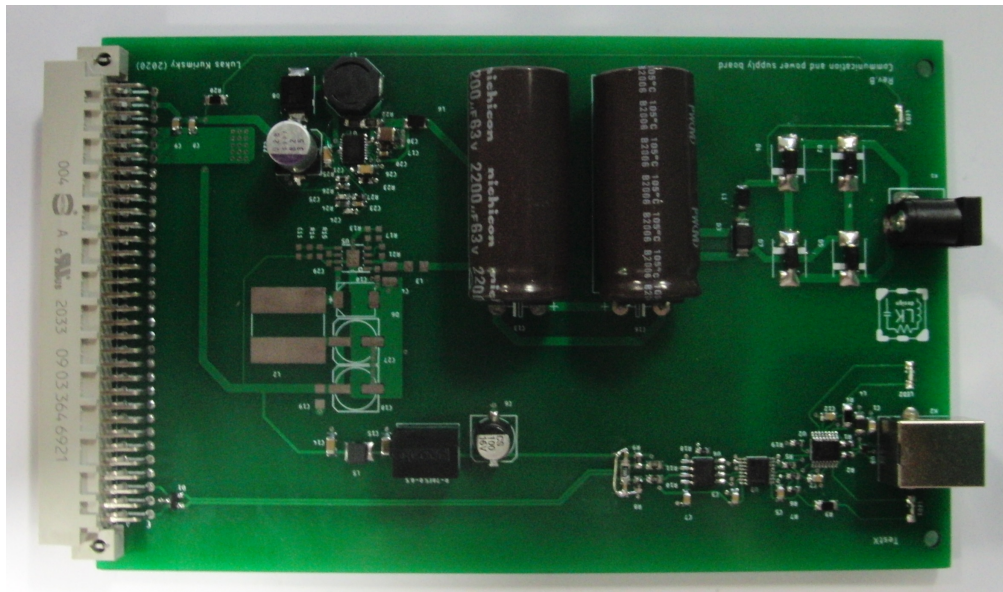
Obr. 4.7: Druhá varianta napájecího zdroje s integrovaným obvodem LTC3115.

Při rychlém spínání prochází induktorem proud, který se při odpojení snaží udržet a vlivem Lenzova zákona se napětí na induktoru otočí. Napětí se při otočení na induktoru přenesse přes Schottkyho diodu D8 a dostane se na výstupní kondenzátory C21 a C22. Nutno podotknout, že výstupní kondenzátor C22 s hodnotou $82 \mu\text{F}$ musí mít stejně jako vstupní kondenzátor C30 nízké ESR. Rezistor R23 slouží k nastavení frekvence spínání daného integrovaného obvodu. Zapojení bylo vytvořeno na základě zapojení z katalogového listu [46].

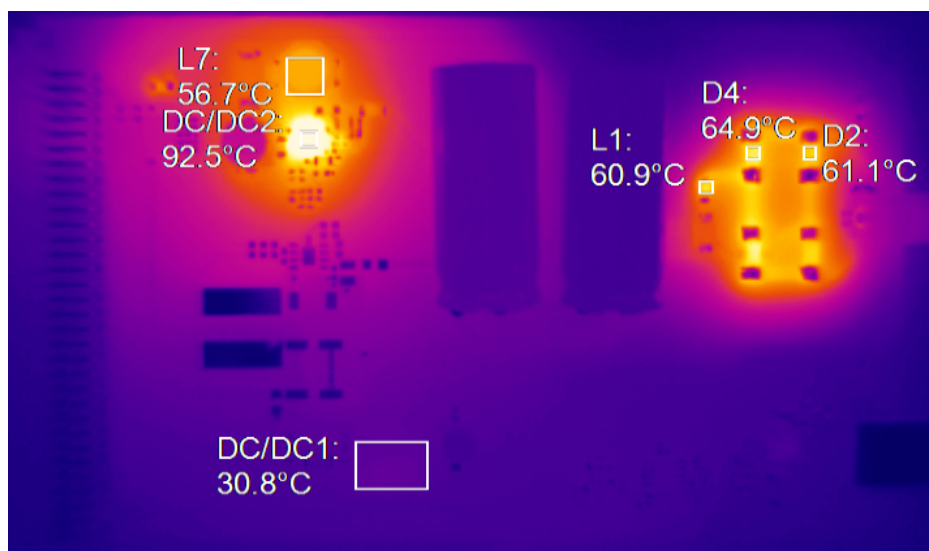
4.1.3 Výsledná komunikační karta

Výsledná karta je zobrazena na obrázku 4.8. Osazená a testovaná je druhá varianta napájecího zdroje s integrovaným obvodem LTC3115. Spotřeba naprázdno je přibližně 20 mA včetně napájení komunikačního rozhraní. Na obrázku 4.9 se nachází snímek z termokamery po zatížení napájecího zdroje zátěží 24Ω . Při měření dosahovalo střídavé napětí na vstupu hodnoty 25,1 V. Napětí na výstupu při plném zatížení dosahovalo hodnoty 23,9 V a proud protékající výstupem měniče 1,01 A. Při těchto hodnotách se teplota na spínacím měniči ustálila na $92,5 \text{ }^\circ\text{C}$ a na induktoru v měniči na $56,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota na spínacím měniči je již hraniční, neboť vlivem dodržení důležitých návrhových pravidel při návrhu desky plošných spojů došlo ke zmenšení chladicí plochy čipu. Vzhledem k použitým Schottkyho usměrňovacím diodám HTA5U100 je ztrátový výkon poloviční, než by byl při použití běžných usměrňovacích diod. Ztrátový výkon na usměrňovacích Schottkyho diodách tak způsobuje oteplení na teploty okolo $61 \text{ }^\circ\text{C}$. Dodávaný výkon však postačuje, proto lze prohlásit návrh za uspokojivý. Do budoucna by bylo vhodné doplnit

na měnič malý chladič, nebo použít 4-vrstvý plošný spoj kvůli lepšímu rozvodu tepla. Všechny hodnoty teplot byly měřeny při teplotě okolí 20 °C a s kartou volně položenou na stole. K měření byla použita termokamera Micro-Epsilon TIM400.



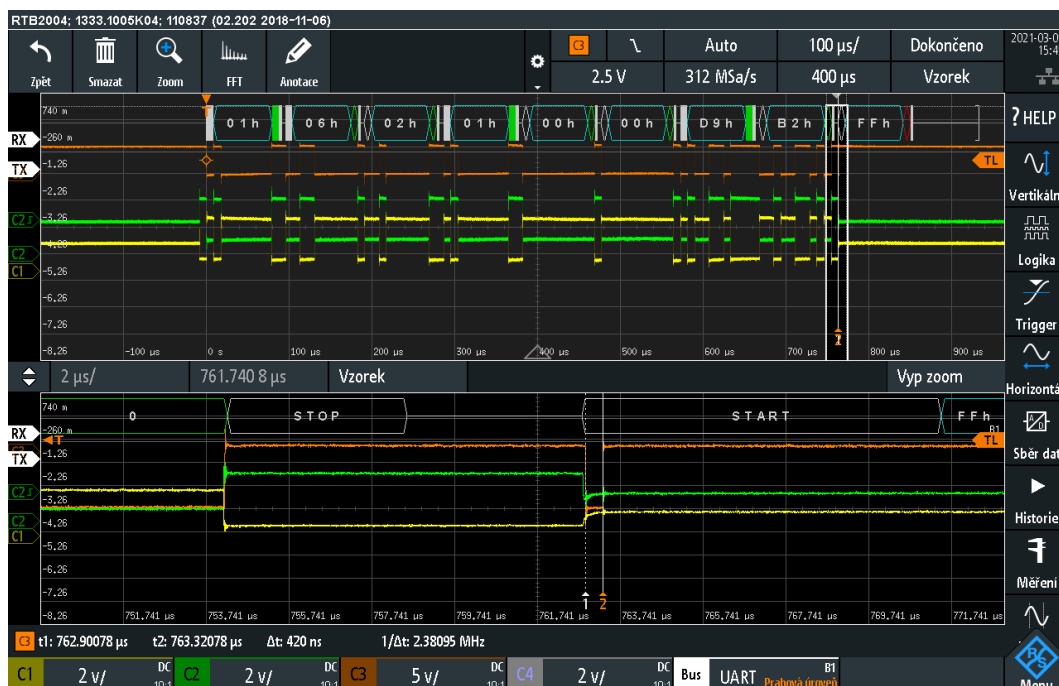
Obr. 4.8: Vyrobená a naprogramovaná komunikační a napájecí karta.



Obr. 4.9: Snímek z termokamery při zatížení napájecího zdroje zátěží 24 Ω.

4.1.4 Problém se zámkem (glitchem) při použití integrovaných obvodů SP485

Vzhledem k velké zásobě starších integrovaných obvodů SP485 [47] a SP3485 firmy Sipex bylo rozhodnuto o jejich využití namísto MAX485. Problém však nastal v případě, kdy více těchto integrovaných obvodů na jedné sběrnici začalo komunikovat. Při zapojení podle výrobce s terminačním rezistorem ($130\ \Omega$) a polarizačními rezistory ($1\ \text{k}\Omega$) se na konci některých z přijímaných paketů objeví krátký zámkem (glitch), který se chová jako startovní bit následujícího paketu. Puls je sice krátký a jeho šířka nabývá $420\ \text{ns}$, ale mikrokontrolér, který data vyhodnocuje, ho považuje za podstatný. Zámkem (glitch) lze vidět na obrázku 4.10.



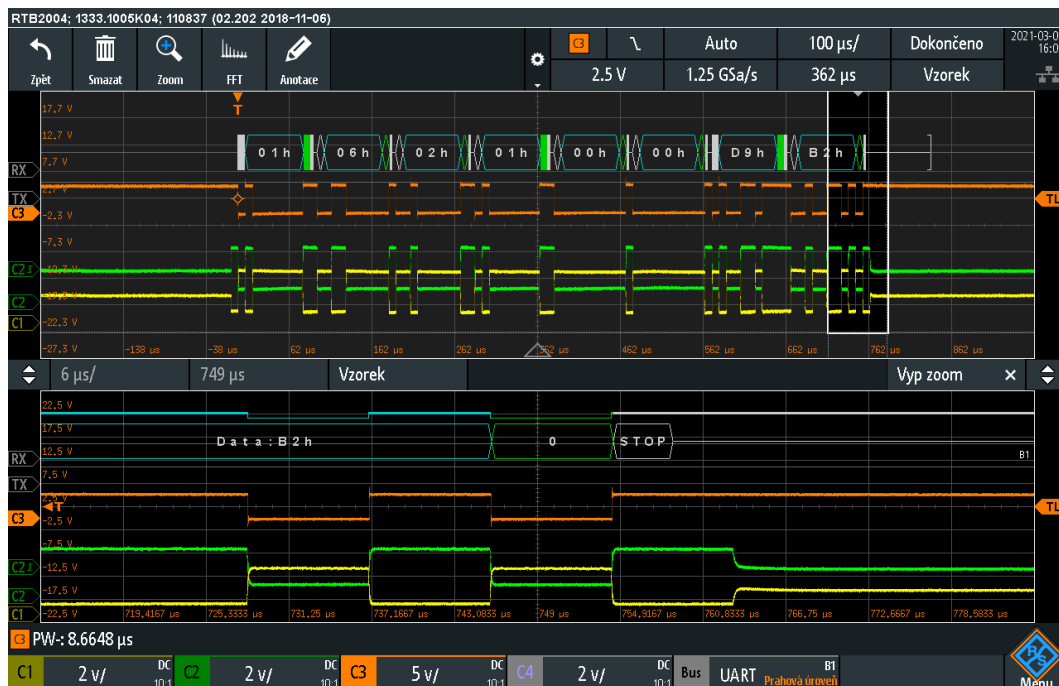
Obr. 4.10: Krátký zámkem (glitch) na konci paketu komunikačního rozhraní po přechodu z RS-485 na UART.

Na kanálu 1 a 2 byla připojena sběrnice RS-485 vodiče A a B, na kanálu 3 byl připojený RX signál na aplikační desce. Nad signály se nachází ještě rozklíčování paketu pomocí dekodéru sběrnice. Problém nastane vždy při ukončení vysílání, kdy dojde k vrácení se signálů A a B sběrnice RS-485 zpět do jejich klidových hodnot napětí. Integrované obvody SP485 a SP3485 jsou již starší obvody, které nemají tak dobré parametry jako dnešní integrované obvody typu MAX3430 a MAX3462. Jedním z kritických parametrů je rozdílové porovnávací napětí přijímače (anglicky Receiver Differential Threshold Voltage), které se v lepších případech nachází v záporných hodnotách napětí, a vstupní hystereze přijímače (anglicky Receiver Input

Hysteresis) v desítkách milivoltů. Při ukončení vysílání dochází k návratu do klidového stavu sběrnice, přičemž dojde k vygenerování krátkého překmitu. Přijímač na druhé straně tento překmit vyhodnotí jako logickou 0. Mikrokontrolér, který tato data vyhodnocuje, provede posun o 1 bit posledního přijatého bajtu a znehodnotí tak celý přijímaný paket. Snímek byl pořízen osciloskopem Rohde & Schwarz RTB2004.

4.1.5 Řešení problému s glitchem u integrovaných obvodů SP485

Celkem byla vymyšlena dvě řešení tohoto problému. Prvním je ošetření staršího integrovaného obvodu SP485 a SP3485 tak, že se na vodiče A a B sběrnice RS-485 připojí kondenzátory proti zemnímu potenciálu, které zajistí zablokování špiček při vypínání vysílání a tím generování krátkého zákmitu (glitche). Maximální kapacita kondenzátoru by neměla překročit 10 nF (kvůli množství obvodů připojených na sběrnici by mohlo dojít ke kapacitnímu přetížení a budiče sběrnice by nemusely fungovat správně). Zjištěná minimální kapacita, při které se zákmit již negeneruje, je 2,2 nF. Na obrázku 4.11 je vidět výstup přijímače a sběrnice RS-485 ošetřené kondenzátory s hodnotou 2,2 nF. Sondy osciloskopu byly připojeny na stejných místech jako při předchozím měření. Snímek byl pořízen osciloskopem Rohde & Schwarz RTB2004.



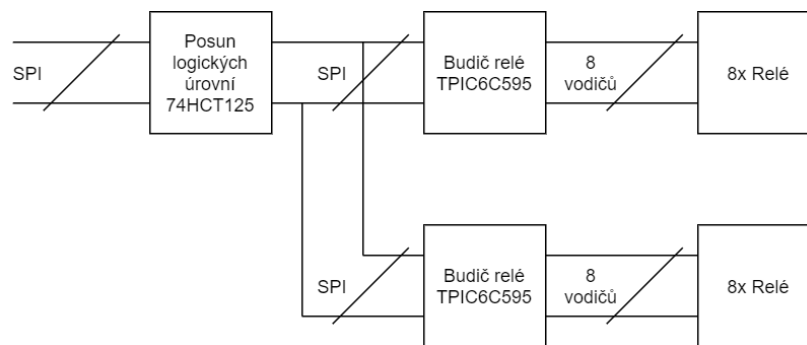
Obr. 4.11: Ošetřené generování zákmitu (glitche) pomocí kondenzátorů s hodnotou 2,2 nF.

Druhé řešení problému je využití sofistikovanějších komunikačních převodníků

jako jsou například MAX3430 [48] nebo MAX3462 [49], jejichž parametry jsou podstatně lepší a obsahují vylepšení typu fail-safe, kde se vstup přijímače stará o zajištění vysoké výstupní úrovně při odpojeném vstupu.

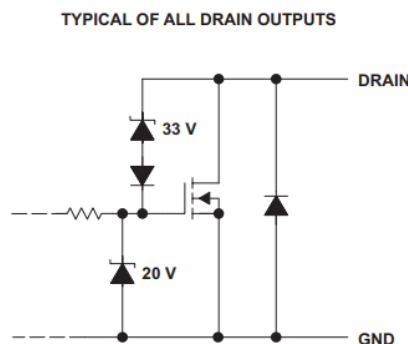
4.2 Karta výstupů

Ve výsledku jsou výstupy realizovány spínacími kontakty relátek. Důvodem je možnost spínání jakéhokoli typu signálu, počínaje spínáním senzorů proti zemnímu potenciálu, nebo proti napájecímu napětí a spínání analogových signálů. Cívky relátek jsou buzeny pomocí serio-paraletního převodníku TPIC6C595. Před tímto převodníkem se nachází pouze oddělovač 74HCT125 [50] pro posun logických úrovní z mikrokontrolérové 3,3 V úrovně na 5 V úroveň signálu, kterou vyžaduje použitý TPIC6C595 [51]. Blokové zapojení karty výstupů je na obrázku 4.12.



Obr. 4.12: Zapojení budiče pro spínání relátek a pomocných obvodů.

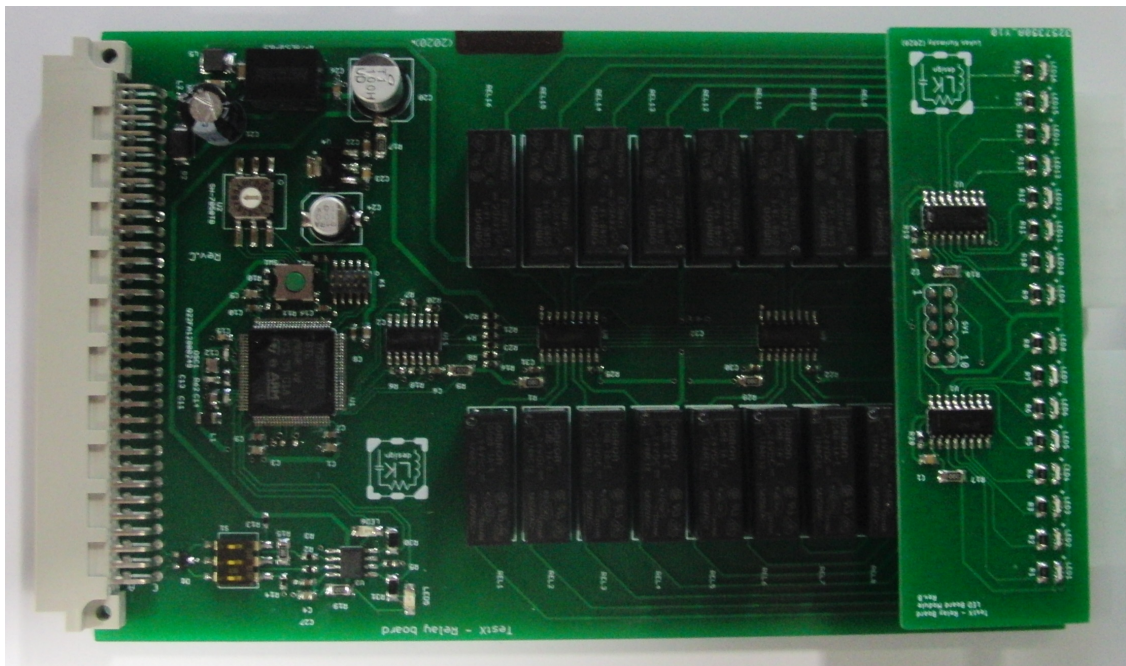
Elegantní řešení v buzení indukční zátěže (cívky relé) je v tom, že integrovaný obvod TPIC6C595 má v sobě integrované ochranné diody, které se při vypnutí postarají o vybití celkové energie z cívky [51]. Ochranné diody jsou společně se spínacím tranzistorem uvnitř integrovaného obvodu zobrazeny na obrázku 4.13.



Obr. 4.13: Výstup integrovaného obvodu TPIC6C595. Převzato z [51].

Tím, že jsou diody přímo v pouzdře budícího obvodu relátek, je spínací tranzistor mnohem lépe chráněn před napěťovou špičkou vznikající při vypnutí tranzistoru uvnitř struktury při připojené indukční zátěži - cívce relé. Zároveň také zajišťuje rychlé vybití energie z cívky relé.

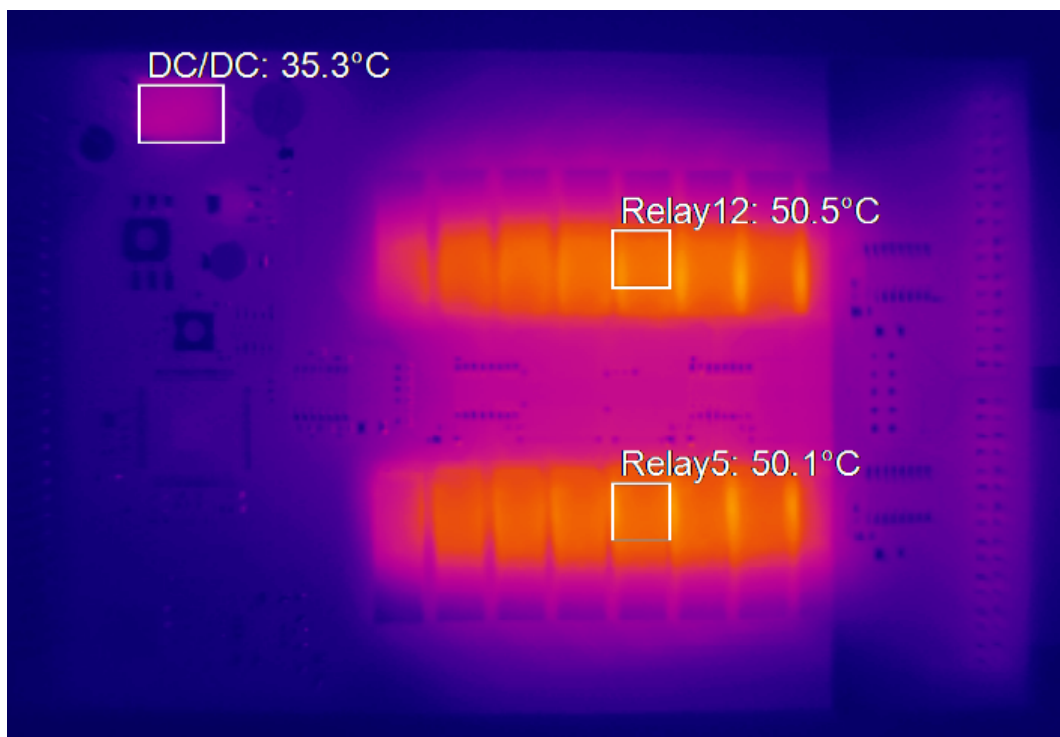
4.2.1 Výsledná karta výstupů



Obr. 4.14: Vyrobená a naprogramovaná karta výstupů.

Použitými relé pro kartu výstupů jsou relé Omron G5NB-1A-E 24VDC napájené z 24 V. Relé sama o sobě vytvářejí galvanické oddělení a jsou schopna přenést signál, nebo proudy až do 5 A [52]. Výsledná karta je zobrazena na obrázku 4.14. Celkem se na desku plošných spojů podařilo umístit 16 relé výstupů. Ty jsou rozděleny na dvě části, které jsou odděleny izolační mezerou o vzdálenosti 5 mm. Dojde tak k rozdělení spínání jak nízkých napětí (230 V), tak malých napětí (nejčastěji 24 V) a to vše pouze jednou kartou digitálních výstupů. Nad kartou výstupů se nachází ještě menší DPS, propojená konektorem typu deska-deska, která slouží pro optickou indikaci sepnutých výstupů. LED diody na této DPS jsou spínány za pomoci dvou 8-kanálových serio-paralelních převodníků. Spínané výstupy jsou na výstupních konektorech vždy nad sebou a jsou číslovány od spodní strany směrem vzhůru.

Spotřeba této karty se pohybuje okolo 135 mA při všech sepnutých kanálech. Maximální spínané napětí na kanálu je 230 V, dané parametry relé a 5 mm izolační vzdáleností. Na obrázku 4.15 je zobrazen snímek z termokamery při sepnutí všech



Obr. 4.15: Snímek z termokamery při sepnutí všech relé.

relé. Nejvyšší teplota je na prostředních relé a dosahuje teploty přibližně 50 °C, což je teplota akceptovatelná pro funkci relé. Všechny hodnoty teplot byly měřeny při teplotě okolí 20 °C a s kartou volně položenou na stole. K měření byla použita termokamera Micro-Epsilon TIM400.

4.2.2 Přehled MODBUS registrů

Stav jednotlivých relé se nastavuje za pomoci MODBUS paketů. Celkem lze využít tři různé příkazy pro ovládání relé, uvedené v tabulce 4.1. Každý příkaz má svůj definovaný registr, do kterého lze zapsat data (určení absolutního stavu relé, sepnutí vybraných relé nebo rozepnutí vybraných relé), nebo ze kterého lze data vyčíst. Vyčítání i zápis mohou mít společný registr, avšak rozdílný funkční kód. Hodnotou je vždy 16-bitové číslo, kde bit 15 definuje relé 16 a postupně dále bit 0 označuje relé 1.

Tab. 4.1: Přehled registrů a funkčních kódů pro ovládání karty výstupů.

Popis příkazu	Funkční kód čtení/zápisu	Registr
Přečíst/nastavit stav relé	0x03 / 0x06	0x0201
Sepnout daná relé	- / 0x06	0x0202
Rozepnout daná relé	- / 0x06	0x0203

4.2.3 Zapojení konektorů

V tabulce 4.2 je vidět zapojení obou konektorů pro kartu výstupů. Oba konektory jsou typu Molex Mini-Fit o dvou řadách po osmi pinech. První číslo v buňce je číslo pinu na konektoru, za ním se nachází označení relé a za pomlčkou o který z pinů relé se jedná.

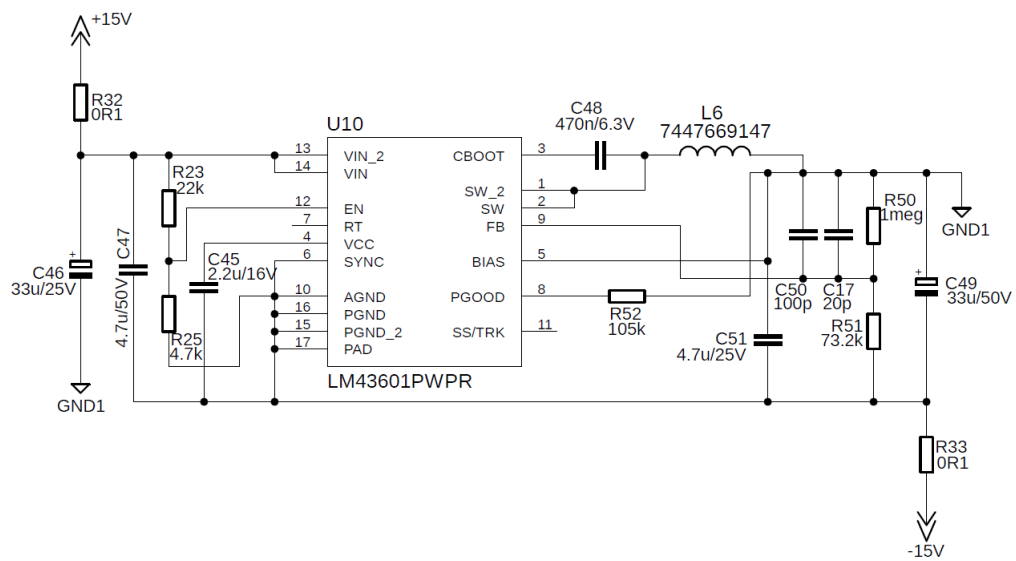
Tab. 4.2: Přehled výstupů na konektorech.

K4							
8: REL1-1	7: REL2-1	6: REL3-1	5: REL4-1	4: REL5-1	3: REL6-1	2: REL7-1	1: REL8-1
16: REL1-2	15: REL2-2	14: REL3-2	13: REL4-2	12: REL5-2	11: REL6-2	10: REL7-2	9: REL8-2
K5							
8: REL9-1	7: REL10-1	6: REL11-1	5: REL12-1	4: REL13-1	3: REL14-1	2: REL15-1	1: REL16-1
16: REL9-2	15: REL10-2	14: REL11-2	13: REL12-2	12: REL13-2	11: REL14-2	10: REL15-2	9: REL16-2

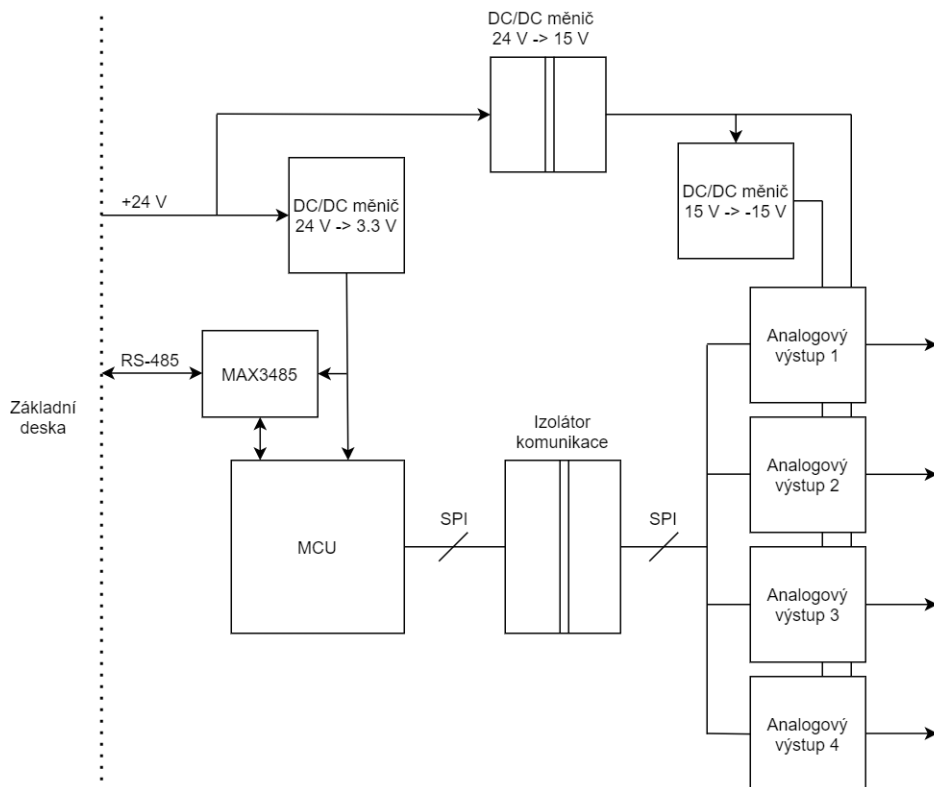
4.3 Karta analogových výstupů

Karta analogových výstupů má za úkol simulovat analogové senzory s proudovými nebo napěťovými vysílači. Jedná se nejčastěji o napěťové výstupy 0 až 10 V, nebo o proudové výstupy 4 až 20 mA. Zařízení by však mělo být univerzální, proto byla problematika analogových výstupů vyřešena pomocí digitálně řízeného D/A převodníku přímo určeného k této činnosti. Volba byla mezi typy AD5753 [53] a AD5423 [54], které se liší pouze obsahujícími vnitřními napájecími předregulátory v případě integrovaného obvodu AD5753. Těchto typů převodníků existuje celá řada, ale zvolen byl D/A převodník AD5423 z důvodu nižší ceny. Obvod AD5423 dokáže pracovat nejen jako proudový/napěťový zdroj, ale také jako proudová/napěťová nora. Dosáhnout tak lze regulace výstupního proudu od 0 do 24 mA kladných i záporných. Výstupní napětí lze regulovat od 0 do 10 V kladných i záporných. Typ výstupu (napěťový/proudový) je nastavitelný, stejně jako hodnota pomocí nadřazeného systému.

Jelikož je deska, stejně jako ostatní, napájena 24 V stejnosměrnými (z desky komunikační), je potřeba vytvořit napájecí zdroje symetrického typu s napětím alespoň 15 V stejnosměrných v každé polaritě. Toho je dosaženo v kladné oblasti pomocí integrovaného spínaného měniče, který vytváří kladné napětí +15 V a je izolovaný (vytváří tak galvanické oddělení pro vytvoření bezpečnostní izolační vzdálenosti 5 mm mezi výstupní částí a částí připojenou k nadřazenému systému (PC) [27]). V záporné oblasti je dosaženo napětí -15 V pomocí navrženého napájecího zdroje (viz. obrázek 4.16) pomocí aplikace WEBENCH® Design Center společnosti Texas Instruments (vygenerovaný dokument s výpočty a simulacemi je v příloze A). Měnič napětí záporné polarity využívá integrovaného obvodu LM43601 [55].

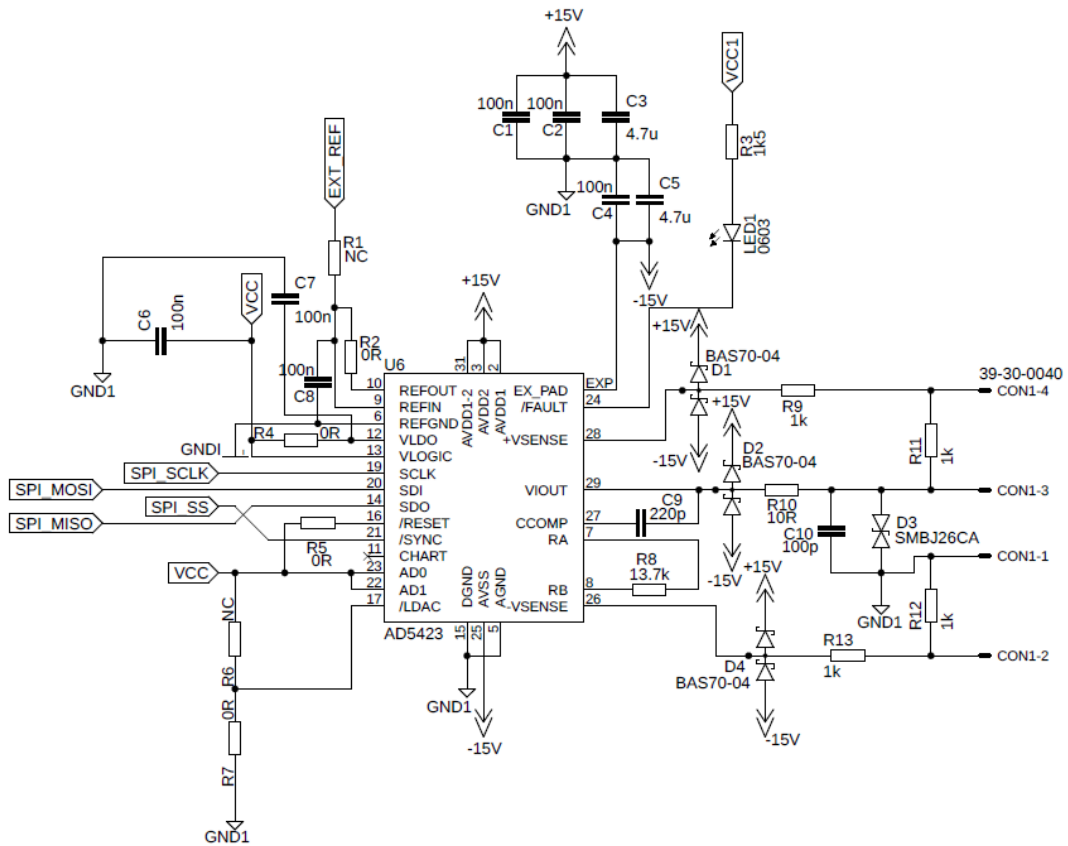


Obr. 4.16: Měnič napětí z +15 V na -15 V použitý na desce s analogovými výstupy.



Obr. 4.17: Blokové zapojení desky analogových výstupů.

Důvodem zapojení napájecích zdrojů za sebe je, že v případě jednoho symetrického integrovaného napájecího zdroje by mohlo docházet k problémům s nesymetrickým vytížením poloviny napájecího zdroje, a proto byla zvolena tato koncepce se za sebou řazenými napájecími zdroji. Blokové schéma zapojení desky analogových výstupů je zobrazeno na obrázku 4.17.



Obr. 4.18: Analogový výstup s integrovaným obvodem AD5423.

Na jedné kartě se nacházejí 4 analogové výstupy. I přesto, že jsou všechny řízeny pomocí stejných signálů po sběrnici SPI, má každý z integrovaných obvodů AD5423 určenou adresu pomocí adresních vstupů na pinech 22 a 23. Celkem lze pomocí připojení na napájecí napětí nebo na zemní potenciál vytvořit 4 kombinace adres, a tedy vytvořit 4 řízené výstupy pomocí jediné izolované sběrnice SPI.

U D/A převodníku byla použita vnitřní napěťová reference, jelikož je dostatečně přesná pro danou aplikaci. Vstup /LDAC je připojený přímo na zemní potenciál pro okamžité přenesení nastavené úrovně napětí/proudu na výstup [54].

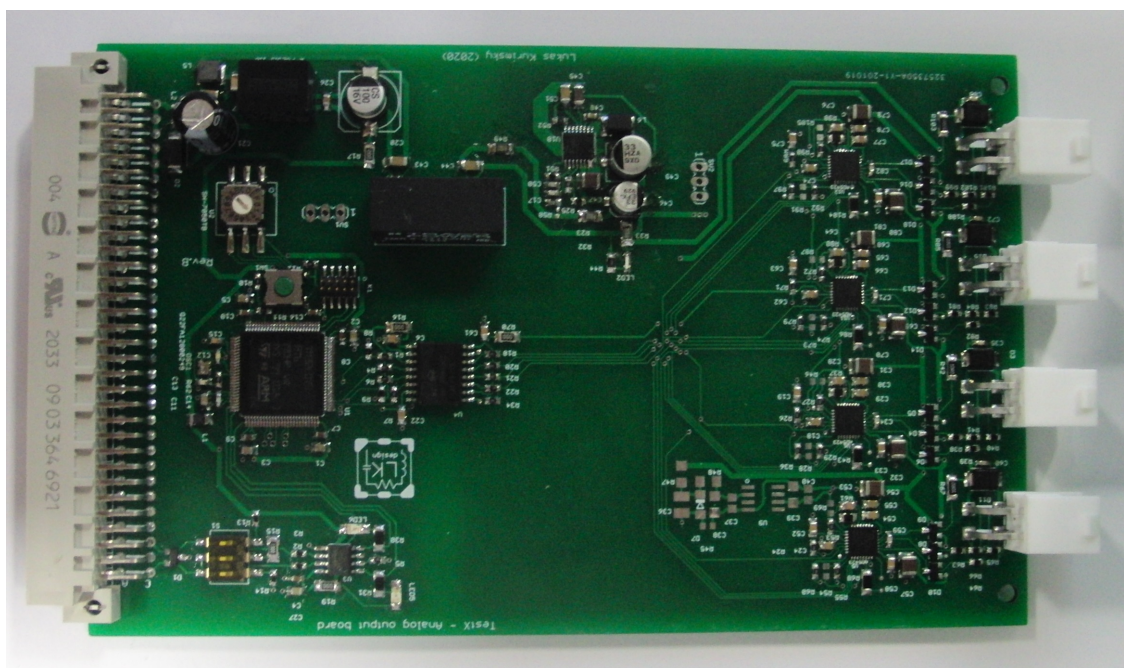
Samotné napěťové výstupy jsou připojeny k snímacím vstupům, aby zajistily kompenzaci úbytku napětí na kabelech. Zapojení tak lze realizovat čtyřvodičově. Pro dvouvodičovou metodu jsou trvale připojeny dva 1 k Ω rezistory přímo na kompenzační vstupy. Výstupní svorky tak lze rozdělit na výstupní (CON1-3 a CON1-1)

a kompenzační (CON1-2 a CON1-4), jak lze vidět na obrázku 4.18. Analogové výstupy jsou chráněny proti přepětí pomocí obousměrné 26-voltové TVS diody. Chybová signalizace (pin /FAULT) je přímo připojena na LED diodu, proto bude signalizace chyby ihned zobrazena uživateli. Samotný 1 kanál je zobrazen na obrázku 4.18.

Osazení 1 k Ω rezistorů do kompenzačních vstupů je nutné pro případ nevyužití čtyřvodičového propojení. V případě čtyřvodičového připojení se odpor mezi výstupy a kompenzačními vstupy v podstatě zkratuje vodiči připojenými na konci vedení k analogovým výstupům. Na všech výstupech jsou jako ochrany použité diody BAS70 proti napájecím větvím pro ochranu před ESD výbojem.

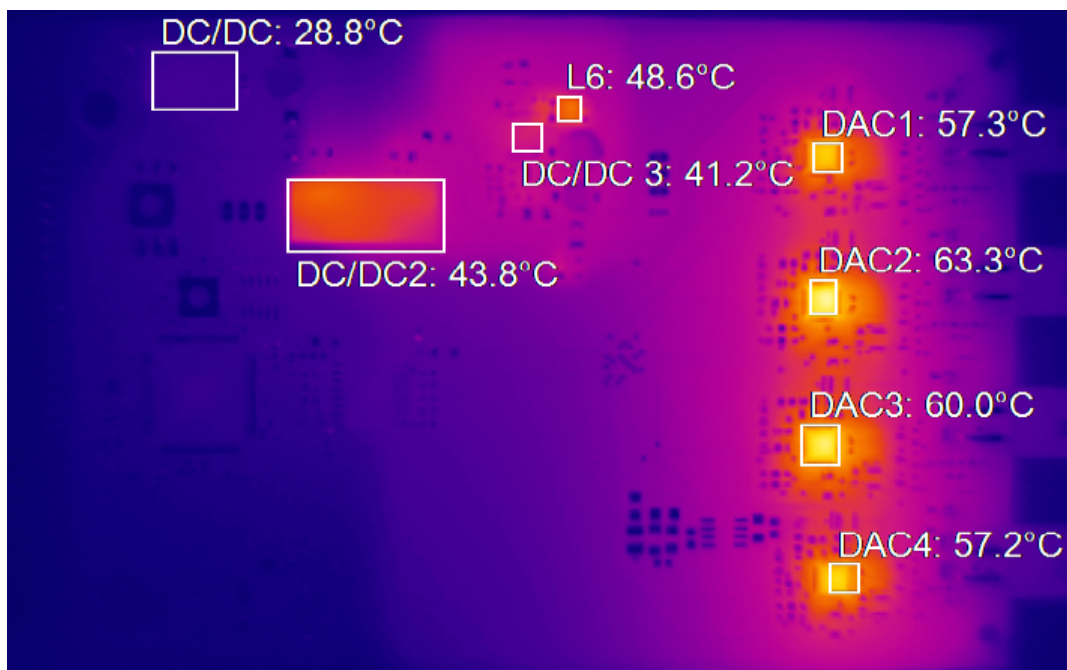
4.3.1 Výsledná karta analogových výstupů

Výsledná karta je zobrazena na obrázku 4.19. Na obrázku lze vidět bezpečnostní 5 mm izolační vzdálenost mezi stranou testovacího a testovaného zařízení, stejně tak i oddělené napájecí zdroje pro vytvoření symetrického napětí pro napájení D/A převodníků AD5423.



Obr. 4.19: Vyrobená a naprogramovaná karta analogových výstupů.

Na obrázku 4.20 je zobrazen snímek z termokamery při maximálním vytížení všech kanálů (nejhorší možný případ při -24 mA při zkratovaných výstupech). Teplota DC/DC měniče z napětí +24 V na +15 V je okolo 43,8 °C. Druhý DC/DC měnič z +15 V na -15 V stejnosměrných má na induktoru při spínání a vytížení teplotu 48,6 °C a na spínacím měničci teplotu 41,2 °C. Digitálně-analogové převodníky



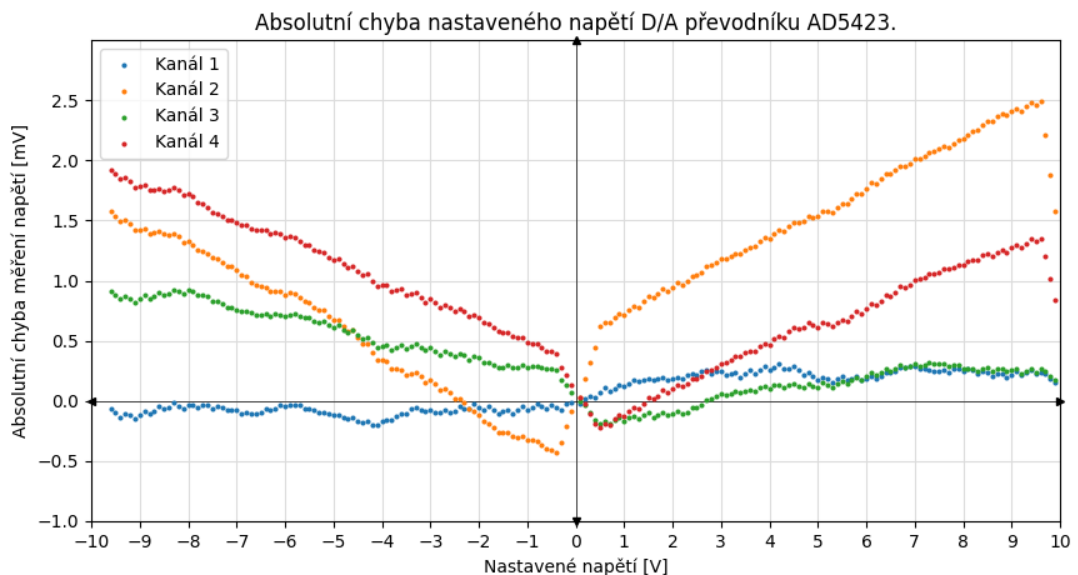
Obr. 4.20: Snímek z termokamery při zatížení všech výstupů proudem -24 mA (nejhorší možný případ).

však nabývají teplot až okolo $63,3\text{ °C}$ při zatížení výstupu proudem -24 mA . Hodnoty těchto teplot jsou naprosto v rámci tolerancí. Spotřeba desky v maximálním vytížení je 118 mA . Všechny hodnoty teplot byly měřeny při teplotě okolí 20 °C a s kartou volně položenou na stole. K měření byla použita termokamera Micro-Epsilon TIM400.

4.3.2 Měření chyby nastavené hodnoty

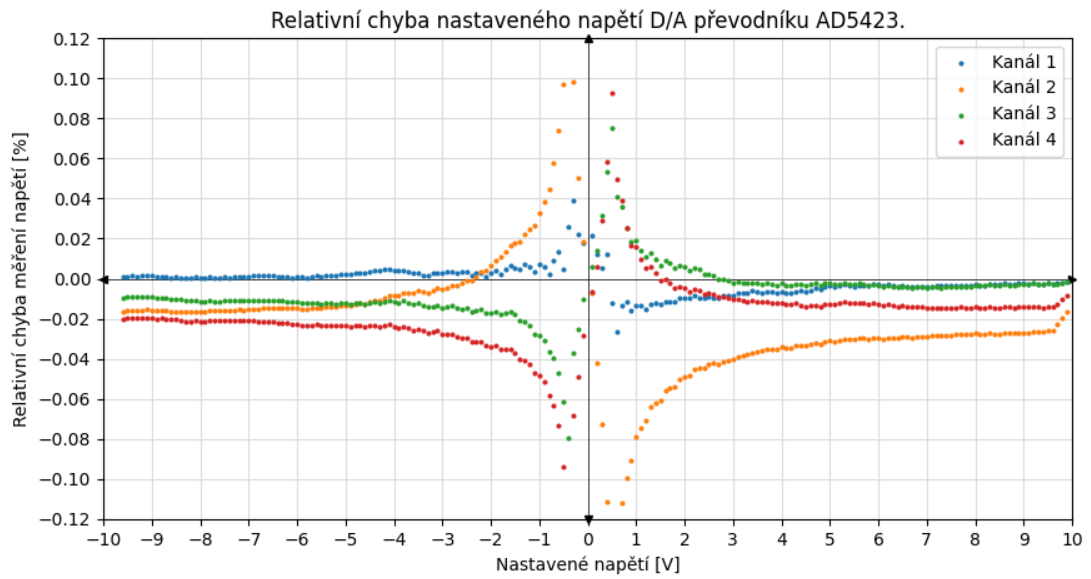
Měření nastavené hodnoty proběhlo za pomoci digitálních multimetrů Keithley 2700 a Agilent U1252B připojených přes převodník rozhraní RS-232 na USB k počítači. V počítači se o nastavení hodnot napětí a proudu staral skript napsaný v jazyce Python pro ovládání testovacího zařízení. Zároveň se skript staral i o odečítání hodnot z digitálních multimetrů Keithley 2700 a Agilent U1252B. Měření napětí bylo provedeno pomocí digitálního multimetru Keithley 2700 a měření proudu pomocí digitálního multimetru Agilent U1252B. Hodnoty napětí byly změřeny pouze na rozsahu $\pm 10\text{ V}$ a proudu na rozsahu $\pm 24\text{ mA}$, neboť pouze tyto dva rozsahy se zvažují pro použití analogových výstupů. Z naměřených dat byly vytvořeny grafy, které jsou na obrázcích 4.21, 4.22, 4.23 a 4.24. Původní naměřená data jsou přiložena v elektronické příloze A. Chyba nastavené hodnoty oproti měřené je vždy zobrazena v absolutní i relativní hodnotě, a to pro všechny 4 kanály.

Na obrázku 4.21 je zobrazena absolutní chyba nastavené hodnoty napětí D/A převodníku AD5423. Nastavený rozsah je ± 10 V s krokem při měření po 100 mV. Podle katalogového listu se celková chyba (označovaná jako Total Unadjusted Error - TUE) pohybuje v hodnotách $\pm 0,05$ % FSR (Full-Scale Range, plný rozsah). Na obrázku 4.22 je zobrazena relativní chyba nastavené hodnoty napětí D/A převodníku AD5423. Podle absolutní chyby na obrázku 4.21 lze po přepočtu srovnat údaje s katalogovým listem. Maximální naměřená chyba se pohybuje v rozsahu od 1 V do 10 V pod 2,5 mV v kladné polaritě a pod -0,5 mV v záporné polaritě. K vyšší chybě na kanálu 2 mohlo dojít vlivem špatně zapájeného integrovaného obvodu AD5423, který hůře odváděl teplo. Maximální chyba udávaná výrobcem je po přepočtu na rozsah ± 10 mV. D/A převodníky tak splňují očekávání a danou chybu. Chyba multimetru na daném rozsahu ± 10 V byla 0,003 %, proto lze chybu měření zanedbat. Původní naměřená data jsou přiložena v elektronické příloze A.

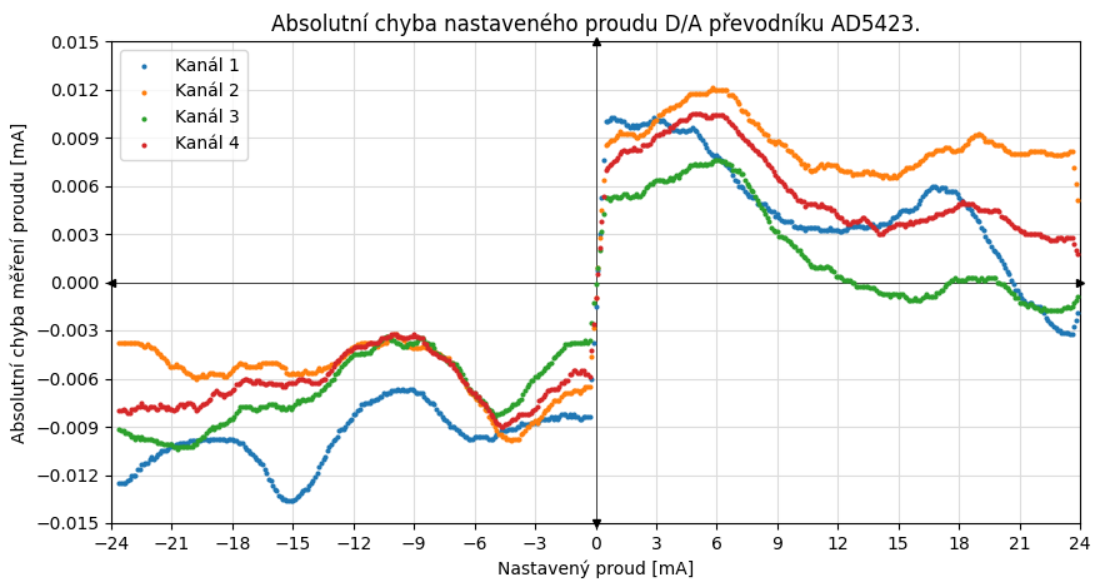


Obr. 4.21: Absolutní chyba nastavené hodnoty D/A převodníku AD5423 při nastavených napěťových výstupech.

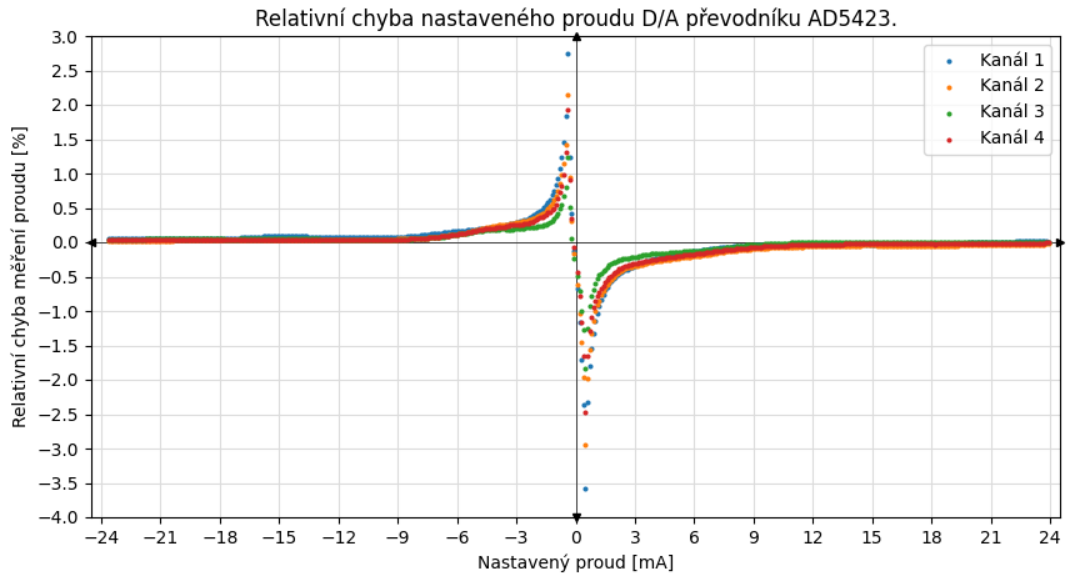
Na obrázku 4.23 je zobrazena absolutní chyba nastavené hodnoty proudu D/A převodníku AD5423. Nastavený rozsah je ± 24 mA s krokem po 100 μ A. Stejně jako u napěťového výstupu se celková chyba při proudovém výstupu (označovaná jako Total Unadjusted Error - TUE) pohybuje v hodnotách $\pm 0,06$ % FSR. Na obrázku 4.24 je zobrazena relativní chyba nastavené hodnoty proudu D/A převodníku AD5423. Podle absolutní chyby na obrázku 4.23 lze ověřit danou chybu podle katalogového listu. Po přepočtu na rozsah (FSR) je maximální chyba nastave-



Obr. 4.22: Relativní chyba nastavené hodnoty D/A převodníku AD5423 při nastavených napěťových výstupech.



Obr. 4.23: Absolutní chyba nastavené hodnoty D/A převodníku AD5423 při nastavených proudových výstupech.



Obr. 4.24: Relativní chyba nastavené hodnoty D/A převodníku AD5423 při nastavených proudových výstupech.

ného proudu na rozsahu ± 24 mA okolo $\pm 28,8 \mu\text{A}$. Maximální naměřená chyba se pohybuje v rozsahu od 1 mA do 24 mA pod $\pm 15 \mu\text{A}$, a to jak v kladné, tak v záporné polaritě. D/A převodník tak splňuje očekávání a danou chybu. Chyba multimetru na daném rozsahu ± 50 mA byla $\pm 0,15 \%$, proto lze chybu měření zanedbat. Původní naměřená data jsou přiložena v elektronické příloze A.

4.3.3 Přehled MODBUS registrů

Stav jednotlivých D/A převodníků se nastavuje za pomoci MODBUS paketů. Pro nastavení/vyčtení hodnoty slouží čtyři registry a pro nastavení/vyčtení módu další čtyři registry uvedené v tabulce 4.3.

Tab. 4.3: Přehled registrů a funkčních kódů pro ovládání karty analogových výstupů.

Popis příkazu	Funkční kód čtení/zápisu	Registr
Přečíst/nastavit hodnotu výstupu CH1	0x03 / 0x10	0x0010
Přečíst/nastavit hodnotu výstupu CH2	0x03 / 0x10	0x0012
Přečíst/nastavit hodnotu výstupu CH3	0x03 / 0x10	0x0014
Přečíst/nastavit hodnotu výstupu CH4	0x03 / 0x10	0x0016
Přečíst/nastavit mód výstupu CH1	0x03 / 0x06	0x0018
Přečíst/nastavit mód výstupu CH2	0x03 / 0x06	0x0019
Přečíst/nastavit mód výstupu CH3	0x03 / 0x06	0x001A
Přečíst/nastavit mód výstupu CH4	0x03 / 0x06	0x001B

Mód výstupu lze nastavit na hodnotu 0, již nastaví výstup D/A převodníku v napěťovém módu, nebo na hodnotu 1, již nastaví D/A převodník v proudovém módu.

Při napětovém módu lze nastavit napětí v rozsahu ± 10 V, při proudovém módu lze nastavit proud v rozsahu ± 24 mA. Nastavovaná hodnota se do registru zapisuje ve formátu FLOAT, definovaného podle IEEE-754, zapsaného pomocí dvou MODBUS registrů.

4.3.4 Zapojení konektorů

V tabulce 4.4 je vidět zapojení všech čtyř konektorů pro kartu analogových výstupů. Všechny čtyři konektory jsou typu Molex Mini-Fit o dvou řadách po dvou pinech. První číslo v buňce je číslo pinu na konektoru, za ním se nachází označení výstupu.

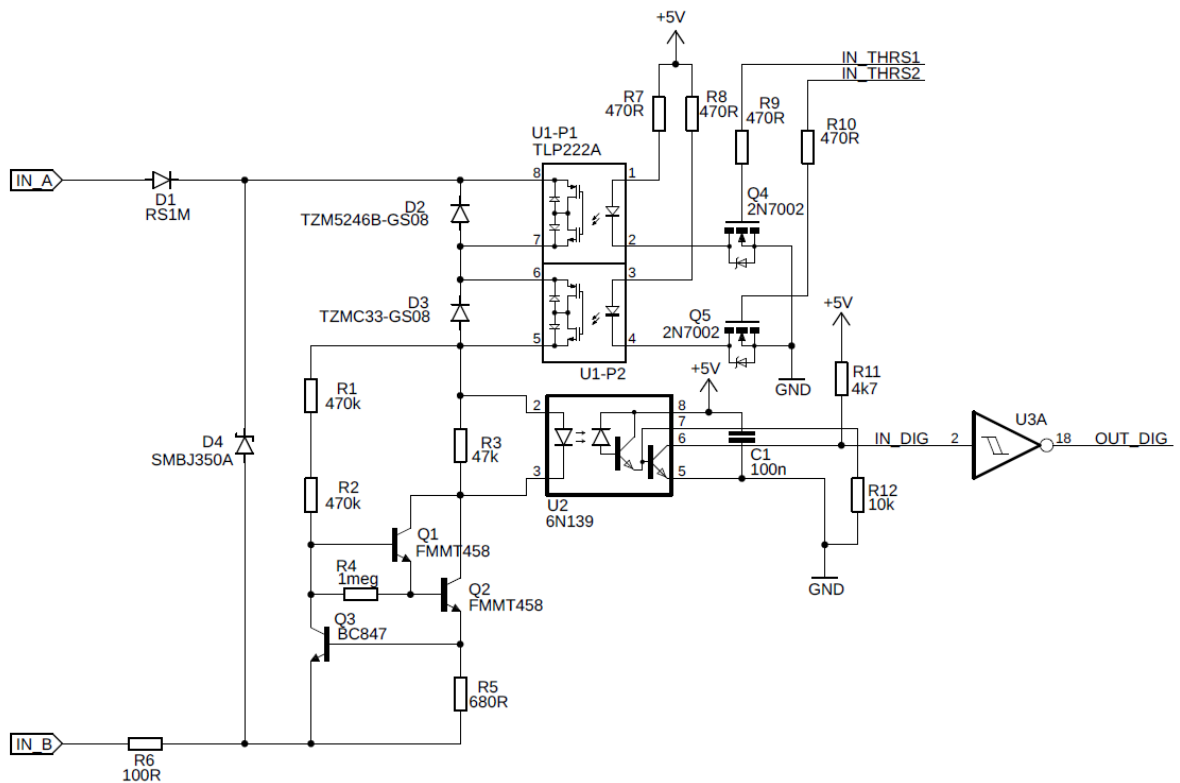
Tab. 4.4: Přehled výstupů na konektorech.

PL1	2: VSENSE1- 1: GND	4: VSENSE1+ 3: OUT1	PL2	2: VSENSE2- 1: GND	4: VSENSE2+ 3: OUT2
PL3	2: VSENSE3- 1: GND	4: VSENSE3+ 3: OUT3	PL4	2: VSENSE4- 1: GND	4: VSENSE4+ 3: OUT4

4.4 Karta digitálních vstupů

Důvodem vytvoření karty digitálních vstupů následujícím způsobem je požadovaný široký rozsah vstupních napětí od 5 V stejnosměrných do 230 V střídavých. Základem návrhu je proudový zdroj navržený tak, aby přes něj i přes připojené nízké napětí tekla pouze proud menší než 1 mA. Důvodem je ztrátový výkon, který by se při napětí až 230 V střídavých připojených na digitální vstup projevil velkým oteplením na vysokonapěťových tranzistorech. Velké množství tepla se na součástkách bude projevovat jako ztrátový výkon (viz níže). K omezení ztrátového výkonu slouží usměrňovací vstupní dioda, která propustí pouze kladnou část připojeného signálu a sníží tak ztrátový výkon na polovinu. Při střídavém signálu tak projde pouze kladná část periody a je tedy nutno na straně mikrokontroléru použít pro vyhodnocení digitální filtr pro detekci signálu. Digitální vstupy mají sloužit pro detekci digitálních a analogových signálů. Schéma zapojení lze vidět na obrázku 4.25

Další snahou je z důvodu galvanického oddělení omezit chybu při měření činitele plnění (duty cycle), neboť další funkcí některého z digitálních vstupů by mohlo být měření střídavy a frekvence. Optočleny mají většinou rozdílné časy přechodu z nízké do vysoké úrovně a naopak, což způsobí degradaci signálu a vytvoří tak nesymetrickou chybu, která se projeví zkreslením činitele plnění. Je tak potřeba vybrat takový optočlen, aby měl oba časy přechodu co nejvíce podobné.



Obr. 4.25: Zapojení digitálního vstupu s nastavitelnými prahovými úrovněmi.

Součástí obvodu jsou i dva SSR optočleny v jednom pouzdře (součástka TLP222A [56]) zapojené tak, aby přemostovaly dvě Zenerovy diody. Pokud nejsou tranzistory uvnitř optočlenu sepnuté, Zenerovy diody sníží velikost vstupního signálu o Zenerovo napětí a vytvoří tak prahovou úroveň vstupnímu napětí. Pomocí těchto Zenerových diod lze vytvořit porovnávací úroveň, neboli prahovou úroveň, kterou musí vstupní signál překonat. Vytvoření této prahové úrovně slouží k možnosti rozlišit např. napětí 5 V od napětí 230 V. Pokud je napětí vyšší než vytvořená prahová úroveň, obvod normálně zareaguje a sepne výstupní optočlen. Pokud bude napětí na vstupu nižší než Zenerovo napětí, obvod se neuzavře a přes výstupní optočlen nepoteče proud. To bude mít za následek vyhodnocení vstupu jako nepřipojeného signálu. Za výstupem z optočlenu se ještě nachází Schmittův invertor kvůli převodu signálu na CMOS úroveň včetně hystereze. Napětí Zenerových diod je 16 V a 33 V. Pro nastavení porovnávacího napětí bude nutno nejprve sepnout tranzistory Q4 a Q5 do požadovaného stavu. O samotné řízení proudu LED diodou v optočlenu 6N139 se stará proudový zdroj vytvořený z tranzistorů Q1, Q2 a Q3, u kterých nastavený proud určuje rezistor R5.

V následující tabulce 4.5 jsou představeny možné varianty optočlenů, které by připadaly v úvahu pro použití na desce digitálních vstupů.

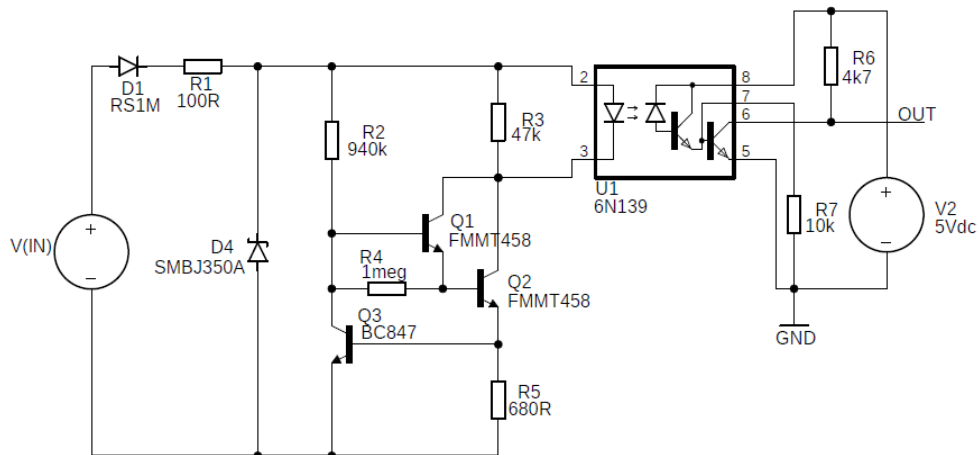
Tab. 4.5: Přehled možných optočlenů pro návrh digitálních vstupů a jejich parametry [57, 58, 59].

Název optočlenu	I_F [mA]	CTR [-]	t_r [μ s]	t_f [μ s]	cena [Kč/kus]
TLP127	1	1000-4000	typ. 10	typ.200	23
HCPL-0701	0,5	400-5000	typ. 3, max. 25	typ. 12, max. 60	26
6N139	0,5	400-1100	typ. 12, max. 60	typ. 4, max. 25	15,95
HCPL-4701/473	0,04	600-8000	typ. 3, max. 25	typ. 34, max.60	41

Kvůli kompromisům u rychlosti, citlivosti, a především ceně byl zvolen optočlen 6N139. Vybraný optočlen vyniká svým minimálním proudem, pro který je garantováno sepnutí již při hodnotě 0,5 mA [58]. Díky tomuto parametru lze snížit celkové výkonové ztráty obvodu. Zároveň i doba přenosu při náběžné a sestupné hraně se pohybuje v rozumných hodnotách pro práci s vyššími kmitočty (řádově stovky Hz).

4.4.1 Simulace digitálního vstupu

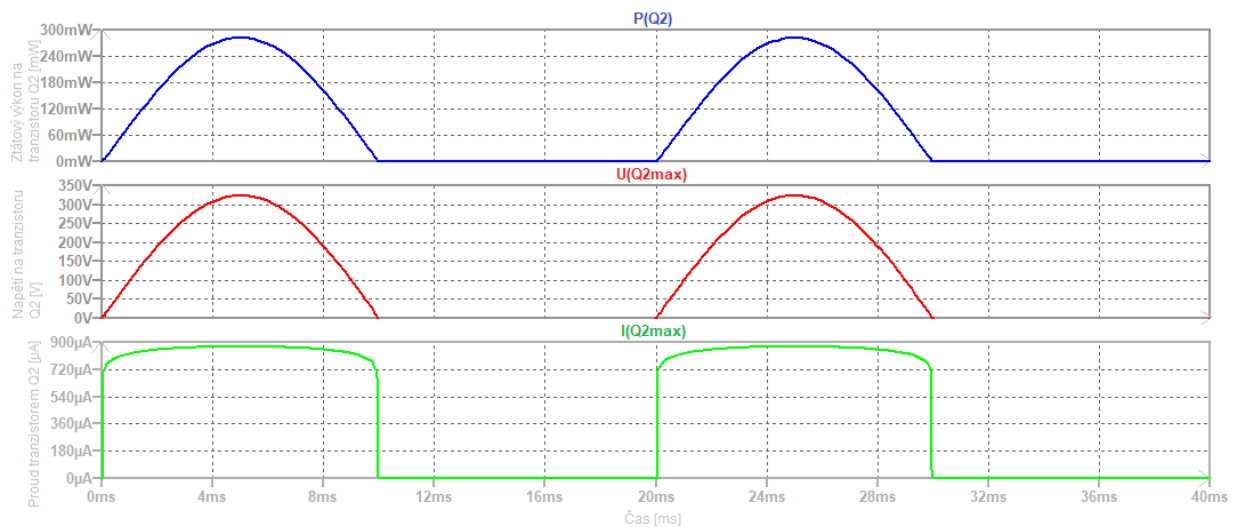
Z důvodu ověření funkce a zjištění ztrátového výkonu obvodu digitálních vstupů byl obvod simulován pomocí software LTspice® firmy Analog Devices. Přestože nebylo možné použít všechny modely součástek, které budou v reálné aplikaci použité, je výsledek simulace dostatečný pro prokázání funkčnosti aplikace. S reálně využitými prvky bude proud protékající optočlenem nastaven na přibližně 800 μ A. Na obrázku 4.26 je zobrazeno schéma zapojení, které by mělo být topologicky shodné se schématem na obrázku 4.25.



Obr. 4.26: Zapojení digitálního vstupu v simulátoru LTspice.

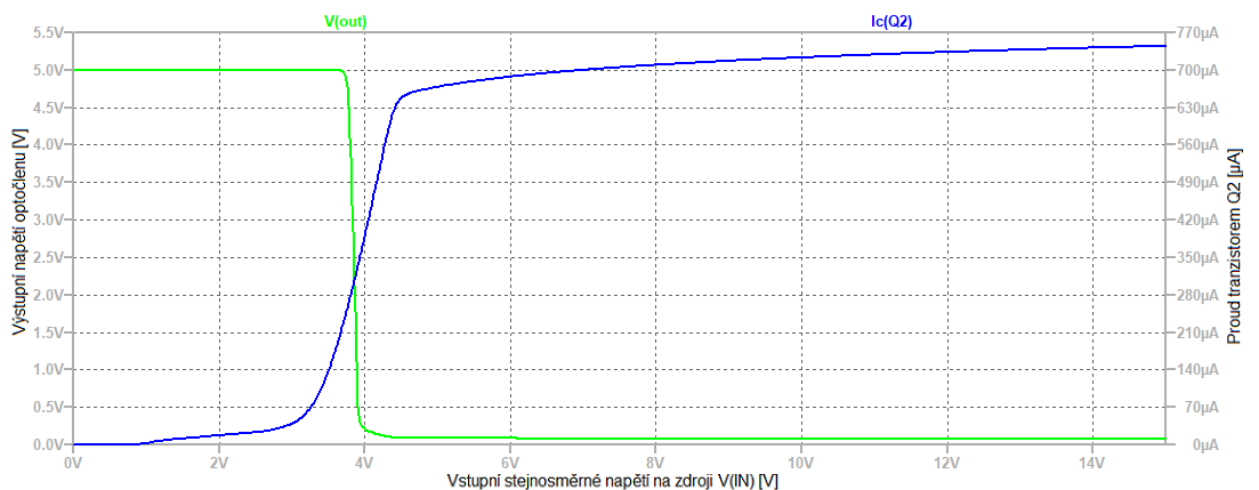
Rozdílem však jsou modely součástek použité pro simulace. Snahou bylo co nejvíce se přiblížit k parametrům reálných součástek. Vzhledem k této skutečnosti byly změřeny nejdůležitější napětí a proudy v obvodu. Simulace proběhla pro nejhorsí

předpokládaný případ se vstupním napětím 230 V střídavých. V simulaci se nenachází SSR optočleny se Zenerovými diodami pro nastavení hodnoty prahového napětí.



Obr. 4.27: Výsledky simulace digitálního vstupu pro vstupní signál o napětí 230 V střídavých.

Na obrázku 4.27 je zobrazená časová analýza, kde v první části lze na modré křivce vidět maximální ztrátový výkon na tranzistoru Q2, který se projeví zvýšenou teplotou tranzistoru. Ve druhé části je na červené křivce vidět maximální napětí na tranzistoru Q2 a ve třetí části barvou zelenou je zobrazený proud tranzistorem Q2.



Obr. 4.28: Výsledky simulace digitálního vstupu pro nízké vstupní stejnosměrné napětí.

Na obrázku 4.28 lze vidět závislost výstupního napětí optočlenu U2 a proudu rezistorem R5 na celkovém vstupním napětí. Minimální napětí bylo odečteno z grafu o hodnotě 3,89 V (napětí při proudu přes optočlen 350 μA).

4.4.2 Teplotní management digitálních vstupů

Proud optočlenem by měl být co nejmenší možný, neboť ztrátový výkon bude vyzářen především ve výstupním vysokonapěťovém tranzistoru Q2. Uvažovaná byla i možnost snímání dvoucestně usměrněného vstupního signálu, avšak ztrátový výkon na výstupním vysokonapěťovém tranzistoru by byl dvojnásobný. Pro výpočet oteplení tranzistoru je nutné vypočítat střední výkon na tranzistoru podle vzorce:

$$P_{stř} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \cdot I_m \sin(2\pi ft)dt, \quad (4.1)$$

kde $P_{stř}$ je střední hodnota elektrického výkonu [W], T je perioda [s], I_m je amplituda střídavého proudu [A], U_m je amplituda střídavého napětí [V], f je frekvence [Hz] a t je čas [s].

Ze simulace byl odečten proud tekoucí rezistorem R5, který má vypovídací hodnotu o proudu kolektorem tranzistoru Q2 (vstupní bázový proud tranzistoru Q3 je vzhledem k velikosti zanedbán). Při napětí 230 V střídavých a frekvenci 50 Hz má hodnotou 810 μA a pro zjednodušení výpočtu lze považovat tuto hodnotu za konstantní.

$$P_{stř} = \frac{1}{20 \cdot 10^{-3}} \left(\int_0^{10 \cdot 10^{-3}} \frac{325}{\sqrt{2}} \cdot 810 \cdot 10^{-6} \sin(2\pi 50t)dt + \int_{10 \cdot 10^{-3}}^{20 \cdot 10^{-3}} 0dt \right) \doteq 59 \text{ mW} \quad (4.2)$$

Výpočet ztrátového výkonu na vysokonapěťovém tranzistoru je uveden v rovnici výše. Skutečností je, že již při proudu 810 μA (součet proudu přes optočlen a rezistor k němu paralelně připojený) a při efektivní hodnotě vstupního signálu 230 V střídavých (pro frekvenci 50 Hz) je ztrátový výkon na tranzistoru okolo 118 mW během poloviny jedné periody v případě použití jednocestného usměrnění. Pro celou periodu platí poloviční hodnota středního výkonu, tedy 59 mW. Výpočet oteplení tranzistoru:

$$\vartheta_J = R_{\vartheta_{ja}} \cdot P + \vartheta_a \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.3)$$

kde $R_{\vartheta_{ja}}$ je tepelný odpor přechodu křemíku na pájený spoj při upevnění na plošném spoji [60], P je elektrický výkon [W], ϑ_a je okolní teplota [°C] a ϑ_J je teplota na přechodu křemíku na pájený spoj.

$$\vartheta_J = 250 \cdot 0,059 + 25 \doteq 39 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.4)$$

Při tomto ztrátovém výkonu na tranzistoru FM458 lze dopočítat pomocí rovnice výše i teplotu na vnitřní křemíkové struktuře. Při parametrech $R_{\theta ja}$ s hodnotou $250\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ a ztrátovém výkonu 59 mW při pokojové teplotě $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ se teplota na křemíkové struktuře bude pohybovat okolo $39\text{ }^{\circ}\text{C}$ [60]. Plocha na desce plošných spojů by měla pro účely chlazení tohoto výkonu stačit.

4.4.3 Ověření simulace a výpočtů digitálního vstupu

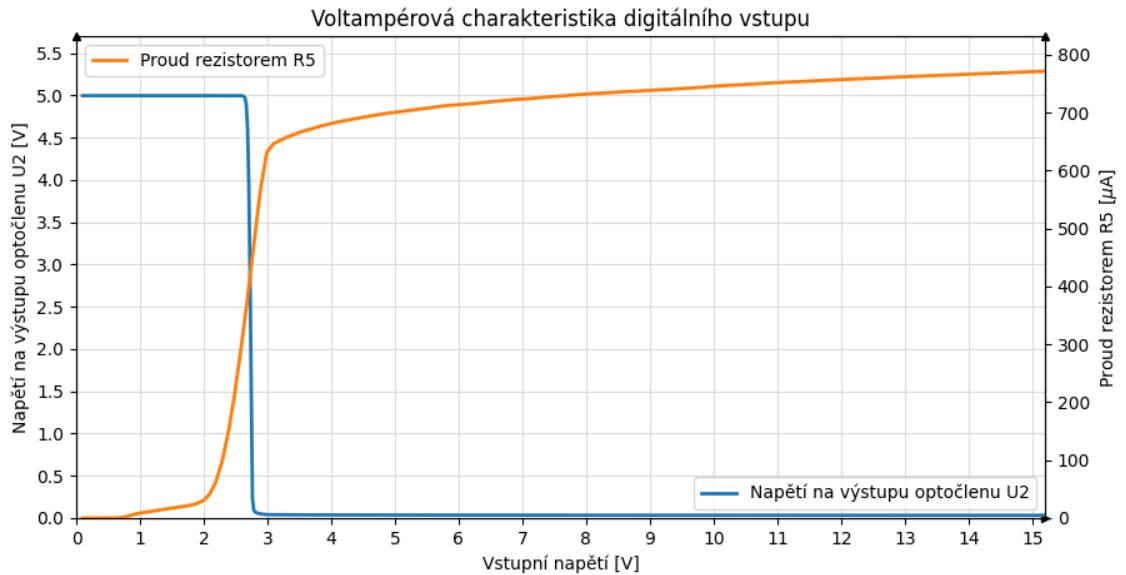
Ověření simulace digitálního vstupu spočívalo v nastavení stejných podmínek měření, v jakých byla provedena simulace. V první části bylo provedeno měření napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru Q2 a jeho kolektorového proudu, jelikož se jedná o prvek v obvodu, který je nejvíce teplotně vytěžován. Ztrátový výkon, který je osciloskopem spočítaný jako součin napětí na tranzistoru Q2 a proudu kolektorem tranzistoru Q2, je zobrazen modrým průběhem na kanálu 4 v horní oblasti na obrázku 4.29.



Obr. 4.29: Ověření ztrátového výkonu a proudu tranzistorem při vstupním signálu 230 V střídavých.

Uprostřed se nachází průběh maximálního napětí na tranzistoru Q2 zobrazený žlutým průběhem na kanálu 1. V nejnižší části se nachází průběh proudu kolektorem tranzistoru Q2, který je zvýrazněný zelenou barvou na kanálu 2. Zachycené průběhy se plně shodují se simulovanými průběhy. Snímek byl zachycený osciloskopem Rohde & Schwarz RTB2004. Střední hodnota ztrátového výkonu byla za pomoci vnitřní

matematické funkce osciloskopu vypočítána s hodnotou 64,756 mW. Hodnota ztrátového výkonu se tak s malou odchylkou shoduje s hodnotou ztrátového výkonu, která byla vypočítána.



Obr. 4.30: Ověřená simulace pomocí reálného měření na digitálním vstupu.

V druhé části je zobrazena voltampérová charakteristika digitálního vstupu na obrázku 4.30. Se zvyšujícím se vstupním napětím dochází ke zvýšení procházejícího proudu, a tak k sepnutí tranzistoru na výstupu optočlenu 6N139. Daný optočlen má deklarovaný přenos signálu při hodnotě proudu $500 \mu\text{A}$. Oproti simulaci se podařilo sepnutý výstup naměřit již při hodnotě vstupního napětí 2,74 V stejnosměrných a tedy při proudu $450 \mu\text{A}$. Rozdíl hodnoty napětí, při které dojde k sepnutí, je pravděpodobně způsoben velkým rozptylem hodnoty CTR optočlenu. Při měření byly zkratovány Zenerovy diody pomocí SSR optočlenů TLP222A, aby bylo dosaženo nejnižšího možného vstupního napětí pro detekci digitálním vstupem. Vstupní proud do digitálního vstupu se při zvyšujícím se napětí lineárně zvyšuje.

Voltampérová charakteristika digitálního vstupu byla změřena pomocí skriptu v jazyce Python a dvou multimetrů Keithley 2700, kde jeden měřil proud jako úbytek napětí na rezistoru označeném jako R5 na obrázku 4.26 s hodnotou 680Ω a druhý napětí na výstupu optočlenu 6N139. Proud do báze tranzistoru Q3 na obrázku 4.26 je opět vzhledem k jeho velikosti zanedbatelný. Původní naměřená data jsou přiložena v elektronické příloze A.

Nastavení prahové hodnoty digitálního vstupu probíhá pomocí dvou optočlenů, které mají rozpojený výstup, nebo zkratují Zenerovy diody a vytváří tak nižší prahové napětí pro vstupní signál. Stav jednotlivých možností pro nastavení porovná-

vací hodnoty lze nakombinovat podle tabulky 4.6. Zapnutý stav prahové hodnoty znamená zkratování dané Zenerovy diody. Nastavení porovnávací prahové hodnoty probíhá stejně jako vyčítání stavu digitálních vstupů pomocí MODBUS protokolu. Teoretické a změřené napětí se s malou odchylkou liší, což může být důsledek tolerance závěrného napětí Zenerových diod.

Tab. 4.6: Porovnání prahové hodnoty teoretické a naměřené.

Prah. hodnota L1	Prah. hodnota L2	Teoretické napětí	Změřené napětí
Vypnuto	Vypnuto	51,2 V	51,77 V
Vypnuto	Zapnuto	35,2 V	35,62 V
Zapnuto	Vypnuto	18,2 V	18,89 V
Zapnuto	Zapnuto	2,4 V	2,74 V

4.4.4 Měření frekvence a střídy pomocí digitálních vstupů

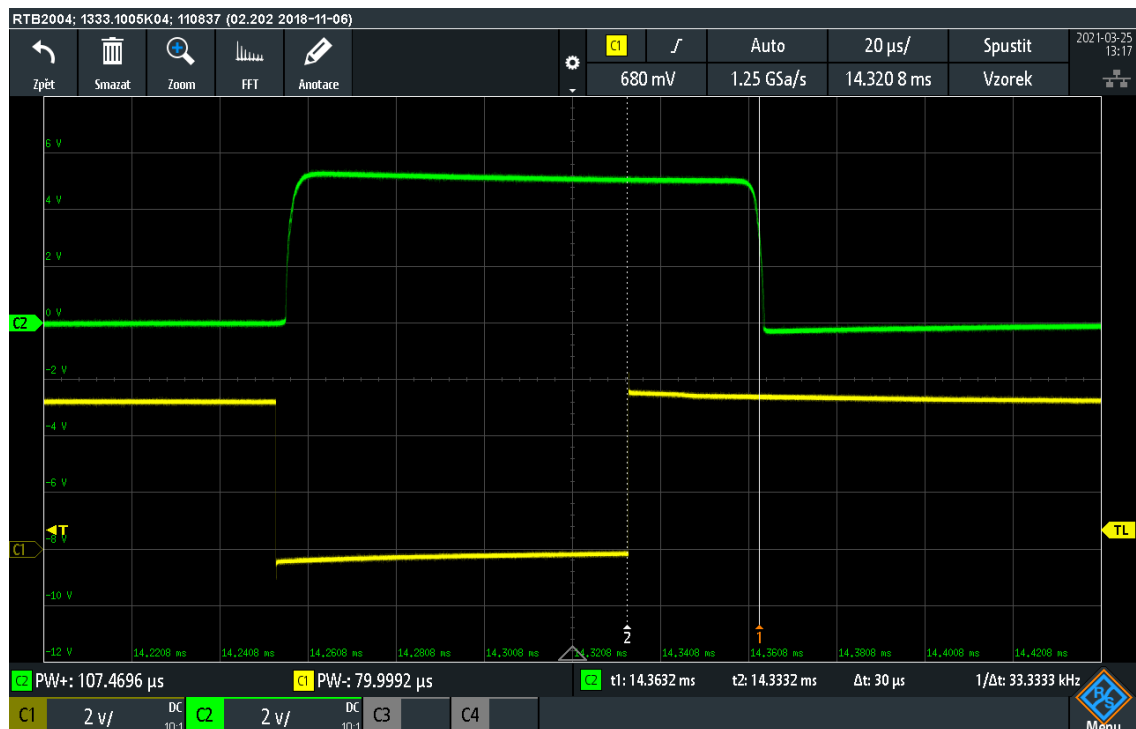
Alternativní funkcí digitálních vstupů 1 a 3 je i měření frekvence a střídy vstupního signálu. Tyto vstupy jsou určeny pro měření vstupní frekvence od 10 do 200 Hz. Hodnoty vyšších frekvencí se poté mohou použít pouze jako ukazatel přítomnosti signálu s velmi velkou odchylkou od měřené hodnoty. Minimální měřitelná frekvence je 10,1 Hz se střídou 1 %. Hodnoty frekvence a střídy naměřené v tabulce 4.7 byly nastaveny generátorem Tektronix AFG3102 a měřeny digitálním vstupem na kanálu 1. Nastavené výstupní obdélníkové napětí mělo hodnotu amplitudy 5 V. Měření frekvence pomocí digitálních vstupů by mělo mít za úkol měřit frekvence a střídu u signálů s frekvencí do 200 Hz. Jednat by se mělo především o signály pro zpětnovazební čerpadla.

Tab. 4.7: Porovnání vstupních a naměřených hodnot frekvence a střídy pomocí digitálního vstupu na kanálu 1.

Vstupní frekv. [Hz]	Změřená frekv. [Hz]	při 25 % [%]	při 50 % [%]	při 75 % [%]
15	14,999	24,94	49,95	74,94
50	49,999	24,80	49,82	74,81
100	100,030	24,57	49,60	74,65
250	250,156	24,06	49,18	73,98
500	499,501	23,12	47,88	73,28
1000	1005,030	20,91	46,75	71,42

Podle změřených dat v tabulce 4.7 lze spočítat, že pro frekvence do 250 Hz lze měřit frekvenci s chybou přibližně 0,07 % a střídu s chybou okolo 1 %. Digitální vstup vzorkuje vstupní signál frekvencí 160 kHz. To při daných podmínkách, a především jako doplňkovou funkčnost, lze označit jako uspokojivé měření.

Provedeno bylo i ověření nesymetrie náběžné a sestupné hrany vstupního signálu. Ta způsobuje pro vyšší frekvence vstupního signálu nepřesnost při měření střídy. Měření nesymetrie náběžné a sestupné hrany je zobrazena na obrázku 4.31.



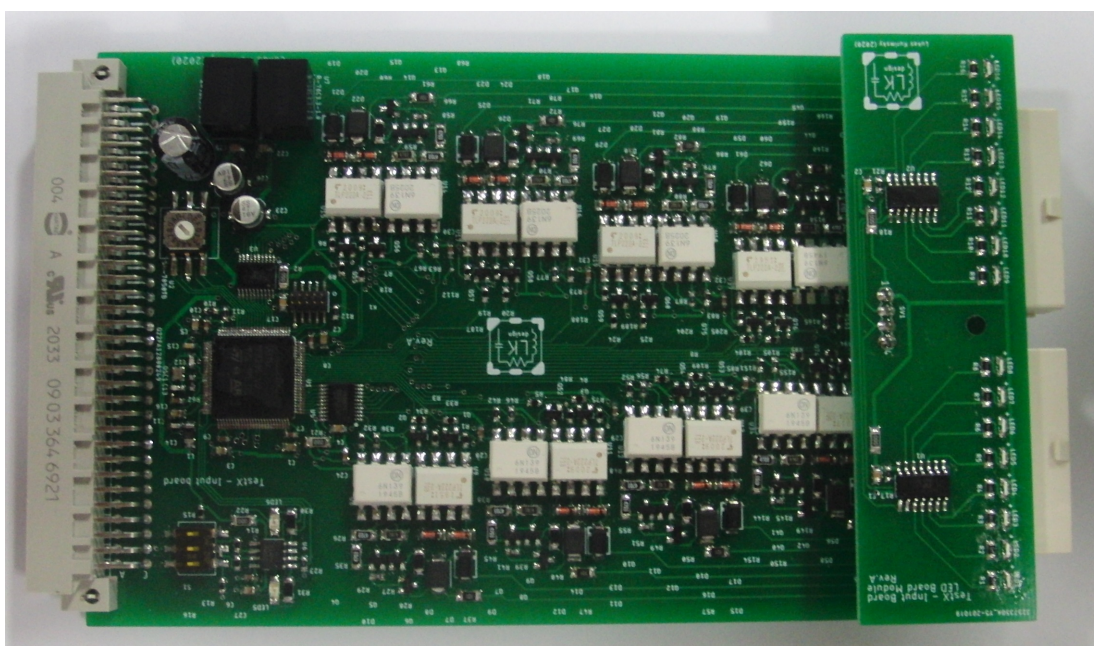
Obr. 4.31: Ověřená simulace pomocí reálného měření na digitálním vstupu.

Snímek byl zachycený osciloskopem Rohde & Schwarz RTB2004. Vstupní signál byl připojený na kanál 1 zobrazený žlutou křivkou a výstup optočlenu 6N139 na kanál 2 zobrazený zelenou křivkou. Vstupní signál byl generovaný pomocí generátoru Tektronix AFG3102 s frekvencí 5 kHz a střídou 50 %, z důvodu přesnějšího měření zpoždění náběžné a sestupné hrany.

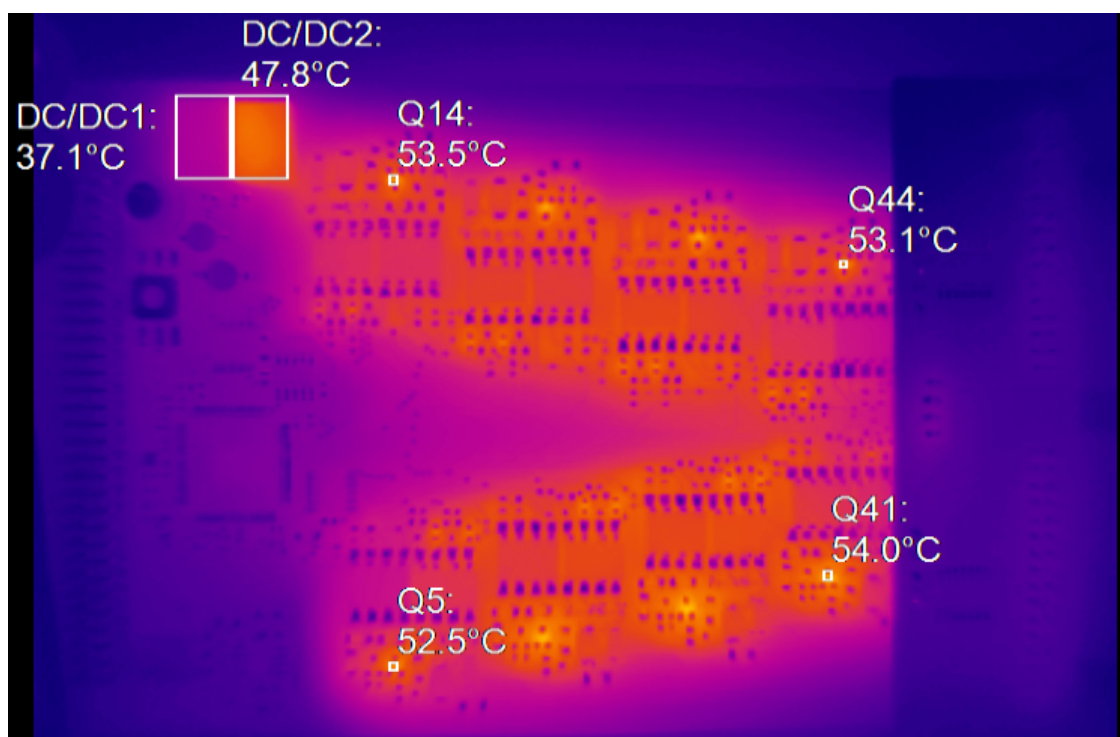
Hodnota zpoždění pro náběžnou hranu byla změřena pomocí kurzorů s hodnotou 30 μs a zpoždění sestupné hrany s hodnotou 2,8 μs . Nesymetrie tak vytváří systematickou chybu minimálně závislou na vstupním napětí. Možným řešením jak snížit tuto chybu může být nahrazení optočlenu jiným optočlenem s podobnou dobou zpoždění pro obě hrany, nebo firmwarová kompenzace této chyby.

4.4.5 Výsledná karta digitálních vstupů

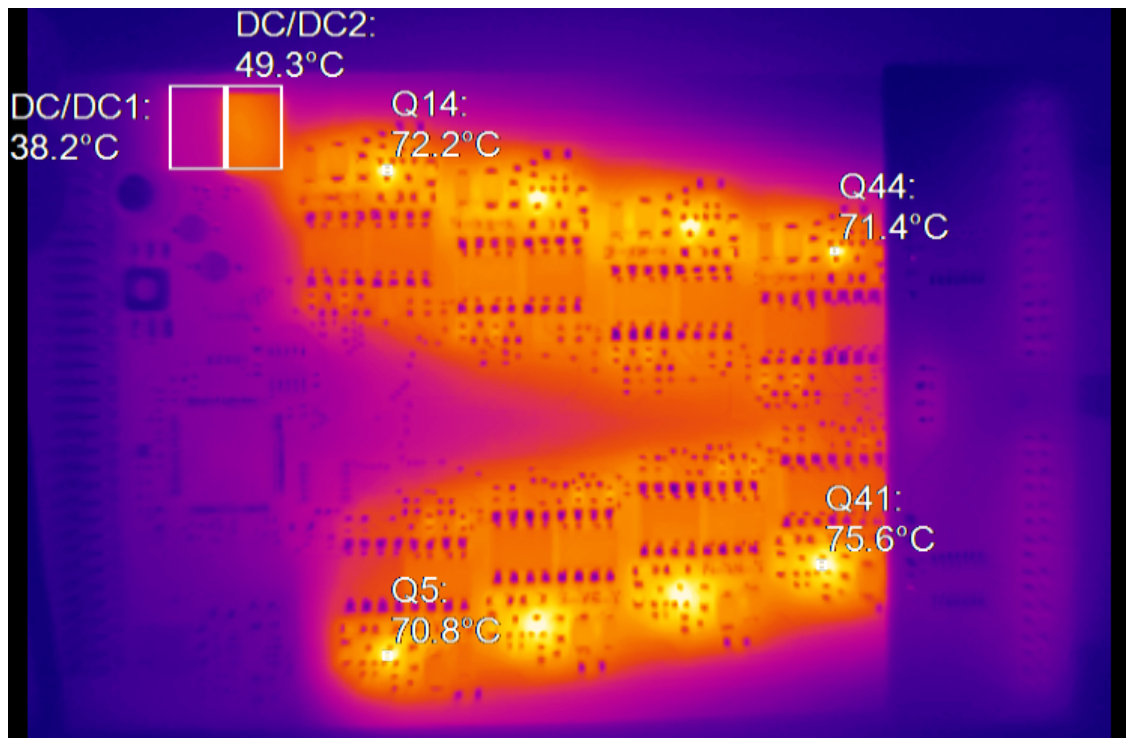
Výsledná karta je zobrazena na obrázku 4.32. Celkem se podařilo kartu navrhnout s 16-ti kanály digitálních vstupů. Montáž součástek je kombinovaná z obou stran DPS. Mezi vstupními konektory je 5 mm bezpečnostní izolační vzdálenost pro možnost použití detekce malého napětí na jednom a nízkého napětí na druhém konektoru na stejné kartě, podobně jako u karty výstupů. Spotřeba karty je 80 mA při detekci 230 V střídavých na všech kanálech a při všech sepnutých SSR optočlenech TLP222A pro výběr prahové hodnoty.



Obr. 4.32: Vyrobená a naprogramovaná karta digitálních vstupů.



Obr. 4.33: Snímek z termokamery při připojení 230 V střídavých na všechny vstupy.



Obr. 4.34: Snímek z termokamery při připojení 230 Vrac na všechny vstupy (nejhorší možný případ).

Na obrázku 4.33 se nachází snímek z termokamery při detekci přítomnosti 230 V střídavých na všech vstupech. Teplota na tranzistorech (na schématu 4.26 označen jako tranzistor Q2) dosahuje hodnoty okolo 54 °C. Dosažená teplota je v pořádku i pro dlouhodobější zatěžování. Horší situace nastane v případě připojeného napětí Vrac, tedy nevyfiltrovaného dvoucestně usměrněného napětí o hodnotě 230 V. Ztrátový výkon se tak zdvojnásobí a nárůst teploty je také přibližně dvojnásobný. Tato nejhorší varianta byla změřena a je zachycena na snímku 4.34, kde teplota na tranzistorech dosahuje teplot až 75,6 °C. I když se nejedná o kritickou teplotu, je už poměrně vysoká a její dlouhodobé trvání by mohlo vést k postupné degradaci a zhoršení spolehlivosti. Takovýto případ by teoreticky mohl nastat při detekci napětí na elektromechanickém ventilu, kde se nevyfiltrované dvoucestné usměrnění používá k jeho napájení. Všechny hodnoty teplot byly měřeny při teplotě okolí 20 °C a s kartou volně položenou na stole. K měření byla použita termokamera Micro-Epsilon TIM400.

4.4.6 Přehled MODBUS registrů

Stav jednotlivých digitálních vstupů se nastavuje a čte za pomoci MODBUS paketů. Přehled registrů pro práci s digitálním vstupem je v tabulce 4.8. Možnost vyčíst frek-

venci a střidu vstupního signálu mají pouze vstupní kanály 1 a 3 z důvodu časového vytížení mikrokontroléru. Prahová hodnota se definuje podle tabulky 4.6. Vyčítání i zápis mohou mít společný registr, avšak rozdílný funkční kód. Hodnotou je vždy 16-bitové číslo, kde bit 15 definuje vstup 16 a postupně dále bit 0 označuje vstup 1.

Tab. 4.8: Přehled registrů a funkčních kódů pro ovládání karty digitálních vstupů.

Popis příkazu	Funkční kód čtení/zápisu	Registr
Přečíst nefiltrovaný stav vstupů	0x03 / -	0x0101
Přečíst filtrovaný stav vstupů	0x03 / -	0x0102
Přečíst/nastavit prahové napětí L1	0x03 / 0x06	0x0104
Přečíst/nastavit prahové napětí L2	0x03 / 0x06	0x0105
Přečíst frekvenci CH1	0x03 / -	0x0110
Přečíst střidu CH1	0x03 / -	0x0112
Přečíst frekvenci CH3	0x03 / -	0x0113
Přečíst střidu CH3	0x03 / -	0x0114
Přečíst/nastavit inverzi hodnot	0x03 / 0x06	0x0116

4.4.7 Zapojení konektorů

V tabulce 4.9 je vidět zapojení obou konektorů pro kartu digitálních vstupů. Oba konektory jsou typu Molex Mini-Fit o dvou řadách po osmi pinech. První číslo v buňce je číslo pinu na konektoru, za ním se nachází označení vstupu a za pomlčkou o který z pinů vstupu se jedná. Označení vstupu 1 je označení pro kladnější vstup, označení 2 pro zápornější.

Tab. 4.9: Přehled výstupů na konektorech.

K4							
8: IN1-1	7: IN2-1	6: IN3-1	5: IN4-1	4: IN5-1	3: IN6-1	2: IN7-1	1: IN8-1
16: IN1-2	15: IN2-2	14: IN3-2	13: IN4-2	12: IN5-2	11: IN6-2	10: IN7-2	9: IN8-2
K5							
8: IN9-1	7: IN10-1	6: IN11-1	5: IN12-1	4: IN13-1	3: IN14-1	2: IN15-1	1: IN16-1
16: IN9-2	15: IN10-2	14: IN11-2	13: IN12-2	12: IN13-2	11: IN14-2	10: IN15-2	9: IN16-2

4.5 Karta digitálních potenciometrů

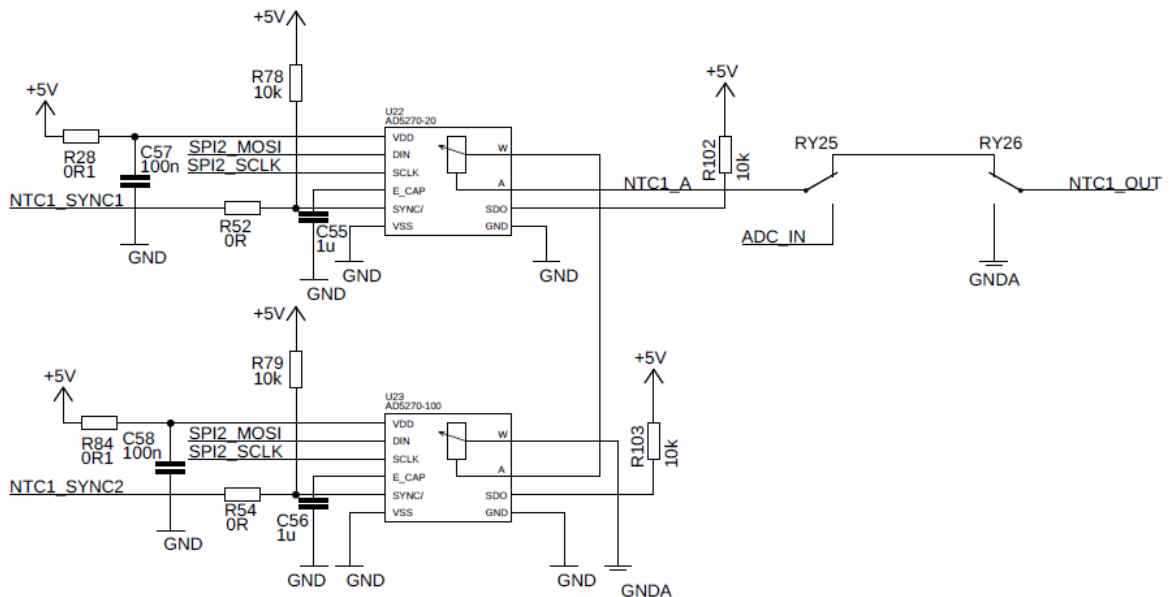
Odporové snímače typu NTC jsou jedny z nejběžnějších teplotních snímačů využívaných řídicími deskami kotlů firmy Resideo. Proto je potřeba tyto snímače simulovat. Řešením jsou digitální potenciometry, pro možnost variabilního nastavení hodnoty odporu. Základními požadavky na digitální potenciometry (simulátory odporových teplotních snímačů) jsou rozsah nastavení hodnoty odporu a krok nastavení hodnoty odporu. Rozsah se u reálných teplotních snímačů pohybuje od jednotek $k\Omega$ až

po stovky k Ω . Po diskusi o základních požadavcích bylo rozhodnuto, že rozsah odporu by měl být alespoň do 100 k Ω s možným krokem maximálně 30 Ω . V následující tabulce 4.10 lze nalézt stručný přehled uvažovaných typů digitálních potenciometrů pro tento návrh.

Tab. 4.10: Přehled možných digitálních potenciometrů a jejich parametry [61, 62, 63, 64].

Název IO	Nom. odpor [k Ω]	Max. tolerance [%]	Rozlišení [bit]	Nap. napětí [V]
AD5270-20	20	+/- 1 %	1024	2,7 - 5,5
AD5270-100	100	+/- 1 %	1024	2,7 - 5,5
AD5235	250	+/- 8 % (EEPROM)	1024	2,7 - 5,5
TPL0501	100	+/- 20 %	256	5
AD5260	200	+/- 30 %	256	15

Vzhledem k dostupnosti, ceně, ideálnímu rozsahu, a především deklarované přesnosti 1 % při využití „Resistor performance mode“ režimu (který zajistí 1 % toleranci odporu digitálního potenciometru v téměř 90 % rozsahu [61]) byly zvoleny digitální potenciometry AD5270. Aby byl splněn potřebný minimální krok 30 Ω , je nutno za sebe v sérii zapojit dva tyto potenciometry (první s hodnotou 100 k Ω a druhý s hodnotou 20 k Ω). Důvodem kombinace je zároveň zvětšení rozsahu a snížení možného kroku odporového jezdce. Zapojení těchto obvodů je zobrazeno na obrázku 4.35. Celkem by se na jedné kartě mělo objevit až 8 odporových výstupů.

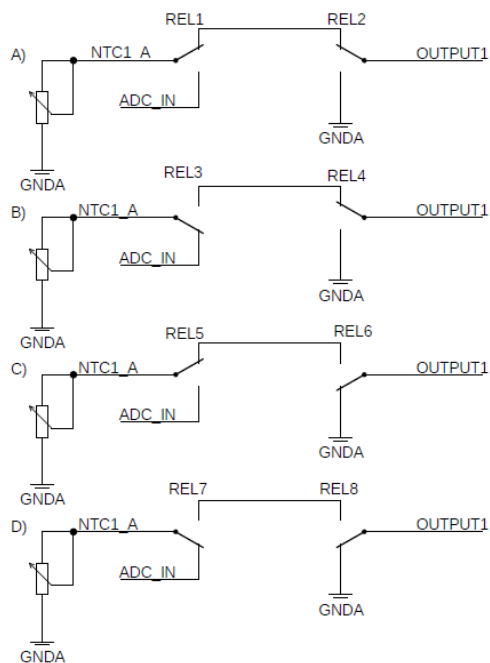


Obr. 4.35: Zapojení odporového výstupu s digitálními potenciometry.

Oba integrované obvody jsou s mikrokontrolérem spojeny pomocí SPI sběrnice, každý s vlastním synchronizačním signálem (chip select). Bohužel má tento integro-

vaný obvod jednu nevýhodu. Tou je skutečnost, že katalogový list nedefinuje hodnotu minimálního odporu, ale pouze její limit. První krok odporového jezdce, který lze pomocí digitálního potenciometru nastavit, má hodnotu odporu 50Ω na každý z integrovaných obvodů [61]. Po prvním kroku lze nastavovat každý další krok po 20Ω . Kromě nastavení hodnoty odporu je nutné vytvořit i možnost zkratu a rozpojení, a to například pomocí signálních relétek.

Pomocí dvou relé na jeden odporový kanál lze vytvořit celkem 4 kombinace zapojení snímače. Kombinace jsou zobrazeny na obrázku 4.36 označené pozicemi A až D. Možností zapojení je připojení na zemní potenciál (simulace nejnižšího odporu, obrázek C), odpojení výstupu (simulace odpojeného snímače, obrázek B), připojení výstupu odporového snímače simulovanými digitálními potenciometry (simulace NTC snímače, obrázek A) a připojení digitálních potenciometrů na vstup A/D převodníku pro kontrolu správné funkčnosti digitálních potenciometrů (obrázek D).

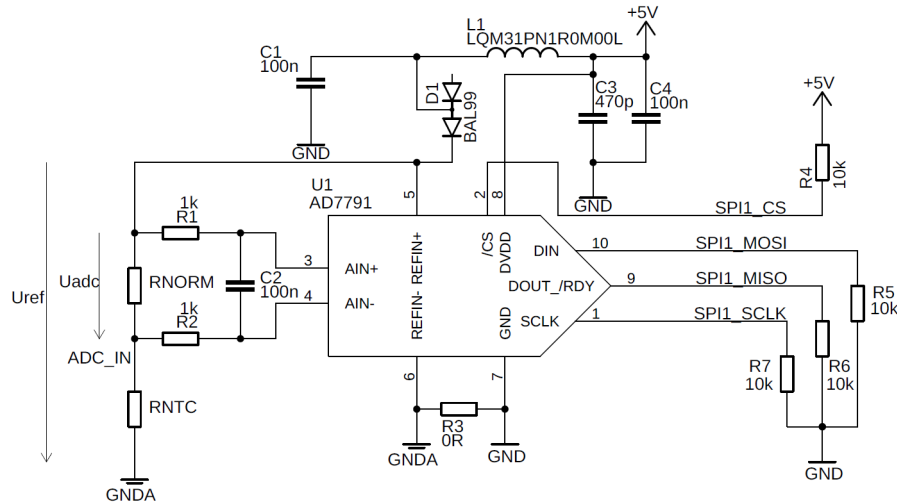


Obr. 4.36: Varianty kombinace spínačů A až D, popsané v textu výše.

Stejně jako u karty výstupů je pro spínání všech relé použitý budič relé TPIC6C595 s integrovanými diodovými ochranami. Zvolená relé E2C-5NU [65] jsou speciální signálová relátka. Jejich kontakty dokážou bez problému přenést signál s proudem okolo $1 \mu\text{A}$, což je vzhledem k simulovanému odporu nutné. Typicky se bude proud relátky pohybovat v desítkách μA při největším možném nastavitelném odporu $120 \text{ k}\Omega$.

4.5.1 Verifikace digitálních potenciometrů

Kontrola správné funkčnosti (nastaveného odporu) je prováděna přes normálový rezistor R_{NORM} s velkou přesností (nejlépe 0,1 %), který je dále připojen na výstup digitálního potenciometru. Na simulovaném odporu tak bude měřeno napětí a porovnáváno s normálovým rezistorem. K mikrokontroléru bude připojen 24-bitový A/D převodník AD7791 typu sigma-delta pomocí sběrnice SPI [66]. Zapojení celého A/D převodníku je zobrazeno na obrázku 4.37.



Obr. 4.37: Převodník analogového napětí na digitální signál pro kontrolu funkčnosti digitálních potenciometrů.

Pro změření reálného odporu měřeného prvku R_{NTC} je vyjádřena rovnice (při zanedbání vstupního odporu A/D převodníku):

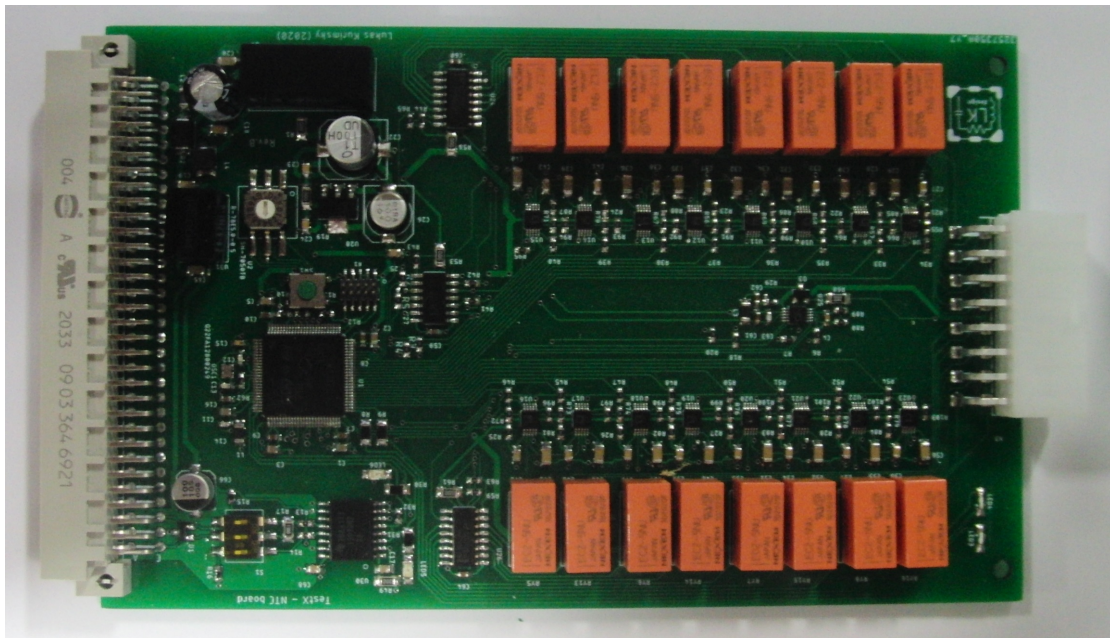
$$R_{NTC} = R_{NORM} \left(\frac{U_{ref}}{U_{adc}} - 1 \right) [\Omega], \quad (4.5)$$

kde R_{NTC} je nastavovaný digitální potenciometr $[\Omega]$, R_{NORM} je hodnota normálového rezistoru $[\Omega]$, U_{ref} je referenční napětí $[V]$ a U_{adc} je měřené napětí na normálovém rezistoru $[V]$.

Verifikace digitálních potenciometrů je prováděna na vyžádání pomocí MODBUS protokolu (viz 4.12). Normálový odpor R_{NORM} byl zvolen s hodnotou 3,3 k Ω tak, aby bylo možné změřit co nejpřesněji hodnotu odporu v nejpoužívanějším rozsahu hodnot v jednotkách a desítkách k Ω . Pro základní ověření funkce digitálního potenciometru je tento způsob měření dostatečný.

4.5.2 Výsledná karta digitálních potenciometrů

Výsledná karta je zobrazena na obrázku 4.38. Na desce se nachází celkem 8 kanálů se sériovou kombinací digitálních potenciometrů s hodnotou 20 k Ω a 100 k Ω . Jednotlivé kanály lze nastavit s krokem 20 Ω na hodnoty v rozsahu 0 až 120 k Ω s omezením při nízkém odporu (viz kapitola 4.5).



Obr. 4.38: Vyrobená a naprogramovaná karta digitálních potenciometrů.

Nastavit lze celkem 4 režimy pomocí signálových relé (zkrat, odpojení digitálního potenciometru, nastavení odporu a kontrola pomocí A/D převodníku). Lze také provést ověření funkčnosti digitálních potenciometrů pomocí A/D převodníku a měření napětí na normálovém rezistoru 3,3 k Ω . Maximální odběr karty je zhruba 100 mA (vždy je sepnuté pouze jedno relé na daný kanál).

4.5.3 Ověření reálných vlastností digitálních potenciometrů

Ověření reálných vlastností probíhalo za pomoci připraveného skriptu pro ovládání nastavení odporu digitálních potenciometrů a vyčítání hodnot z počítači připojeného digitálního multimetru Keithley 2700. Hodnoty odporu byly nastaveny v celém rozsahu 0 Ω až 120 k Ω po kroku 100 Ω . Z naměřených dat byly vytvořeny grafy, které jsou na obrázcích 4.39 a 4.40. Původní naměřená data jsou přiložena v elektronické příloze A. Chyba nastavené hodnoty, oproti měřené, je vždy zobrazena v absolutní i relativní hodnotě, a to pro všech 8 kanálů.

Maximální chyba 1 % je u digitálního potenciometru uvedena v katalogovém listu [61] pro rozsah hodnot od 0x078 do 0x3FF při napájení 4,5 V až 5,5 V. Lze tak

vypočítat podle vztahu 4.6 minimální hodnotu odporu, pro který je daný digitální potenciometr deklarovaný s 1 % přesností.

$$R_{MIN} = \frac{I}{2^N} * A \quad [\Omega], \quad (4.6)$$

kde R_{MIN} je hodnota minimálního odporu pro daný digitální potenciometr, I je bitová nastavená hodnota pro deklarovaný odpor, 2^N je maximální počet bitů, který lze nastavit, a A je maximální hodnota odporu digitálního potenciometru.

Vztah můžeme ještě rozšířit a vypočítat tak hodnotu pro oba digitální potenciometry zapojené v sérii, viz 4.7.

$$R_{MIN} = \frac{I_1}{2^{N_1}} * A_1 + \frac{I_2}{2^{N_2}} * A_2 \quad [\Omega], \quad (4.7)$$

kde index 1 je pro první digitální potenciometr a index 2 pro druhý digitální potenciometr. Minimální hodnotu v rozsahu je nutné přepočítat na dekadické číslo, tedy 0x078 na dekadickou hodnotu 120. Výpočet a výsledek po dosazení do rovnice 4.7 je v rovnici 4.8.

$$R_{MIN} = \frac{120}{1024} * 20000 + \frac{120}{1024} * 100000 = 14062,5 \quad [\Omega]. \quad (4.8)$$

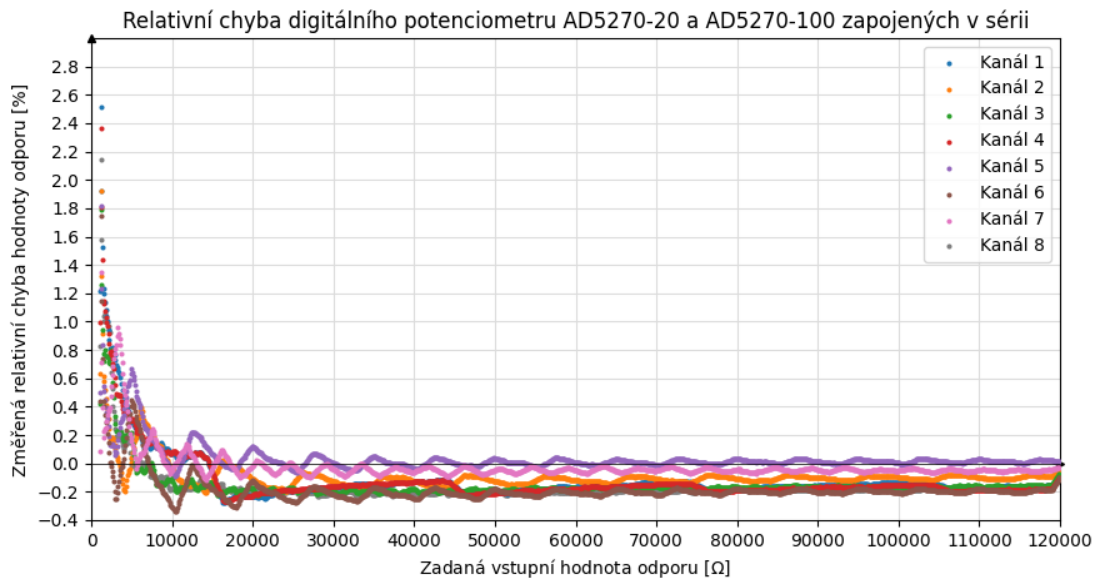
Součet minimálních hodnot, od kterých je deklarována chyba 1 %, je v absolutních číslech 14062,5 Ω . Pokud srovnáme vypočítanou chybu s naměřenými hodnotami vyčtenými z grafu, pak od nastavené hodnoty 14 k Ω není chyba větší než $\pm 0,5$ %, a tak je přesnost digitálních potenciometrů ověřena. Firmware vždy algoritmicky nastavuje, aby hodnoty I_1 a I_2 byly vždy co nejbližší (maximálně však o 5 hodnot).

Chyba na počátku rozsahu může mít chybu až v jednotkách procent, což pro tento případ není problém. Zapojený digitální potenciometr se v tomto případě využívá jako NTC snímač teploty a v počátku rozsahu tak simuluje vysoké teploty ve velmi strmém přechodu. Nulovou hodnotu odporu nelze ani jedním digitálním potenciometrem nastavit (minimální odpor jezdce je pro oba digitální potenciometry 50 Ω [61]), proto se o nulový výstupní odpor stará přímo jedno z přepínacích signálových relé, které zkratuje daný výstup a nulový potenciál.

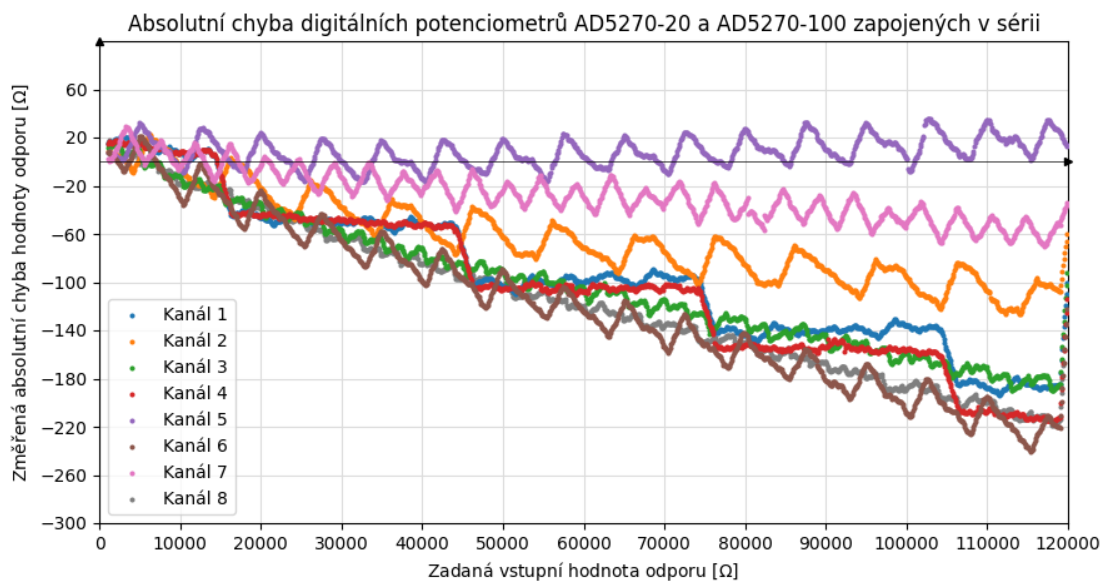
V grafu na obrázku 4.40 je zobrazena absolutní chyba nastavené hodnoty odporu digitálních potenciometrů.

A/D převodník, který je na kartě umístěn pro ověření správné funkce digitálních potenciometrů, byl použitý pro ověření jejich hodnot. Testování je možné spustit pomocí MODBUS zprávy. Celkem se testování při ověření provádí na šesti nastavených hodnotách vypsanych v tabulce 4.11.

Pro správnou funkci a dosažení co největší přesnosti měření bylo nutné zapojit zem měření odděleně od země napájecí a zapojit ji co nejvíce do hvězdy.



Obr. 4.39: Relativní chyba nastaveného odporu.



Obr. 4.40: Absolutní chyba nastaveného odporu.

Tab. 4.11: Hodnoty odporu digitálních potenciometrů AD5270 naměřené pomocí A/D převodníku AD7791.

Kanál	0 kΩ	10 kΩ	20 kΩ	50 kΩ	100 kΩ	120 kΩ
CH1	0,055	10,03	20,03	50,15	100,0	120,2
CH2	0,055	10,04	20,03	50,06	100,0	120,1
CH3	0,055	10,03	20,02	50,08	100,2	120,0
CH4	0,056	10,05	20,02	50,07	99,68	120,3
CH5	0,056	10,02	20,00	50,09	99,56	119,6
CH6	0,055	10,04	20,03	50,10	99,91	121,0
CH7	0,055	10,02	19,99	50,01	100,1	119,1
CH8	0,054	10,02	20,02	50,20	99,90	119,6

Připojena je pak až v bodě měření k zemi napájecí. Vodiče k normálovému rezistoru jsou spojeny Kelvinovým zapojením.

Měření je vždy provedeno pro všech 8 kanálů (postupně se jednotlivé kanály připojují k normálovému odporu). Ověření funkčnosti digitálního potenciometru tak je dostačující a plně prokazatelné. Limity jsou firmwarově nastaveny okolo $\pm 2,5\%$, kromě hodnoty odporu $0\ \Omega$, neboť samotný jezdec digitálního potenciometru má odpor $50\ \Omega$. Při provedení úspěšného testu se rozsvítí zelená LED dioda vedle konektoru a výsledek verifikace bude mít hodnotu 1. Pokud bude některá z měřených hodnot mimo rozsah, rozsvítí se červená LED dioda vedle konektoru a výsledek verifikace bude mít hodnotu 0.

4.5.4 Přehled MODBUS registrů

Stav jednotlivých digitálních potenciometrů se nastavuje a čte za pomoci MODBUS paketů. Přehled registrů pro práci s digitálními potenciometry je v tabulce 4.12.

Tab. 4.12: Přehled nejdůležitějších registrů a funkčních kódů pro ovládání karty digitálních potenciometrů.

Popis příkazu	Funkční kód čtení/zápisu	Registr
Přečíst/nastavit stav dig.pot. 1	0x03 / 0x10	0x0010
Přečíst/nastavit stav dig.pot. 2	0x03 / 0x10	0x0012
Přečíst/nastavit stav dig.pot. 3	0x03 / 0x10	0x0014
Přečíst/nastavit stav dig.pot. 4	0x03 / 0x10	0x0016
Přečíst/nastavit stav dig.pot. 5	0x03 / 0x10	0x0018
Přečíst/nastavit stav dig.pot. 6	0x03 / 0x10	0x001A
Přečíst/nastavit stav dig.pot. 7	0x03 / 0x10	0x001C
Přečíst/nastavit stav dig.pot. 8	0x03 / 0x10	0x001E
Start verifikace	- / 0x06	0x0029
Přečíst stav verifikace	0x03 / -	0x0021
Přečíst výsledek verifikace	0x03 / -	0x0022

Vyčítání i zápis mohou mít společný registr, avšak rozdílný funkční kód. Hodnotou je buď 16-bitové číslo (spuštění a stav verifikace kanálů) nebo číslo s plovoucí desetinnou čárkou (float - stav jednotlivých digitálních potenciometrů). Po spuštění

verifikace digitálních potenciometrů je nastaven její stav jako „probíhající kontrola“, a dokud není verifikace ukončena, nejsou k dispozici naměřené hodnoty a její výsledek. Výsledek verifikace po dokončení oznámí, zda je karta v pořádku, nebo není.

4.5.5 Zapojení konektorů

V tabulce 4.13 je vidět zapojení konektoru pro kartu digitálních potenciometrů. Konektor je typu Molex Mini-Fit o dvou řadách po osmi pinech. První číslo v buňce je číslo pinu na konektoru, za ním se nachází označení digitálního potenciometru a za pomlčkou o který z pinů digitálního potenciometru se jedná. Označení vstupu 1 je označení pro kladnější vstup, označení 2 pro zápornější.

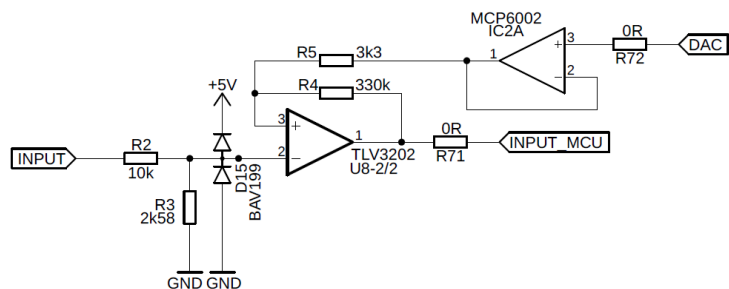
Tab. 4.13: Přehled výstupů na konektorech.

K3							
8: POT1-1	7: POT2-1	6: POT3-1	5: POT4-1	4: POT5-1	3: POT6-1	2: POT7-1	1: POT8-1
16: POT1-2	15: POT2-2	14: POT3-2	13: POT4-2	12: POT5-2	11: POT6-2	10: POT7-2	9: POT8-2

4.6 Karta PWM vstupů a výstupů

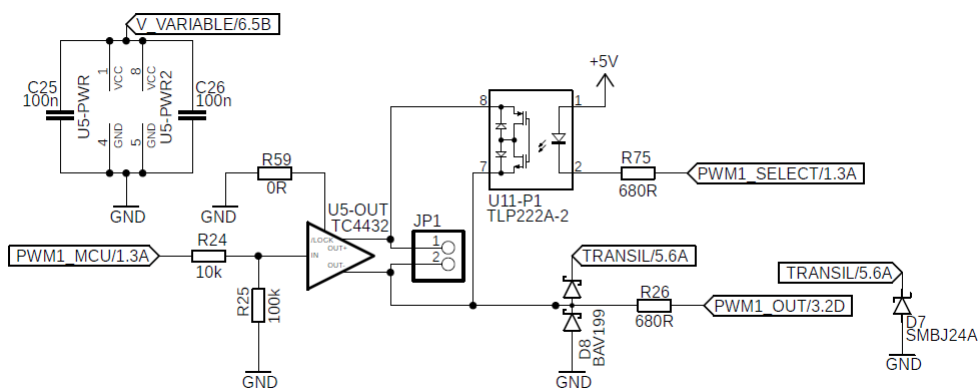
Pro přesné měření frekvence a střídy vstupního signálu a pro generování PWM signálů je určena karta PWM vstupů a výstupů. Je jedinou kartou s rozdílným mikrokontrolérem, konkrétně CY8C5467AXI-LP108 typu PSoC [33]. Digitální část, vytvořená na programovatelném hradlovém poli, je určena pro rychlé vzorkování vstupního PWM signálu a generování výstupních PWM signálů. Analogová část programovatelného pole je určena pro vytvoření prahové porovnávací hodnoty pomocí D/A převodníků pro detekci vstupního signálu a měření hodnoty napětí napájecího zdroje pomocí A/D převodníku. O komunikaci a přepočítání naměřených hodnot se již stará mikrokontrolér s jádrem ARM. Právě nezávislost na časovačích mikrokontroléru na nízké frekvenci a okamžité zpracování vstupních signálů jsou výborné vlastnosti pro měření frekvence a střídy s co největší přesností i přes použití nízkého kmitočtu pro PSoC. Nižší frekvence je použita záměrně, aby bylo možné detekovat nižší frekvence vstupního signálu (řádově desítky až stovky Hz). Vzorkovací frekvence vstupních kanálů by měla být 12 MHz.

Na obrázku 4.41 lze vidět jeden vstupní kanál pro měření PWM signálu. Vstupní signál je podělen děličem napětí z rezistorů R2 a R3 pro omezení vstupního napětí a za děličem se nachází ještě ochranné diody D15 proti napájení. Zeslabený signál je připojený na neinvertující vstup komparátoru TLV3202 a na invertující vstup



Obr. 4.41: Zapojení digitálního vstupu pro měření frekvence a středy signálu.

se připojí výstup operačního zesilovače MCP6002 zapojeného jako napěťový sledovač [67, 68]. Ten vytváří posílením výstupu z D/A převodníku porovnávací prahovou úroveň pro vstupní signál. Výstup komparátoru je poté připojen na vstup PSoC. Rezistory R4 a R5 vytváří hysterzi daného komparátoru.

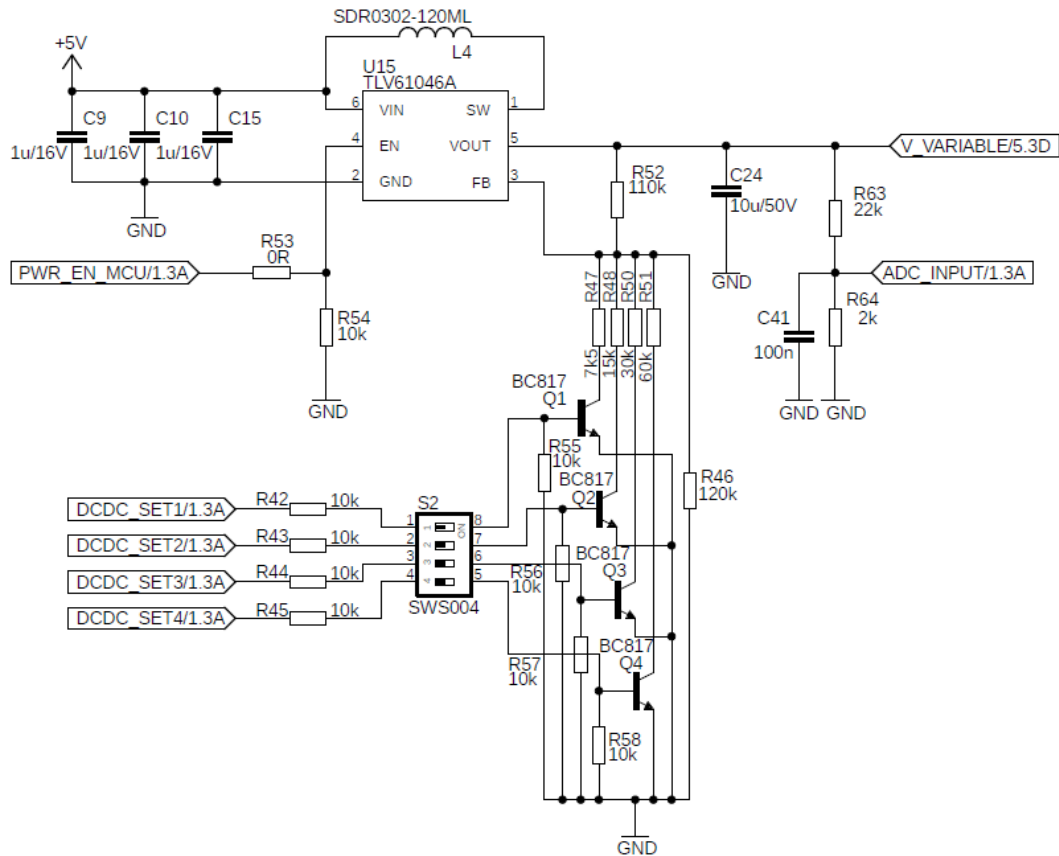


Obr. 4.42: Zapojení digitálního výstupu pro generování PWM signálu.

Digitální výstup je zobrazen na obrázku 4.42. Vstupní signál je podělen děličem R24 a R25 kvůli definování logické úrovně 0 vstupu integrovaného obvodu TC4432. Protože požadujeme, aby integrovaný obvod pracoval již od 4,5 V, je nutné jeho LOCKED pin připojit k zemnímu potenciálu, aby byl deaktivovaný UVLO (under-voltage lockout) mód. Výstup typu otevřený kolektor je připojený přes ochranné diody svedené z kladné polaroty do transilu a přes ochranný rezistor R26 na výstupní konektor. SSR relé je použité pro možnost připnutí kladného výstupu integrovaného obvodu TC4432 pro použití PWM výstupu v režimu Push-Pull [69]. V případě režimu Push-Pull je připínáno na výstup napájecí napětí obvodu TC4432. Aby bylo použití co nejuniverzálnější, je na napájení připojený nastavitelný zdroj napětí.

4.6.1 Nastavitelný napájecí zdroj napětí

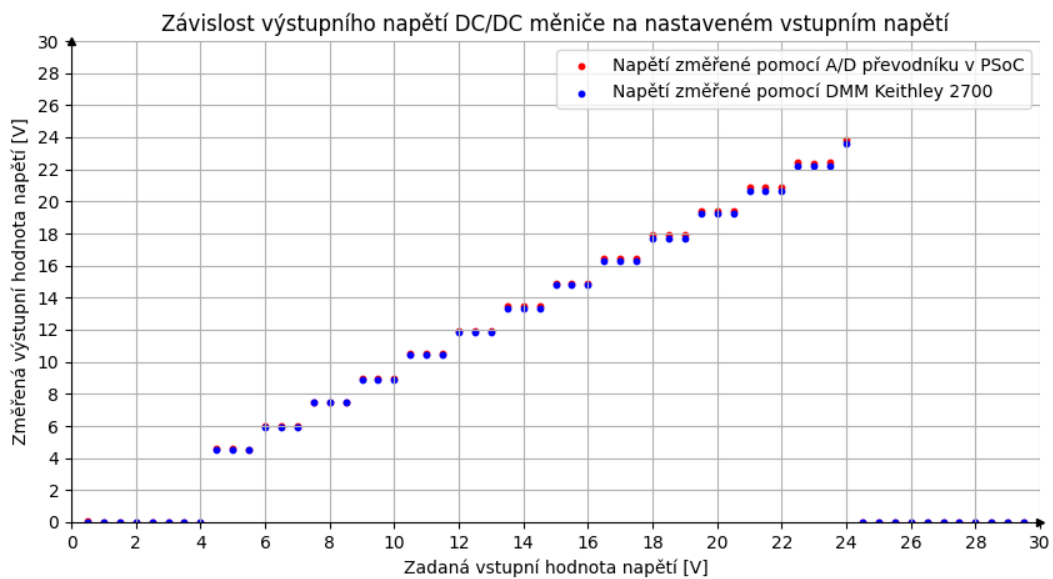
Napájecí zdroj je založen na integrovaném obvodu TLV61046A [70] a je vidět na obrázku 4.43. Interní struktura již obsahuje spínací tranzistory i diodu pro napěťový měnič typu BOOST. Stačí pouze několik okolních součástek pro uvedení měniče do správné činnosti.



Obr. 4.43: Zapojení nastavitelného napájecího zdroje pro možnost nastavení výstupů typu Push-Pull.

Nutné je použít vstupní keramické kondenzátory pro blokování napájecího napětí a výstupní keramický kondenzátor s nízkými hodnotami ESR. Zpětná vazba pro určení výstupního napětí je určena úbytkem napětí 0,8 V na rezistoru proti zemnímu potenciálu připojenému na vstup FB. Aby bylo nastavení výstupního napětí variabilní, jsou připojeny ke zpětné vazbě paralelní rezistory připínané přes tranzistory BC817. Připínáním dokážeme dosáhnout širokého rozsahu výstupního napětí od 4,5 do 24 V stejnosměrných. Minimální hodnota 4,5 V je určena minimálním napájecím napětím integrovaného obvodu TC4432. Zajištění minimální hodnoty výstupního napětí 4,5 V je díky vnitřní diodě v měniči napětí, na které se vytvoří

úbytek napětí i přesto, že se jedná o zvyšující měnič (BOOST). K manuálnímu nastavení maximálního napětí je mezi rezistory a bázemi tranzistorů připojený DIP přepínač a báze tranzistorů jsou připojeny přes rezistor 10 k Ω k zemnímu potenciálu pro zajištění uzavřených tranzistorů. V případě, kdy jsou všechny tranzistory Q1 až Q4 rozpojené, je výstupní napětí určeno vždy připojeným rezistorem R46. Nastavení výstupního napětí probíhá pomocí PSoC mikrokontroléru, který ovládá spínací tranzistory ve zpětné vazbě. Maximální nastavitelné napětí je možno zvolit DIP přepínačem. Zapojení nastavitelného DC/DC měniče je inspirováno aplikačním listem Maxim Integrated APP818 [71].



Obr. 4.44: Nastavení napětí napájecího zdroje měřené pomocí digitálního multimetru a interního A/D převodníku v PSoC.

Na obrázku 4.44 je zobrazena závislost nastaveného napětí na DC/DC měniči na skutečném výstupním napětí. Nastavitelné hodnoty mají krok přibližně 1,5 V od hodnoty 4,5 V do hodnoty 24 V a vždy se přibližují nižšímu napětí, než je nastaveno pro daný krok. Měření pomocí digitálního multimetru Keithley 2700 se téměř překrývá s měřením pomocí vnitřního A/D převodníku v PSoC mikrokontroléru. Nastavené napětí pak lze ověřit přečtením zprávy prostřednictvím MODBUS, kde na vyžádání nastavené hodnoty je čtena reálná nastavená hodnota na napájecím zdroji. Pro napětí menší než 4,5 V a větší než 24 V je napájecí zdroj z bezpečnostních důvodů vypnutý. Původní naměřená data jsou přiložena v elektronické příloze A.

V tabulce 4.14 lze nalézt tři nejdůležitější kombinace nastavení DIP přepínače pro ochranu před vyšším výstupním napětím. Pokud dojde k zadání vyššího výstupního napětí, než je nastaveno pomocí DIP přepínače, tato změna se neprojeví

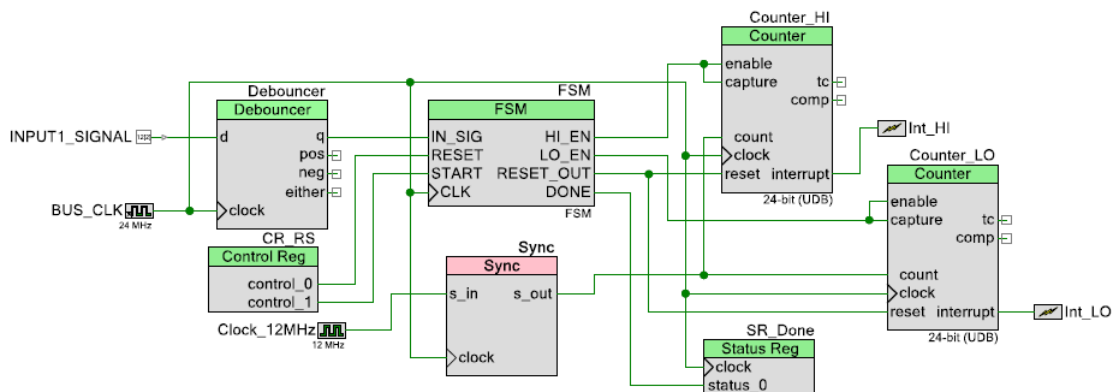
Tab. 4.14: Přehled nastavení DIP přepínače pro limitování výstupního napětí.

DIP1	DIP2	DIP3	DIP4	Maximální výstupní napětí [V]
0	0	1	1	6 V
0	1	1	1	12 V
1	1	1	1	24 V

na zpětné vazbě měniče a výstupní napětí tak dosáhne maximálně nejvyšší možné nastavené hodnoty.

4.6.2 Digitální část PSoC použitá pro měření a generování PWM signálů

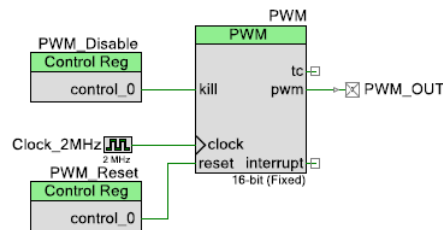
Firma Cypress vytvořila pro vývoj aplikací s integrovanými obvody typu PSoC aplikaci PSoC Creator. Vývoj digitální části je postavený na funkčních blocích předprogramovaných v aplikaci. Jediným vytvořeným blokem je funkční stavový automat označený jako FSM ve schématu na obrázku 4.45. Stavový automat je napsaný v jazyce Verilog a je v příloze B.



Obr. 4.45: HDL návrh PWM vstupu pro měření frekvence a střidy.

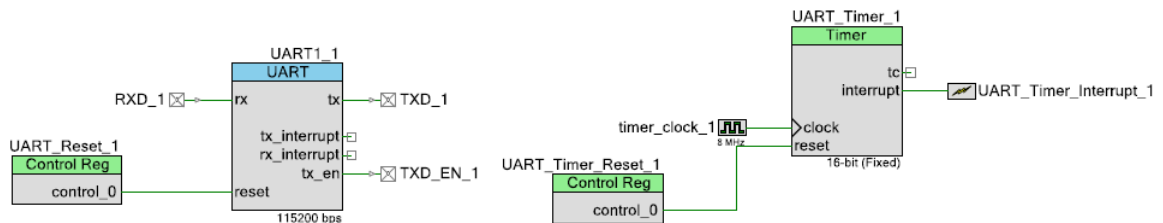
Vstupní signál je filtrovaný pomocí debounceru, který očistí signál od zákmitů. Na základě kontrolních registrů CR_RS se nastavuje start a reset signál pro stavový automat. Synchronizační člen běží na poloviční frekvenci z důvodu správné funkce čítačů. Všechny ostatní synchronní členy obvodu běží na frekvenci 24 MHz. Maximální frekvence by mohla být nastavená až na hodnotu 67 MHz, avšak záměrně byla vybrána hodnota frekvence 24 MHz. Důvod volby frekvence 24 MHz je možnost měřit frekvenci a střidu signálů s nižšími hodnotami frekvence. Čítače jsou rozděleny na čítání spodní úrovně (Counter_LO) a horní úrovně (Counter_HI). Výsledný konec měření je oznámen do stavového registru SR_Done. Měření se nastaví vstupním signálem START a až proběhne, oznámí své dokončení. Pro další měření musí

být stavový automat vyresetován. Výstup RESET_OUT stavového automatu provede reset čítačů v případě spuštění nového měření. Poté lze spustit další měření. Při přetečení některého z čítačů je vyvoláno v mikrokontroléru přerušení a lze tak detekovat připojený signál v horní úrovni, spodní úrovni nebo se setrváním v jednom stavu po dobu větší než 1,39 sekundy (uvažováno pro 24-bitový čítač).



Obr. 4.46: HDL návrh PWM výstupu.

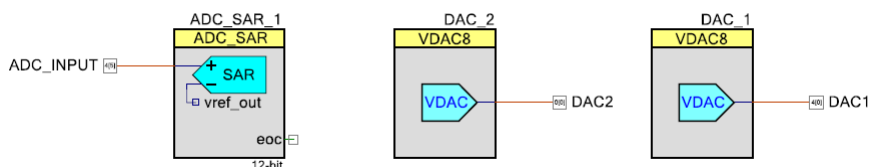
Na obrázku 4.46 je vidět blok pro generování výstupního PWM signálu. Nulovou hodnotu střídy lze nastavit pomocí kontrolního registru PWM_Disable a úplné vypnutí PWM bloku pomocí kontrolního registru PWM_Reset. Výstupnímu PWM bloku lze nastavit frekvenci v rozsahu 32 Hz až 200 kHz a střídu v závislosti na frekvenci (čím vyšší frekvence, tím méně přesné nastavení střídy). Vstupní frekvence do bloku PWM s hodnotou 12 MHz byla zvolena záměrně pro možnost generování i nižších frekvencí v jednotkách desítek až stovek Hz. O další zpracování signálu se pak dále starají obvody na obrázku 4.42.



Obr. 4.47: HDL návrh komunikačních bloků UART s časovačem vypršení.

Na obrázku 4.47 se nacházejí další bloky určené ke komunikaci prostřednictvím UART (o převod na RS-485 se stará stejně jako u ostatních karet externí budič sběrnice). O vypršení časového limitu při příjmu zprávy se stará blok časovače nastavený na 1,875 ms. Dalšími bloky pak jsou A/D převodník s postupnou aproximací a dva D/A převodníky zobrazené na obrázku 4.48.

Kvůli omezenému množství UDB bloků v PSoC mikrokontroléru CY8C5467AXI-LP108 se podařilo umístit do návrhu pouze čtyři vstupní kanály a čtyři výstupní kanály. První dva vstupní kanály mají 24-bitové čítače a další dva vstupní kanály

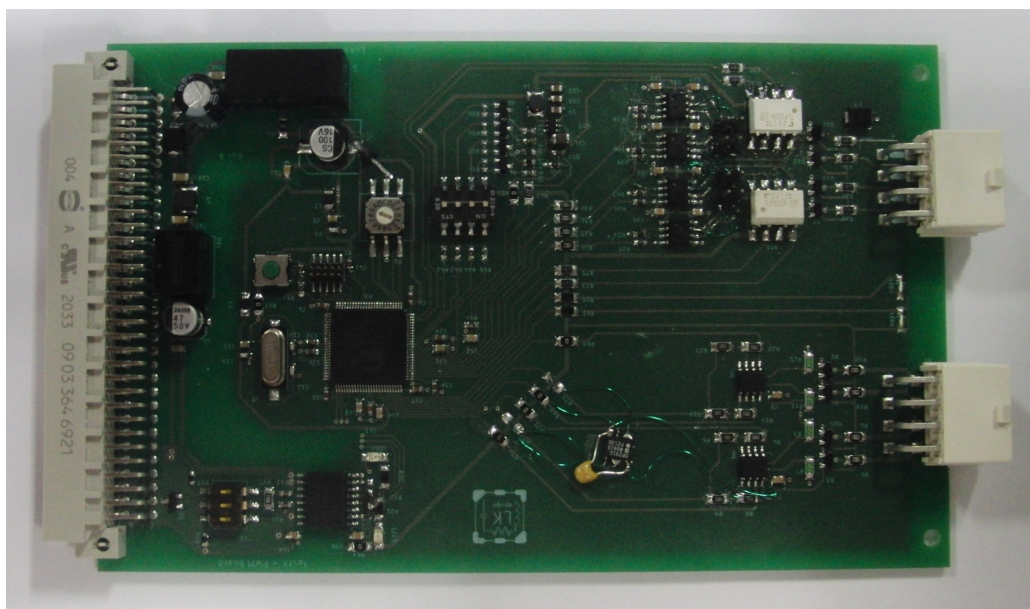


Obr. 4.48: HDL návrh A/D a D/A převodníků.

pouze 16-bitové. Podobně tak první tři výstupní kanály jsou vytvořeny z 16-bitových bloků (s minimální frekvencí 32 Hz), čtvrtý kanál pouze z 8-bitového (s minimální frekvencí 8 kHz). Nevýhodou tohoto návrhu je skutečnost, že ze strany digitálního návrhu jsou využity veškeré prostředky a v budoucnu nelze systém dále rozšiřovat.

4.6.3 Výsledná karta PWM vstupů a výstupů

Výsledná karta je zobrazena na obrázku 4.49. Celkem se na ní nachází 4 vstupní a 4 výstupní kanály. Na kartě se nachází také nastavitelný DC/DC měnič, který slouží pro nastavení napětí na výstupu pro režim Push-Pull. V případě nevyužití tohoto režimu se výstupy chovají jako otevřený kolektor. Vstupní kanály obsahují komparátor pro možnost nastavení prahové hodnoty napětí, které je nutné pro detekci překročit.



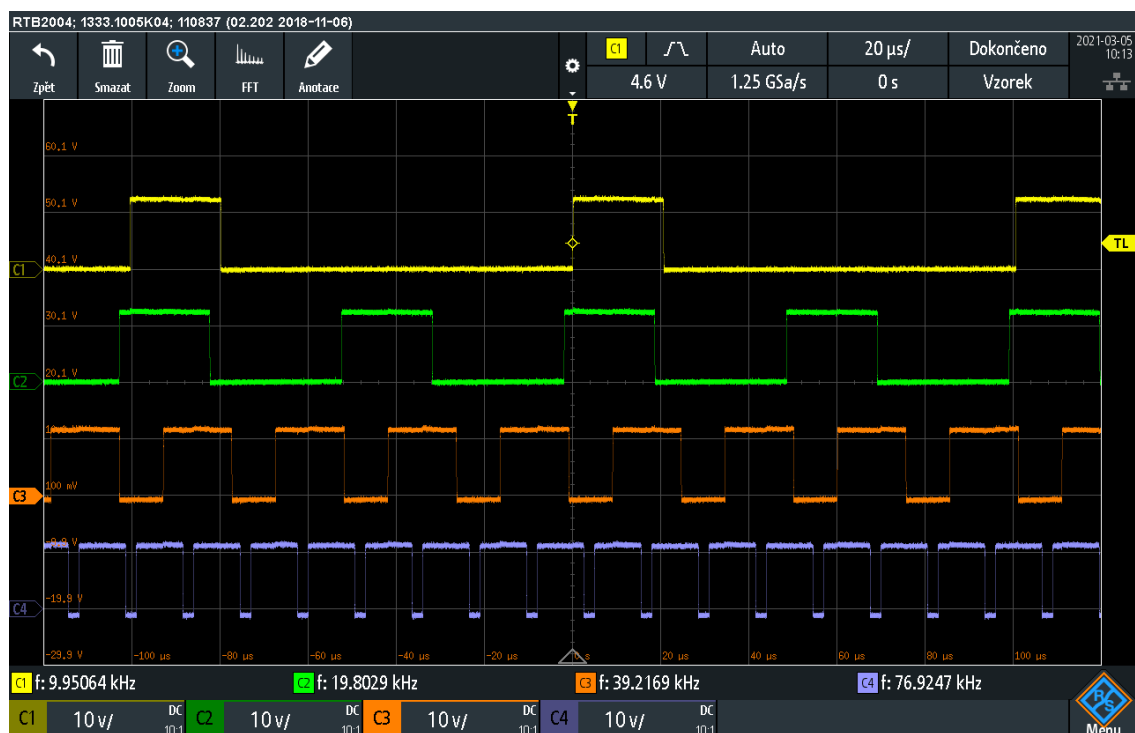
Obr. 4.49: Vyrobená a naprogramovaná karta PWM vstupů a výstupů.

Prahová hodnota se nastavuje skrze D/A převodník uvnitř PSoC mikrokontroléru. Prahovou hodnotu lze nastavit společně pro první a druhý kanál a společně

pro třetí a čtvrtý kanál. Nastavitelný napájecí zdroj je také řízený digitálně přes MODBUS zprávu. Skutečně nastavená hodnota se měří A/D převodníkem v PSoC mikrokontroléru.

4.6.4 Ověření vlastností PWM vstupů a výstupů

Generování výstupního PWM signálu je při použití PWM bloků problematické. Při využití všech UDB bloků a bloků daných pro konkrétní funkci na celé kartě bylo nutné tři PWM výstupy použít jako 16-bitové a jeden jako 8-bitový. Nižší rozlišení pak dává i menší možnosti nastavení střídy signálu. Dalším problémem je skutečnost, že při volbě frekvence PWM výstupu je určena i maximální hodnota rozlišení pro nastavení střídy. Pro vysokou frekvenci pak lze volit střídu jen v omezeném počtu kroků a s nízkým rozlišením v celém rozsahu do 100 %.



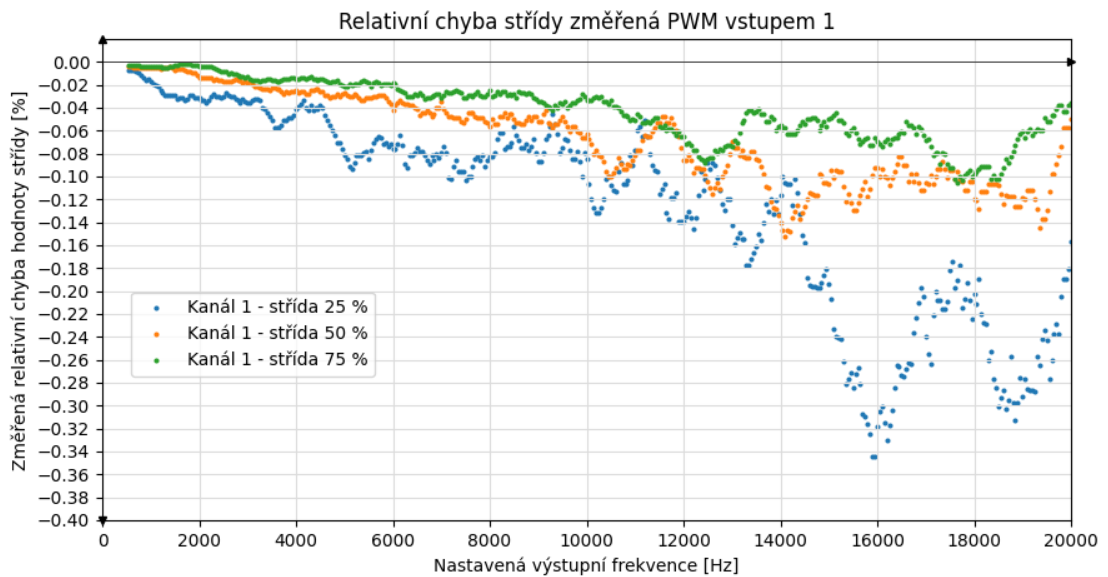
Obr. 4.50: Výstupní kanály nastavené na dané frekvence a střídy popsané v tabulce 4.15, zobrazené na osciloskopu.

Ověření nastavené frekvence a střídy bylo provedeno pomocí osciloskopu Rohde & Schwarz RTB2004. Na každém kanále byla nastavena daná výstupní frekvence a střída, dle uvedení v tabulce 4.15. Na výstupních kanálech bylo nastaveno napětí 12 V. Na všech kanálech byl nastavený režim Push-Pull. Výstupní signály byly měřeny osciloskopem a jsou zobrazeny na obrázku 4.50. Původní naměřená data jsou přiložena v elektronické příloze A.

Tab. 4.15: Změřené hodnoty frekvence a střídy PWM výstupů pomocí osciloskopu.

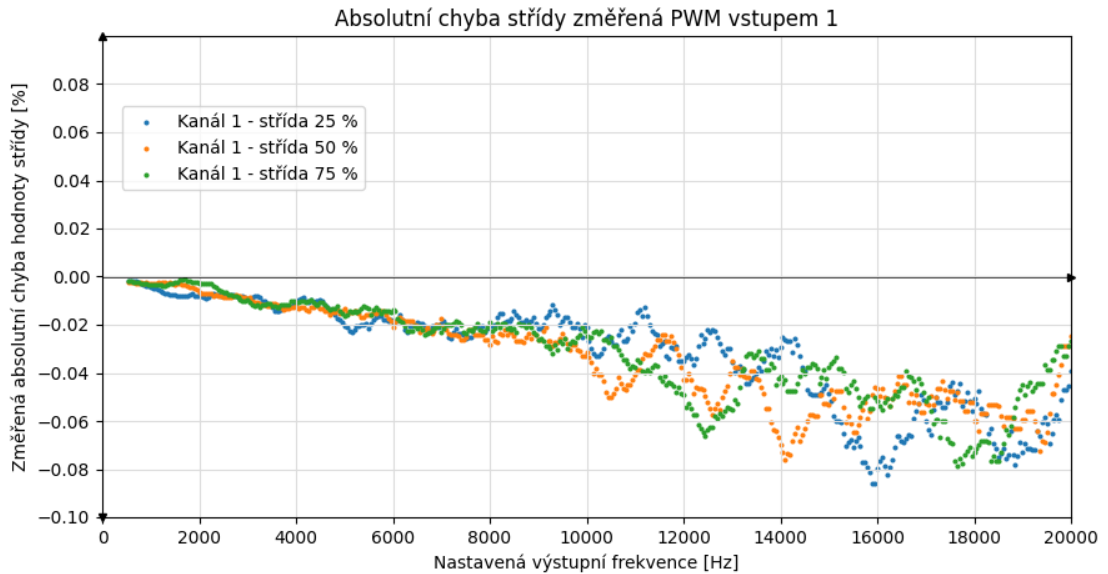
Kanál	Frekv. nastavená [Hz]	Střída [%]	Frekvence změřená [Hz]	Střída [%]
CH1	10000	20	9950,64	20,49
CH2	20000	40	19802,9	40,77
CH3	40000	60	39216,7	61,13
CH4	80000	80	76924,7	80,98

Vstupní PWM kanály mají podobný problém jako výstupní PWM kanály z důvodu nedostatku UDB bloků a bloků pro danou funkci. První dva vstupní kanály obsahují dva 24-bitové čítače, další dva vstupní kanály kvůli nedostatku prostředků dva 16-bitové čítače. Pro měření signálů s frekvencemi ve stovkách Hz jsou však tyto vstupní PWM kanály dostatečně přesné a schopné. Minimální měřitelná frekvence je 2 Hz (nastavena je kvůli detekci odpojeného nebo neměnného signálu). Měření chyby změřené střídy, oproti střídě nastavené, proběhlo za pomoci Python skriptu, který řídil nastavení frekvence a střídy generátoru Tektronix AFG3102 a prováděl vyčítání změřené frekvence a střídy z PWM karty.



Obr. 4.51: Relativní chyba hodnoty střídy nastavená generátorem Tektronix AFG 3022 a změřená pomocí PWM vstupů.

Na obrázku 4.51 je zobrazena relativní chyba při měření střídy vstupním PWM kanálem 1, kde až po frekvenci 20 kHz není odchylka větší než 0,35 %. Nejhorší případ nastal při nízké hodnotě střídy, a to při 16 kHz. Na obrázku 4.52 je zobrazena chyba při měření střídy vstupním PWM kanálem 1 v absolutních hodnotách.



Obr. 4.52: Absolutní chyba hodnoty střídání nastavená generátorem Tektronix AFG 3022 a změřená pomocí PWM vstupů.

4.6.5 Přehled MODBUS registrů

Stav jednotlivých PWM vstupů a nastavení PWM výstupů se čte/nastavuje za pomoci MODBUS paketů. Přehled registrů pro práci s digitálními potenciometry je v tabulkách 4.16 a 4.17.

Vyčítání i zápis mohou mít společný registr, avšak rozdílný funkční kód. Hodnotou je buď 16-bitové číslo (stav výstupů, Push-Pull mód, nebo stav napájecího zdroje), nebo číslo s plovoucí desetinnou čárkou (float - prahová hodnota vstupu, frekvence a střída pro vstupy a výstupy).

4.6.6 Zapojení konektorů

V tabulce 4.18 je vidět zapojení konektorů pro kartu PWM vstupů a výstupů. Oba konektory jsou typu Molex Mini-Fit o dvou řadách po čtyřech pinech. První číslo v buňce je číslo pinu na konektoru, za ním se nachází označení vstupu (PWM_IN) nebo výstupu (PWM_OUT) a za pomlčkou o který z pinů se jedná. Označení vstupu/výstupu 2 je označení pro kladnější vstup, označení 1 pro zápornější.

Tab. 4.16: Přehled registrů a funkčních kódů pro ovládání karty PWM výstupů.

Popis příkazu	Funkční kód čtení/zápisu	Registr
Přečíst/nastavit frekvenci výstupu CH1	0x03 / 0x10	0x0410
Přečíst/nastavit frekvenci výstupu CH2	0x03 / 0x10	0x0411
Přečíst/nastavit frekvenci výstupu CH3	0x03 / 0x10	0x0412
Přečíst/nastavit frekvenci výstupu CH4	0x03 / 0x10	0x0413
Přečíst/nastavit střidu výstupu CH1	0x03 / 0x10	0x0414
Přečíst/nastavit střidu výstupu CH2	0x03 / 0x10	0x0415
Přečíst/nastavit střidu výstupu CH3	0x03 / 0x10	0x0416
Přečíst/nastavit střidu výstupu CH4	0x03 / 0x10	0x0417
Přečíst/nastavit Push-Pull mód CH1	0x03 / 0x06	0x0418
Přečíst/nastavit Push-Pull mód CH2	0x03 / 0x06	0x0419
Přečíst/nastavit Push-Pull mód CH3	0x03 / 0x06	0x041A
Přečíst/nastavit Push-Pull mód CH4	0x03 / 0x06	0x041B
Přečíst napětí DC/DC zdroje	0x03 / -	0x041C
Nastavit napětí DC/DC zdroje	- / 0x10	0x041D
Přečíst/nastavit stav DC/DC zdroje	0x03 / 0x06	0x041E
Přečíst/nastavit stav výstupu CH1	0x03 / 0x06	0x0420
Přečíst/nastavit stav výstupu CH2	0x03 / 0x06	0x0421
Přečíst/nastavit stav výstupu CH3	0x03 / 0x06	0x0422
Přečíst/nastavit stav výstupu CH4	0x03 / 0x06	0x0423

Tab. 4.17: Přehled registrů a funkčních kódů pro ovládání karty PWM vstupů.

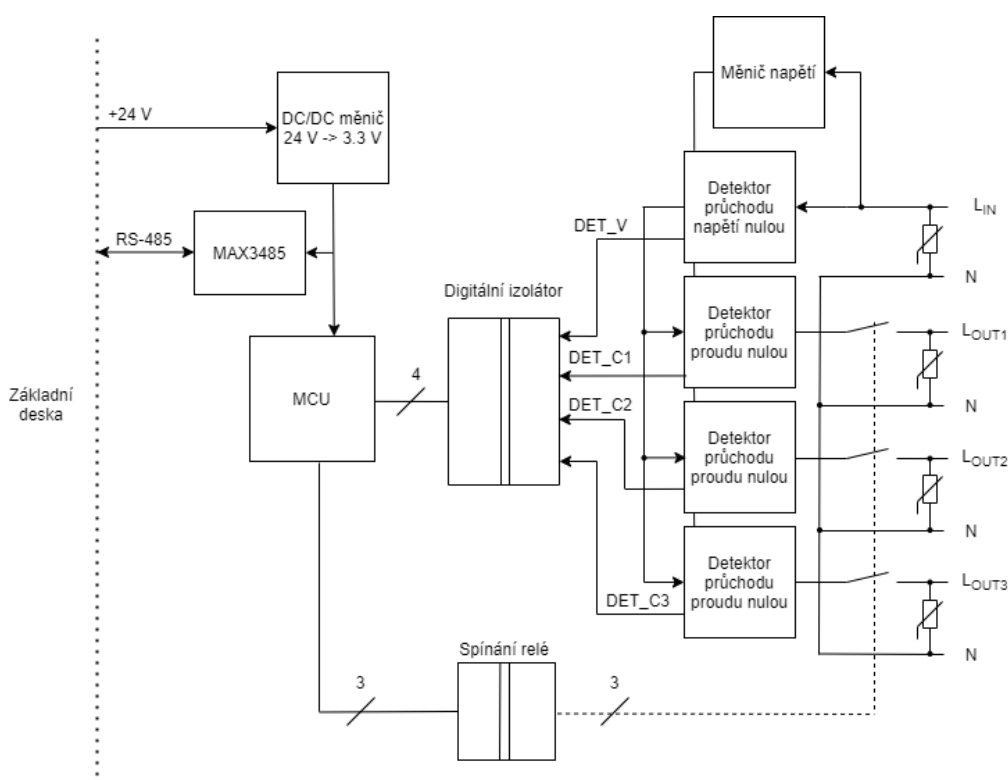
Popis příkazu	Funkční kód čtení/zápisu	Registr
Přečíst frekvenci vstupu CH1	0x03 / -	0x0400
Přečíst frekvenci vstupu CH2	0x03 / -	0x0401
Přečíst frekvenci vstupu CH3	0x03 / -	0x0402
Přečíst frekvenci vstupu CH4	0x03 / -	0x0403
Přečíst střidu vstupu CH1	0x03 / -	0x0404
Přečíst střidu vstupu CH2	0x03 / -	0x0405
Přečíst střidu vstupu CH3	0x03 / -	0x0406
Přečíst střidu vstupu CH4	0x03 / -	0x0407
Přečíst/nastavit prahovou hodnotu CH1 a CH2	0x03 / 0x10	0x0408
Přečíst/nastavit prahovou hodnotu CH3 a CH4	0x03 / 0x10	0x0409

Tab. 4.18: Přehled výstupů na konektorech.

X8			
4: PWM_IN1-1	3: PWM_IN2-1	2: PWM_IN3-1	1: PWM_IN4-1
8: PWM_IN1-2	7: PWM_IN2-2	6: PWM_IN3-2	5: PWM_IN4-2
X5			
4: PWM_OUT1-1	3: PWM_OUT2-1	2: PWM_OUT3-1	1: PWM_OUT4-1
8: PWM_OUT1-2	7: PWM_OUT2-2	6: PWM_OUT3-2	5: PWM_OUT4-2

4.7 Karta pro napájení DUT

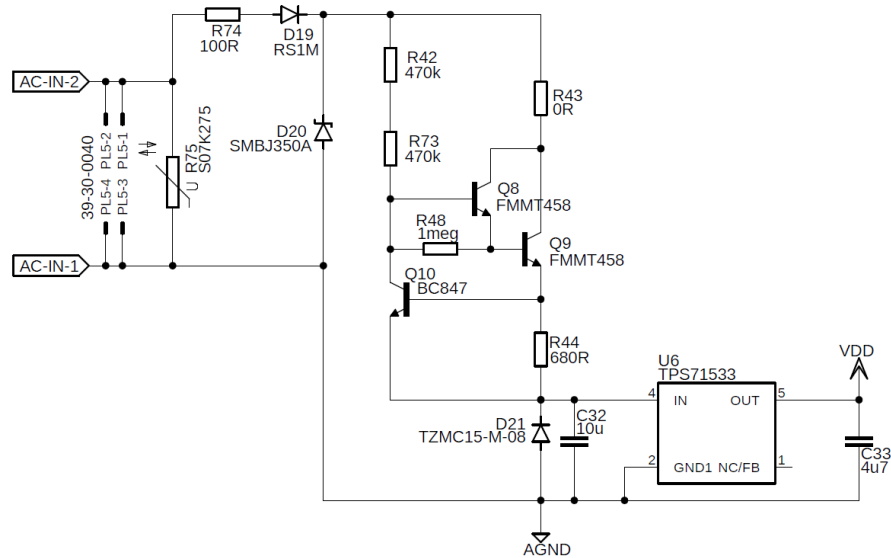
Řídicí jednotky často využívají připojené periférie, které mají větší proudový odběr, jako jsou ventilátory, elektromagnetické ventily, termostaty a čerpadla. Protože je nutné testované zařízení napájet, byla pro tento důvod vytvořena karta pro napájení testovaného zařízení (DUT). Základní vlastností karty pro napájení DUT by mělo být spínání střídavého napětí 24 V až 230 V při nulovém napětí a rozpínání střídavého napětí při nulovém proudu, kvůli špičkám při spínání komplexní zátěže, které vedou ke snížení spolehlivosti kontaktu relé. Požadovaný maximální spínaný proud by měl být okolo hodnoty 4 A (střední proud, uvažovaný z důvodu tepelných ztrát).



Obr. 4.53: Blokové schéma karty pro napájení DUT.

Karta je postavena na dvou základních blocích. Blok pro detekci průchodu vstupního napětí nulou a blok pro detekci procházejícího proudu nulou. Zvolena byla koncepce využití vstupního napětí pro napájení izolované strany detekce napětí a proudu. Celá detektorová část proto musí být nízkopříkonová, aby byl snížen ztrátový výkon napájecího obvodu. S těmito požadavky je nutné brát ohled i na digitální izolátor, který poslouží pro galvanicky oddělený přenos signálu mezi detektorem průchodu napětí nulou, detektory průchodu proudu nulou a mikrokontrolérem. Celé blokové schéma je zobrazeno na obrázku 4.53. Vstupní střídavé napětí připojené na vstup

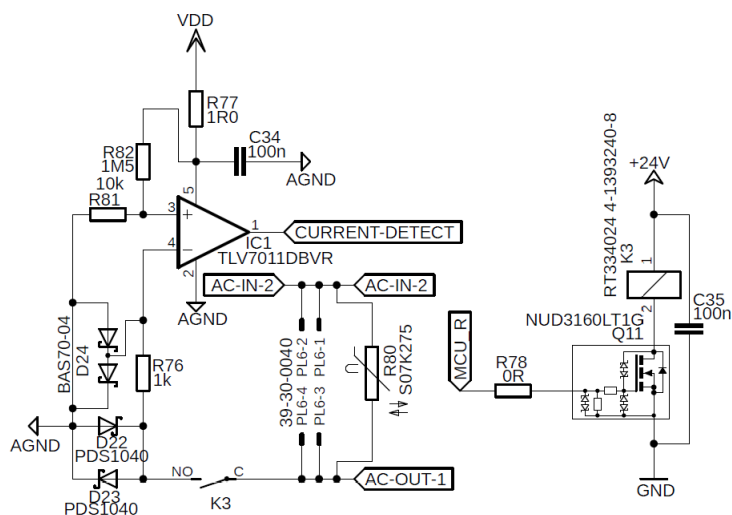
L_{IN} napájí měnič napětí s proudovou limitací, ten poté napájí bloky detektorů průchodu napětí/proudu nulou. Výstupy detektorů DET_V, DET_C1 až DET_C3 jsou připojeny na vstupy digitálního izolátoru. Výstupy L_{OUT1} až L_{OUT3} jsou spínány pomocí relé tak, aby dokázaly připojit nebo odpojit zátěž.



Obr. 4.54: Zapojení napájecího zdroje s proudovým zdrojem pro detektory průchodu napětí nulou a průchodu proudu nulou.

Aby mohla detekční část pracovat, musí být napájena, a o to se stará stabilizátor napětí s integrovaným obvodem TPS71533 [72] zobrazený na obrázku 4.54. V zapojení je mu předřazen proudový zdroj, který je použitý na kartě digitálních vstupů. Proudový zdroj řídí proud do kondenzátoru C32 s hodnotou $10 \mu\text{F}$ až do Zenerova napětí diody D21 se Zenerovým napětím 15 V. Nabíjení kondenzátoru C32 probíhá pouze v kladné půlčlenně vstupního napětí a zdroj proudu zároveň napájí stabilizátor napětí. V záporné půlčlenně se o napájení stabilizátoru stará pouze kondenzátor C32.

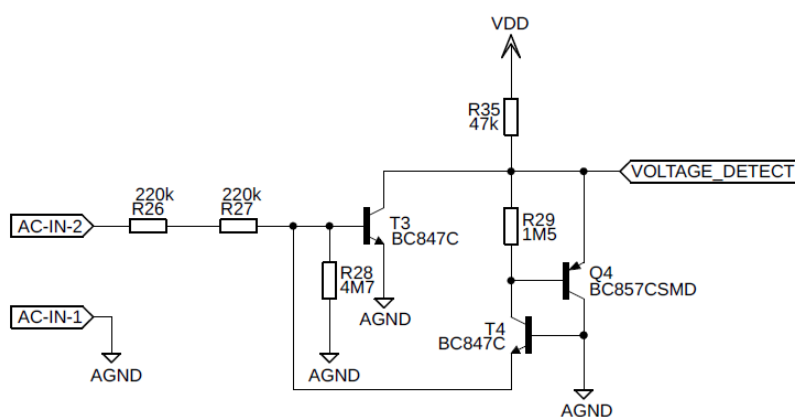
Detektor průchodu proudu nulou ve schématu na obrázku 4.55 je postaven na nízkopříkonovém komparátoru TLV7011, který měří úbytek napětí na Schottkyho diodách [73], podle aplikačních poznámek SNOA999 firmy Texas Instruments [74]. Úbytek napětí musí přesáhnout vstupní hysterezi komparátoru. Vybrané diody PDS1040 mají výrobcem deklarovaný maximální úbytek napětí při proudu 10 A o hodnotě 0,51 V [75]. Detektor by měl reagovat už na nižší průchozí proud, který je nastaven děličem napětí tvořeným rezistory R76 a R79 ve schématu na obrázku 4.54. Komparátor se vstupní hysterezí maximálně 14 mV se po přesáhnutí hodnoty hystereze mezi vstupními svorkami překlopí. Dioda D24 je pouze ochranná dioda. O vstupní offset se stará rezistor R82. Při detekování úbytku napětí na diodách se přepne výstup komparátoru při kladné periodě vstupního napětí do logické 0.



Obr. 4.55: Zapojení jednoho kanálu detektoru procházejícího střídavého proudu s komparátorem TLV7011 [73].

Je nutno zohlednit, že fáze vstupního signálu je připojena na AGND a je vůči ní vztaženo i napájecí napětí VDD tvořené napájecím obvodem na obrázku 4.54.

Výstup je spínán pomocí relé RT334024, které dokáže spínat proud až 16 A [76]. Reálně tedy bude možné s ním spínat proudy maximálně 4 A (kvůli dostatečnému předdimenzování a ztrátovému výkonu na Schottkyho diodách). Řízení spínání je zajištěno pomocí budiče induktivní zátěže NUD3160 [77]. Budič obsahuje vnitřní rezistory pro řízení. Díky vnitřní diodové struktuře dokáže vybit energii induktivní zátěže a zajistit tak bezproblémové rozpojení, podobně jako serio-paralelní budič TPIC6C595 [51]. Na vstupu i výstupech se pro případnou ochranu před napěťovými špičkami ze vstupní nebo výstupní strany osazují varistory S07K275 [78].

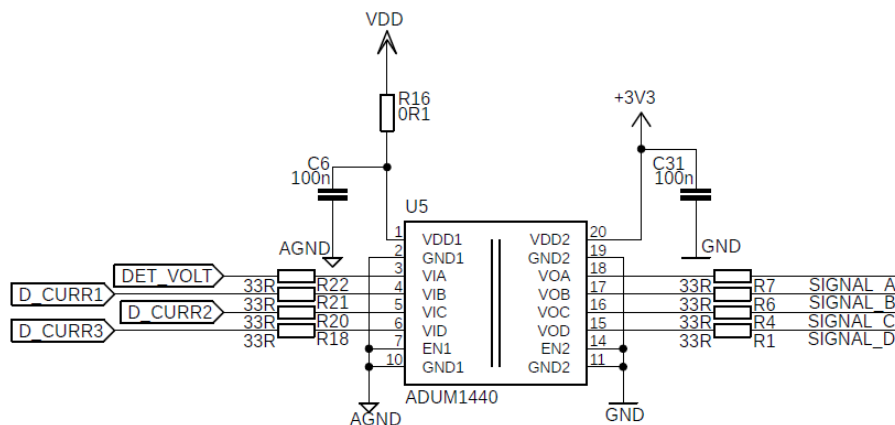


Obr. 4.56: Zapojení detektoru průchodu napětí nulou.

Detektor průchodu napětí nulou je postaven na základě zapojení projektu zero-

cross detektoru v článku „ANOTHER ZERO-CROSSING DETECTOR“ na webových stránkách *Nuts and Volts* [79]. Jeho schéma se nachází na obrázku 4.56. Narozdíl od detektoru průchodu proudem nulou se detektor průchodu napětí nulou skládá pouze z bipolárních tranzistorů BC847C a BC857C. Koncovka C označuje vysokou hodnotu zesílení beta v rozsahu od 420 do 800 pro oba druhy tranzistorů, což je pro funkci v tomto obvodu důležité.

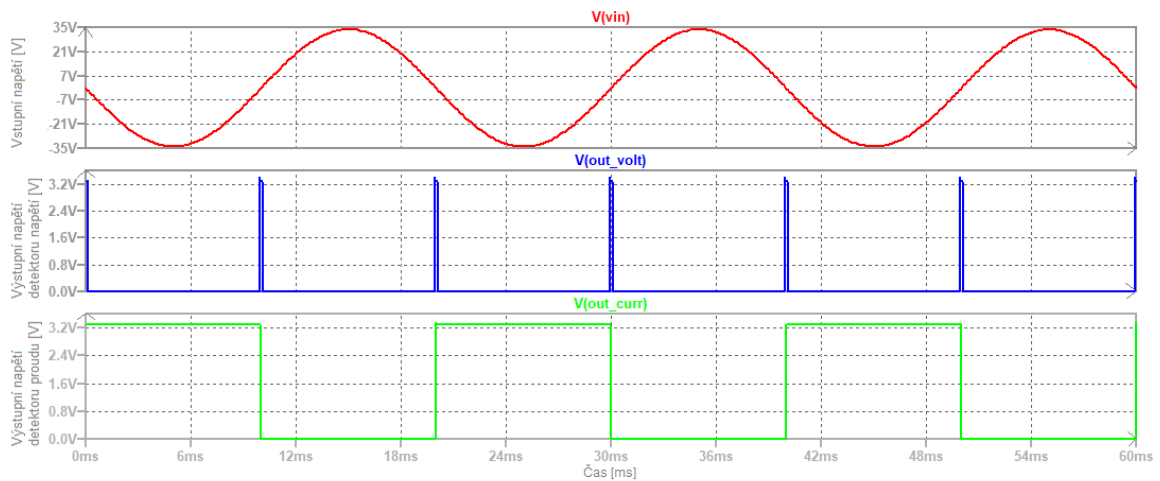
Přechody báze-emitor tranzistorů T3 a T4 jsou v antiparalelním zapojení. Fáze je opět připojena na AGND. Proud vstupního signálu omezují rezistory R26 a R27, které společně s rezistorem R28 vytváří dělič napětí. Při kladné půlplně vstupního napětí se na rezistoru R28 objeví napětí 600 mV a při záporné půlplně napětí -600 mV. Jedná se o úbytek napětí na přechodu báze-emitor. Na bázi tranzistoru Q4 se při přepínání objeví puls, který dosahuje napětí dané Pull-up rezistorem R35 a v druhé půlplně záporného napětí s hodnotou -600 mV. Protože by záporné napětí mohlo zničit vstup digitálního izolátoru, posouvá ho tranzistor Q4 na nulovou hodnotu napětí. Rezistor R29 pak vytváří vazbu mezi výstupem a vytvořeným pulsem.



Obr. 4.57: Zapojení digitálního izolátoru pro přenos detekčních pulsů.

Izolátor ADuM1440 je nízkopříkonový digitální izolátor [80]. Účelem izolátoru je přenos signálů z detektorů přes galvanické oddělení do části s mikrokontrolérem. Výhodou izolátoru je vestavěná hystereze při komparaci pulsů z detektorů, která zajistí odstranění zákmitů. Zároveň izolátor snižuje čas náběhu a sestupu výstupní hrany detektorů, které jsou jinak velmi zaoblené vzhledem k parazitním kapacitám. Izolátor má maximální vstupní napájecí proud $5,6 \mu\text{A}$ na kanál, což skvěle splňuje požadavky na nízký příkon [75].

Zapojení izolátoru je ve schématu na obrázku 4.57. Vstup DET_VOLT označuje výstup detektoru průchodu napětí nulou, ostatní vstupy D_CURR1 až D_CURR3



Obr. 4.59: Výsledky simulace detektoru průchodu napětí nulou a detektor průchodu proudu nulou pro vstupní signál s napětím 24 V střídavých a průchozím proudem 100 mA.

4.7.2 Ověření simulace detektorů průchodu napětí nulou a průchodu proudu nulou

Simulovaný návrh bylo nutné otestovat v reálném zapojení na reálných součástkách. Jako zátěž pro sepnutý kanál s detektorem průchodu proudu nulou byl využit reostat nastavený na $240\ \Omega$ při napětí 24 V střídavých. Průchozí proud byl nastavený na 100 mA a zajistil tak stejné podmínky jako zátěž v simulaci.

Přestože simulace byla stabilní, došlo v reálném zapojení k častému rozkmitávání výstupu detektoru průchodu proudu nulou. Chyba se objevovala při odpojení zátěži a při vstupním napětí nad 100 V střídavých. Tento problém nastal nejspíš kvůli zápornému vstupu komparátoru, který má vstup ve stavu vysoké impedance (nepřipojený k potenciálu AGND) a vodič k tomuto vstupu funguje tedy spíše jako anténa. Rušení pak překoná hodnotu hystereze komparátoru a vyvolá falešnou detekci proudu.

Jakékoliv rušení, které se na vstupu zachytilo, pak způsobilo rozkmitání komparátoru. Výstup detektoru průchodu proudu nulou poté vypadal jako na obrázku 4.60.

4.7.3 Řešení problému s nestabilním detektorem průchodu proudu nulou

Problém s nestabilním detektorem průchodu proudu nulou byl vyřešen připojením dvou kondenzátorů, změnou hodnoty jednoho rezistoru a přidáním dalšího rezistoru. Rezistor, který je nutné přidat, je ve schématu na obrázku 4.61 jako R79 s hodnotou $10\ \text{k}\Omega$ a je nutné ještě změnit hodnotu rezistoru R76 na hodnotou $20\ \text{k}\Omega$. Sériou

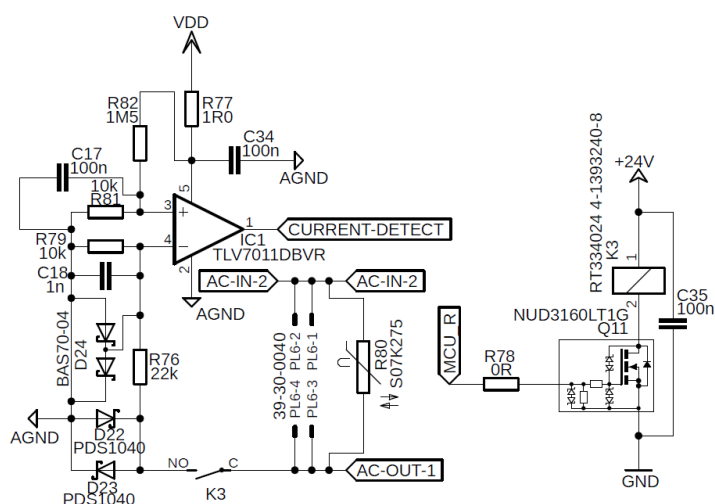


Obr. 4.60: Nestabilní detekce průchozího proudu při odpojené zátěži a s připojeným napájením.

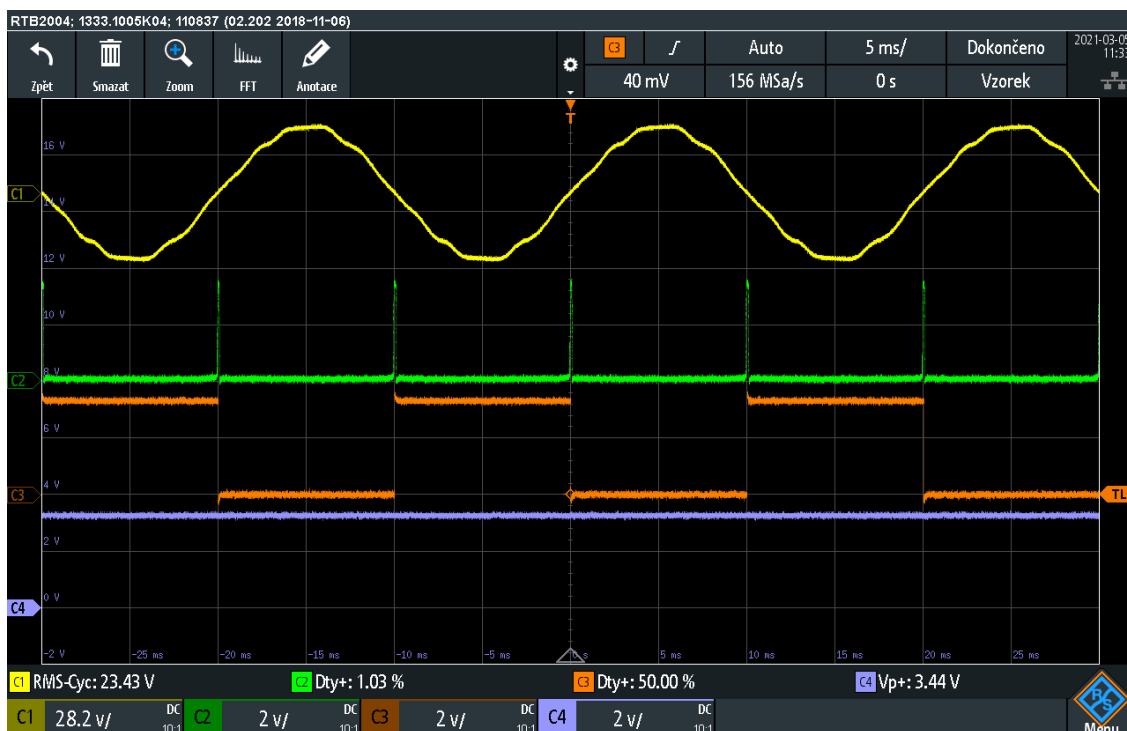
vou kombinací rezistorů R76 a R79 je vytvořen dělič napětí, který dostatečně sníží vstupní impedanci komparátoru a zvýší tak odolnost proti rušení. Zároveň pro zajištění stability při změnách stavu je nutné přidat kondenzátory s hodnotou 1 nF paralelně k rezistoru R79 a kondenzátor s hodnotou 100 nF paralelně k rezistoru R81.

Výsledným zapojením těchto prvků, jak je vidět v obvodu na obrázku 4.61, se zajišťuje stabilita komparátoru a obvod bude fungovat správně. Ukázka správné funkce je zobrazena na obrázku 4.62, kde se v horní části nachází žlutý průběh vstupního napětí, níže zelený průběh je výstup detektoru průchodu napětí nulou, pod ním oranžový průběh je výstup detektoru průchodu proudem nulou a nejnižší světle modrý průběh je výstup měniče napětí s integrovaným obvodem TPS71533.

Výstup detektoru průchodu napětí nulou má velmi úzký puls. Změřený osciloskopem při vstupním napětí 24 V střídavých dosahuje šířky 128 μs (to přibližně odpovídá střídě s hodnotou 1 %). Při napětí 230 V střídavých se šířka pulsu pohybuje okolo 17 μs). Malou nevýhodou je zúžení šířky pulsu při zvyšujícím se vstupním napětím. Izolátor je ale dostatečně rychlý a zvládne puls bez problému přenést. Detektor průchodu proudem nulou má stejně tak stabilní puls se střídou 50 %. Podle simulace je hodnota minimálního proudu, který detektor snímá, 3 μA . Snímek byl vytvořen osciloskopem Rohde & Schwarz RTB2004. Minimální napětí pro spuštění napájecího zdroje a všech detektorů s izolátorem je 3,61 V střídavých. Doporu-



Obr. 4.61: Zapojení opraveného kanálu detektoru procházejícího střídavého proudu s komparátorem TLV7011.



Obr. 4.62: Normální funkce detektorů při připojené zátěži s protékajícím proudem 100 mA a při napájecím napětí 24 V střídavých.

čené napětí pro správnou funkci je 5 V střídavých. Minimální proud, který je zařízení schopné detekovat, se pohybuje okolo $100 \mu\text{A}$. Minimální hodnota proudu, kterou je zařízení schopné detekovat, je vyšší než simulace kvůli zapojení děliče napětí pro snížení vstupní impedance komparátoru. Citlivost detekce je tedy snížena, ale za cenu zvýšené stability detektoru průchodu proudu.

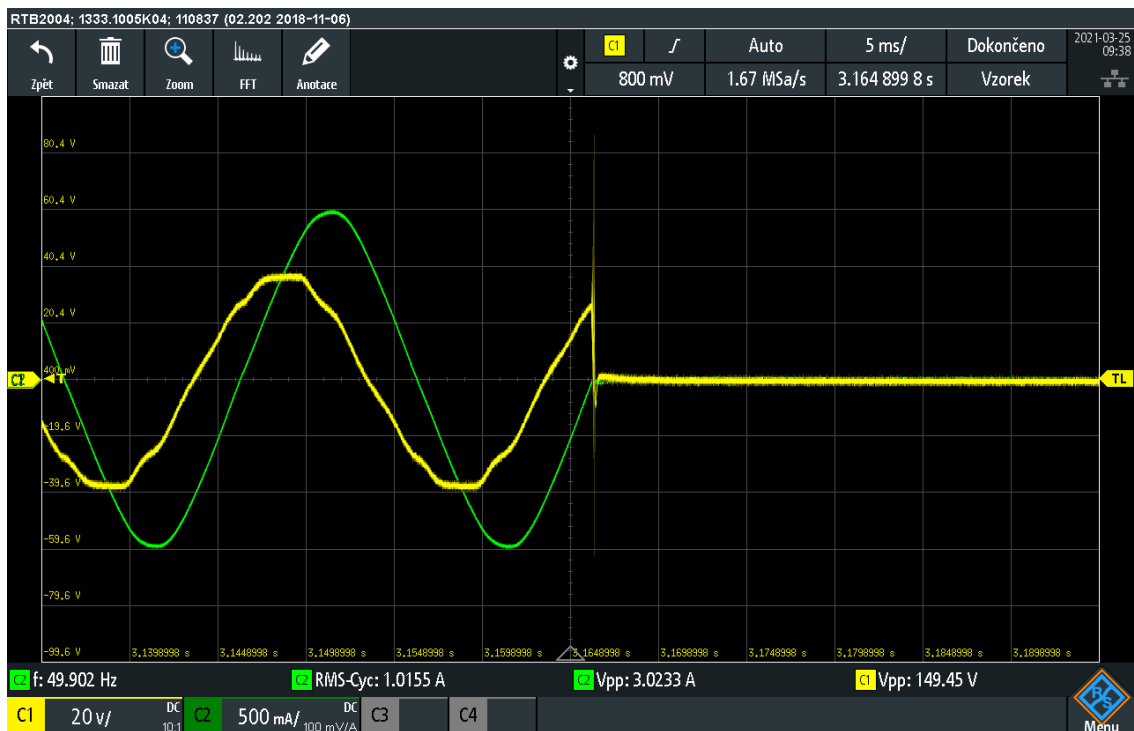
4.7.4 Ověření sepnutí a rozeptnutí výstupů

Na obrázku 4.63 se nachází snímek z osciloskopu, na kterém je vidět sepnutí výstupního kanálu. Osciloskop měl na prvním kanálu (vyznačeno žlutou křivkou) připojené výstupní napětí a na druhém kanálu (vyznačeno zelenou křivkou) výstupní proud. Sepnutí při nulovém napětí proběhlo se zpožděním přibližně 0,5 ms (což mohlo být způsobeno nestabilní dobou sepnutí relé).



Obr. 4.63: Průběh sepnutí výstupního kanálu při nulovém napětí zachycený osciloskopem.

Spínání výstupního napětí bylo provedeno se vstupním napětím 24 V střídavých a s komplexní zátěží tvořenou induktorem (53 mH) a rezistorem (17Ω) v sérii. Proud zátěží tak dosahoval hodnoty 1 A. Doby sepnutí a rozeptnutí relé byly zjištěny pomocí osciloskopu. Doba sepnutí byla změřena s hodnotou 6 ms a doba rozeptnutí s hodnotou 2,6 ms. Pro správné sepnutí a rozeptnutí v nule bylo nutné dobu rozeptnutí a sepnutí kompenzovat firmwarem.



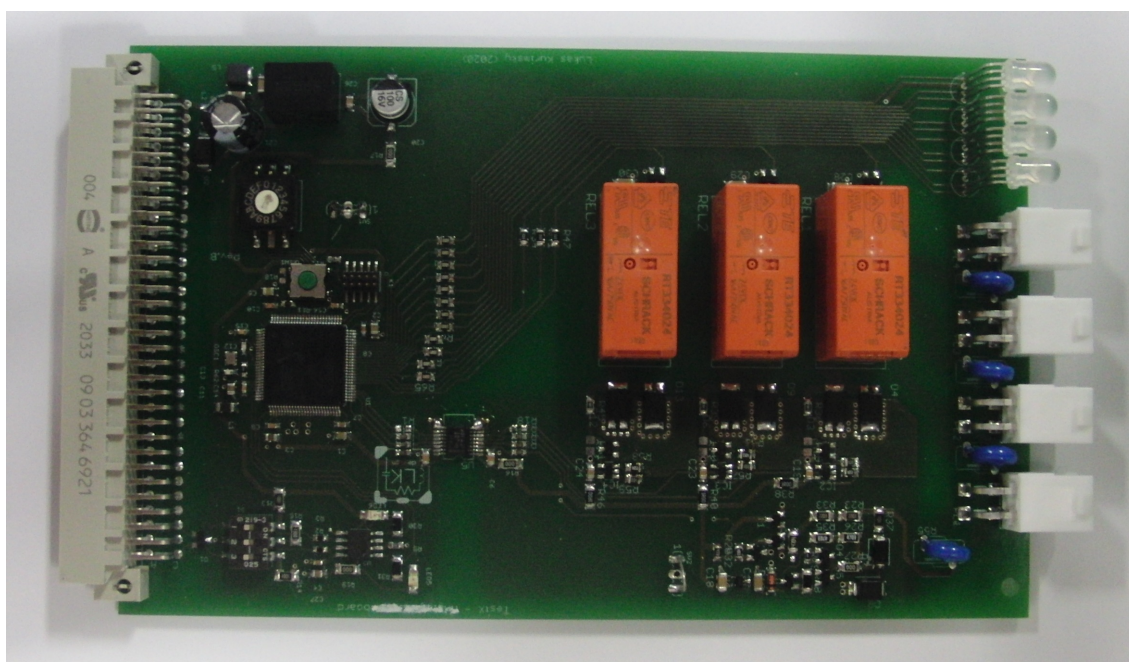
Obr. 4.64: Průběh rozepnutí výstupního kanálu při nulovém proudu zachycený osciloskopem.

Na obrázku 4.64 je vidět rozepnutí výstupního kanálu. Zátěž výstupního kanálu a osciloskop byly připojené stejně jako při předchozím měření. K rozepnutí došlo okamžitě při průchodu proudu nulou. Doba pro rozepnutí musela být firmwarem upravena tak, aby došlo ke kompenzaci doby rozpojení relé. Prodleva rozpojení je nastavena na hodnotu 2,6 ms. Oba snímky byly vytvořeny osciloskopem Rohde & Schwarz RTB2004.

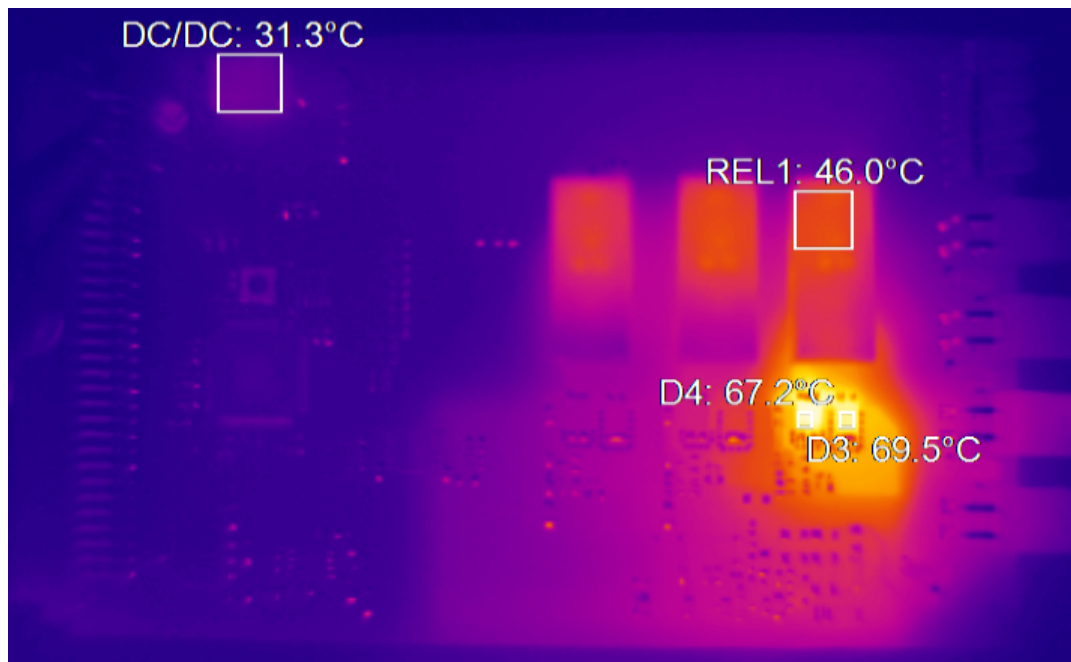
4.7.5 Výsledná karta pro napájení DUT

Výsledná karta je zobrazena na obrázku 4.65. Na kartě se nachází tři výstupní kanály s detektory průchodu proudu nulou a detekce průchodu napětí nulou. Kanály snesou zatížení proudem až 4 A. Na desce se nacházejí celkem čtyři konektory. První konektor je pro připojení vstupního napětí a další tři konektory jsou pro jednotlivé ovládané výstupy.

LED diody na kartě ukazují stav vstupního napětí a jednotlivých kanálů. LED dioda nejbližší konektorům ukazuje buď červeně nepřítomnost vstupního napětí, nebo zeleně přítomnost vstupního napětí. Další tři LED diody, každá pro jeden kanál, ukazují stav výstupu. Červeně svítí LED dioda při odpojeném výstupu, modře při sepnutém výstupu bez protékajícího proudu a zeleně při sepnutém stavu s pro-



Obr. 4.65: Vyrobená a naprogramovaná karta pro napájení DUT.



Obr. 4.66: Snímek z termokamery při připojení protékajícího proudu 4 A přes detektor proudu.

tékajícím proudem. Stav po zapnutí, kdy je vstupní napětí nízké, se projevuje červenou barvou na LED diodě pro detekci vstupního napětí (nejblíže konektorům) a fialovou na jednotlivých výstupech (ty nejsou sepnuté, dokud vstupní napětí není vyšší než minimální napětí 3,61 V).

Na obrázku 4.66 se nachází snímek z termokamery, na kterém je vidět výstup, kterým prochází proud s hodnotou 4 A. Po ustálení byla na Schottkyho diodách naměřena teplota okolo 70 °C, což pro funkci plně vyhovuje.

4.7.6 Přehled MODBUS registrů

Stav jednotlivých výstupních kanálů se nastavuje za pomoci MODBUS paketů. Přehled registrů pro práci s nastavením výstupů je zobrazen v tabulce 4.19. Vychytání i zápis mohou mít společný registr, avšak rozdílný funkční kód. Hodnotou je vždy 16-bitové číslo, kde bit 2 definuje výstupní kanál 3 a postupně dále bit 0 označuje výstupní kanál 1.

Tab. 4.19: Přehled registrů a funkčních kódů pro ovládání karty pro napájení DUT.

Popis příkazu	Funkční kód čtení/zápisu	Registr
Přečíst/nastavit stav výstupu	0x03 / 0x06	0x0501
Sepnout daný výstup	- / 0x06	0x0502
Rozepnout daný výstup	- / 0x06	0x0503

4.7.7 Zapojení konektorů

V tabulce 4.20 je vidět zapojení konektorů pro kartu pro napájení DUT. Všechny čtyři konektory jsou typu Molex Mini-Fit o dvou řadách po dvou pinech. První číslo v buňce je číslo pinu na konektoru, za ním se nachází označení vstupu (L_IN) nebo výstupu (L_OUT). Vstupy N označují nulový vodič (ten je pro všechny konektory spojený).

Tab. 4.20: Přehled výstupů na konektorech.

PL1		PL2		PL3		PL4	
4: L_IN	3: L_IN	4: L_OUT1	3: L_OUT1	4: L_OUT2	3: L_OUT2	4: L_OUT3	3: L_OUT3
2: N	1: N	2: N	1: N	2: N	1: N	2: N	1: N

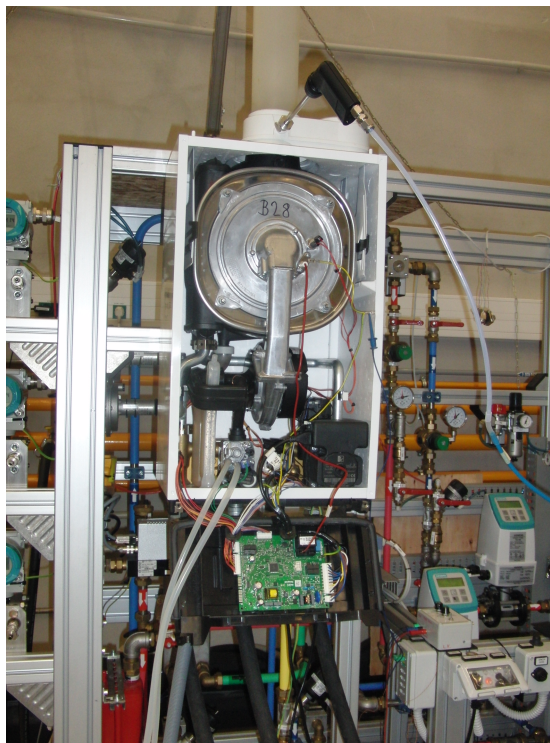
4.8 Karta simulátoru plamene

Poslední a zároveň nejkomplikovanější kartou je karta představující simulátor plamene. Na základě naměřených a ověřených vlastností a na základě daných vstup-

ních parametrů by měla karta simulátoru plamene představovat dostatečnou náhradu elektrických vlastností plamene z pohledu řídicí jednotky. Vstupními parametry, které plamen ovlivňují, je stav plynového ventilu (určuje, zda prochází plyn do systému), otáčky ventilátoru (otáčky ventilátoru určují množství pocházejícího vzduchu, který vstupuje do systému) a poloha škrtkovacího plynového ventilu (určuje množství procházejícího plynu do systému). Tyto parametry ale zasahují až do samotného procesu regulace elektrických vlastností plamene.

4.8.1 Měření vlastností plamene

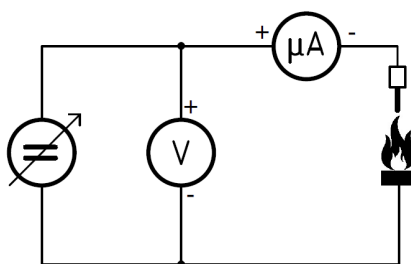
Měření elektrických vlastností plamene spočívá v měření proudu elektrodou plamene při přítomnosti plamene, za pomoci vyššího napětí a měření termionického napětí na samotné elektrodě plamene. Cílem měření a následného vytvoření simulátoru je vytvoření podobných elektrických vlastností daného hořáku (elektrody plamene) tak, aby dokázal simulovat reálnou aplikaci pro řídicí jednotku plynového kotle. Měřené parametry jsou pro daný simulátor ověření topologie podle patentu US9784449B2 [81], který se zabývá systémem pro snímání plamene. Cílem není vytvořit plnohodnotný simulátor plamene, neboť řídicí jednotky měří pouze poměr proudů v propustném a závěrném směru. Svodový proud plamene ve III. kvadrantu jeho voltampérové charakteristiky je přibližně desetkrát až stokrát větší než proud ve směru propustném, a proto není nutné simulovat jeho konkrétní hodnotu.



Obr. 4.67: Zapojení testovaného plynového kotle Bosch Nefit.

Měření bylo provedeno na kotli firmy Bosch, konkrétně na modelu Nefit ProLine NxT HRC 24/CW4. Zapojený kotel byl připojen k testovacímu zařízení Microplan, který se stará o spouštění testovaného systému a jeho celkové ovládání. Do systému byl připojený zemní plyn označený jako G20. Zapojený odkrytovaný plynový kotel se nachází na obrázku 4.67.

Cílem měření bylo změřit voltampérovou charakteristiku plamene. Vybraným způsobem měření se nastavoval proud tekoucí snímací elektrodou (flame rod) při připojeném zdroji napětí. Proud se měřil pomocí digitálního multimetru Fluke 289 na rozsahu do $500 \mu\text{A}$ s maximální chybou 0,05 %. Zdroj napětí připojený pro měření proudu plamenem byl vlastní konstrukce a byl regulovatelný v rozsahu $\pm 350 \text{ V}$. Pro změření celé voltampérové charakteristiky bylo nutné změřit proud na různých hodnotách v kladné polaritě a poté stejným způsobem pro zápornou polaritu. Ověření napětí připojeného na flame rod bylo provedeno pomocí digitálního multimetru Fluke 175. Detekci odchozích spalin a měření hodnot O_2 a CO_2 pro výpočet λ se zabývá sonda v horní části plynového kotle připojená k měřicím přístrojům ULTRAMAT6 a OXYMAT61. Schéma zapojení pro měření voltampérové charakteristiky plamene je na obrázku 4.68

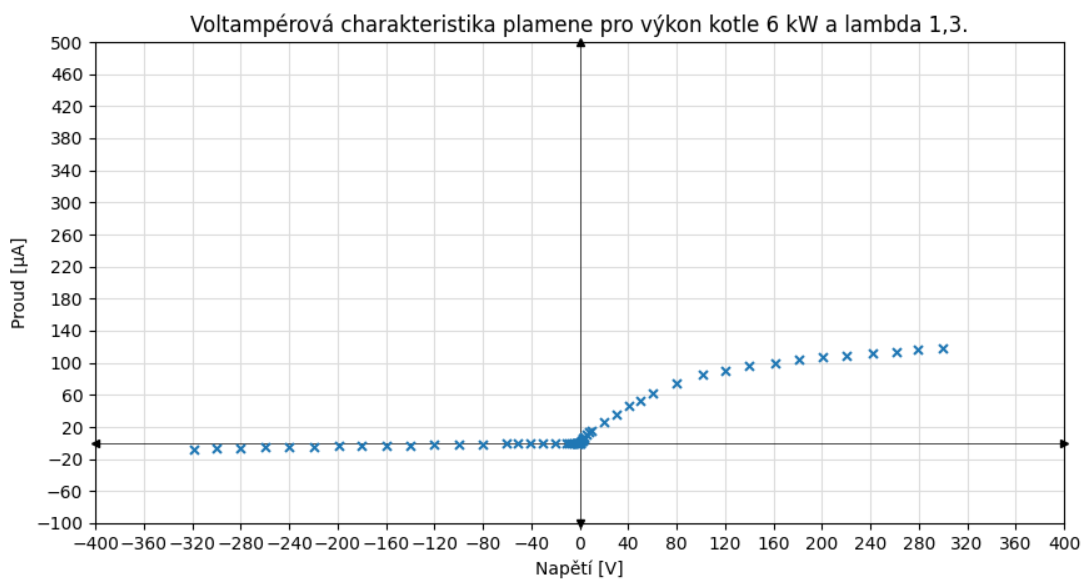


Obr. 4.68: Schéma zapojení pro měření voltampérové charakteristiky plamene.

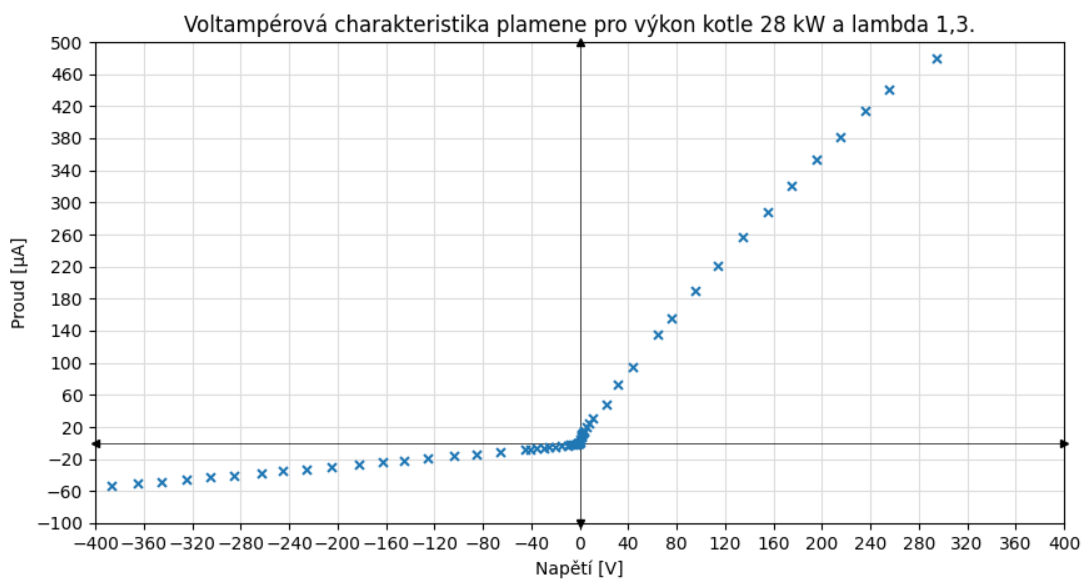
Zdroj napětí pro měření proudu i digitální multimetry jsou napájeny z baterií. Celý měřicí obvod je oddělený od sítě a díky tomu lze měřit voltampérovou charakteristiku plamene bez svodových proudů a minimalizovat tak pronikání síťového rušení a šumu.

Naměřit se podařilo voltampérové charakteristiky pro výkon plynového kotle 6 kW a 28 kW při nastavené hodnotě λ 1,3. Tato hodnota λ by měla představovat typické spalování směsi v plynové komoře.

Voltampérová charakteristika pro výkon 6 kW je zobrazena na obrázku 4.69 a v detailním přiblížení na oblast při průchodu napětí nulou na obrázku 4.71. Pro výkon 28 kW je voltampérová charakteristika zobrazena na obrázku 4.70 a v detailním přiblížení na oblast při průchodu napětí nulou na obrázku 4.72. Při srovnání obou charakteristik lze vidět velký posun charakteristiky v I. kvadrantu.



Obr. 4.69: Voltampérová charakteristika plamene pro výkon kotle 6 kW a lambda 1,3.



Obr. 4.70: Voltampérová charakteristika plamene pro výkon kotle 28 kW a lambda 1,3.

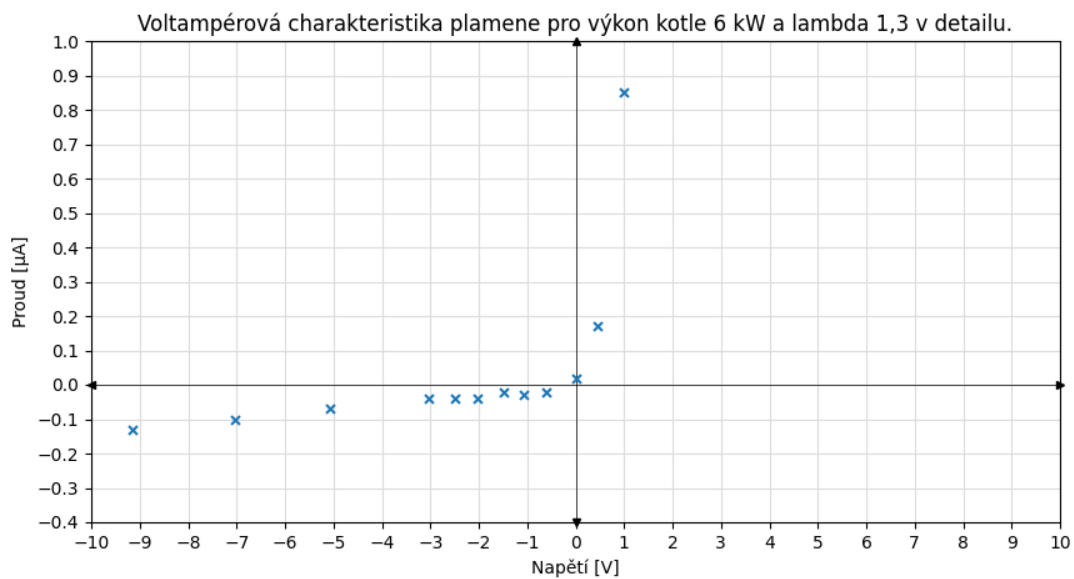
Pro výkon 6 kW je voltampérová charakteristika přibližně do napětí 80 V lineární, poté dosahuje saturace. To si lze vysvětlit velikostí plamene a z toho vyplývajícím malým množstvím iontů. Kvůli tomu již nemá jak docházet k průchodu elektrického proudu, a proto dochází u charakteristiky k postupné saturaci. Dalším faktorem je malá velikost plamene a tím i malá plocha pro styk s elektrodou. Plamenem v závěrném směru (oblast III. kvadrantu) prochází pouze malé množství proudu, které je téměř desetinou oproti proudu ve směru propustném. Na obrázku lze rovněž vidět dva zlomy charakteristiky. Jeden je v oblasti okolo nulového napětí a druhý v oblasti okolo 80 V. Tato charakteristika velmi věrohodně připomíná voltampérovou charakteristiku vakuové diody [82].

Pro výkon 28 kW je lineární oblast voltampérové charakteristiky delší a saturační proud je vyšší, než je tomu u výkonu 6 kW. Opět lze vysvětlit velikost proudu zvýšením počtu nosičů náboje velikostí plamene a styčnou plochou plamene a elektrody. Plamen ve spalovací komoře je již velký a dokáže přenést značně velký proud uzavřeným obvodem. Charakteristika by vypadala podobně jako pro 6 kW výkon kotle, avšak k druhému zlomu by došlo u vyššího napětí. I v závěrném směru došlo k výraznému zvýšení proudu, avšak tento proud je stále přibližně desetinou proudu v propustném směru. V okolí nulového napětí lze vidět, že i při nulovém napětí zdroje protéká elektrodou plamene při uzavřeném obvodu nenulový kladý proud.

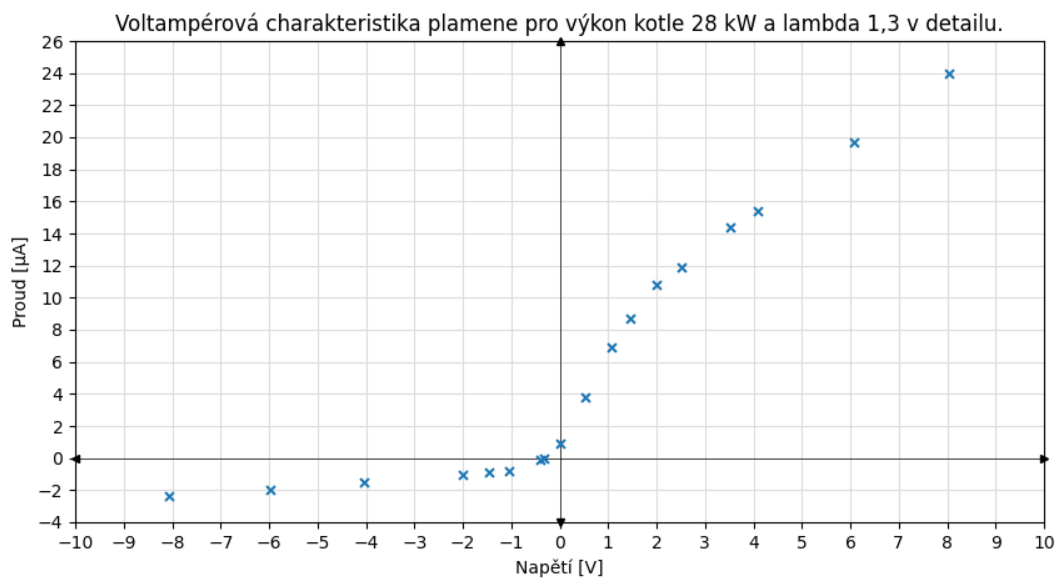
Proud při napětí 0 V byl změřen při výkonu kotle 6 kW s hodnotou $0,02 \mu\text{A}$. Termionické napětí neboli napětí při nulovém proudu pro stejný výkon kotle dosahuje hodnoty -202 mV . Proud při napětí 0 V a při výkonu kotle 28 kW však dosahoval hodnoty $0,9 \mu\text{A}$ a termionické napětí při nulovém proudu hodnoty -320 mV . Měření termionického napětí probíhalo ve stejném zapojení měření, avšak odečítalo se napětí při nastaveném nulovém proudu. Touto metodou tak byla impedance zatěžující plamen vysoká (teoreticky nekonečná) a měřilo se tak skutečné napětí na elektrodě.

Po dohodě s vývojáři firmy Resideo a na základě toho, že řídicí jednotka snímá závěrnou část voltampérové charakteristiky pouze poměrově, bylo rozhodnuto o zjednodušení vyvíjeného simulátoru se zaměřením pouze na propustnou část voltampérové charakteristiky, a to pro měření při napětí od 0 V do přibližně 100 V. V této oblasti by měl simulátor plamene dostatečně simulovat reálné elektrické vlastnosti plamene. Vývoj simulátoru by tak měl být jednodušší i proto, že není třeba simulovat oba ohyby voltampérové charakteristiky, neboť výkon 6 kW je minimálním výkonem daného plynového kotle.

Pro tyto oblasti voltampérových charakteristik byly odečteny vždy dva body pro určení diferenciálního odporu a určení tak sklonu voltampérové charakteristiky. Výpočty jsou uvedeny v rovnicích 4.9 a 4.10.



Obr. 4.71: Detailní voltampérová charakteristika plamene pro výkon kotle 6 kW a lambda 1,3.



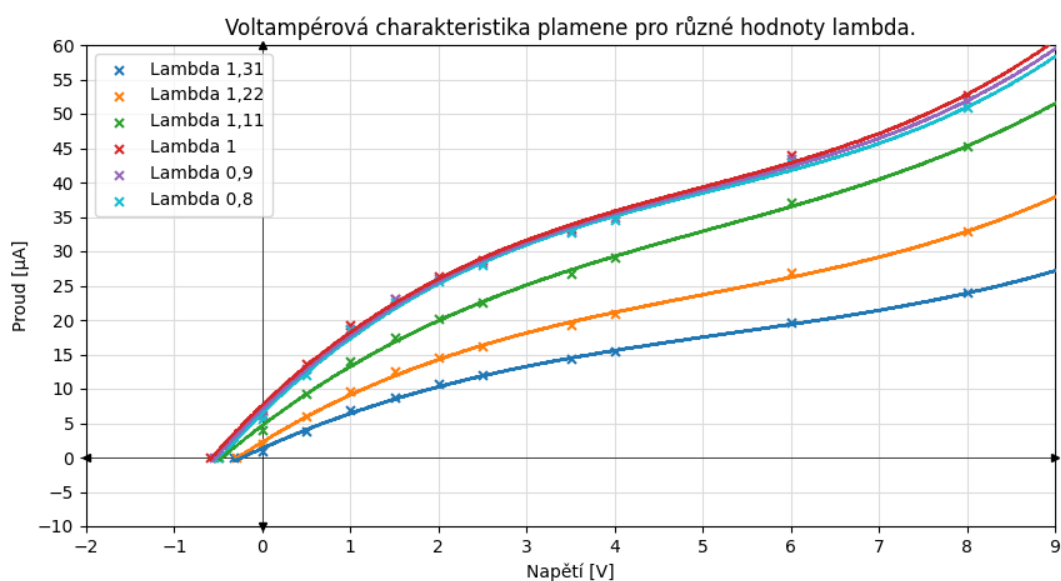
Obr. 4.72: Detailní voltampérová charakteristika plamene pro výkon kotle 28 kW a lambda 1,3.

$$R_{d(6kW)} = \frac{79,8 - 8,04}{74,23 - 13,08} = 1,173 \quad [M\Omega], \quad (4.9)$$

$$R_{d(28kW)} = \frac{95,7 - 8,05}{190,21 - 23,97} = 527 \quad [k\Omega], \quad (4.10)$$

S hodnotami diferenčního odporu bude stejně jako s termionickým napětím pro dané výkony plynového kotle dále pracováno v podkapitole 4.8.6.

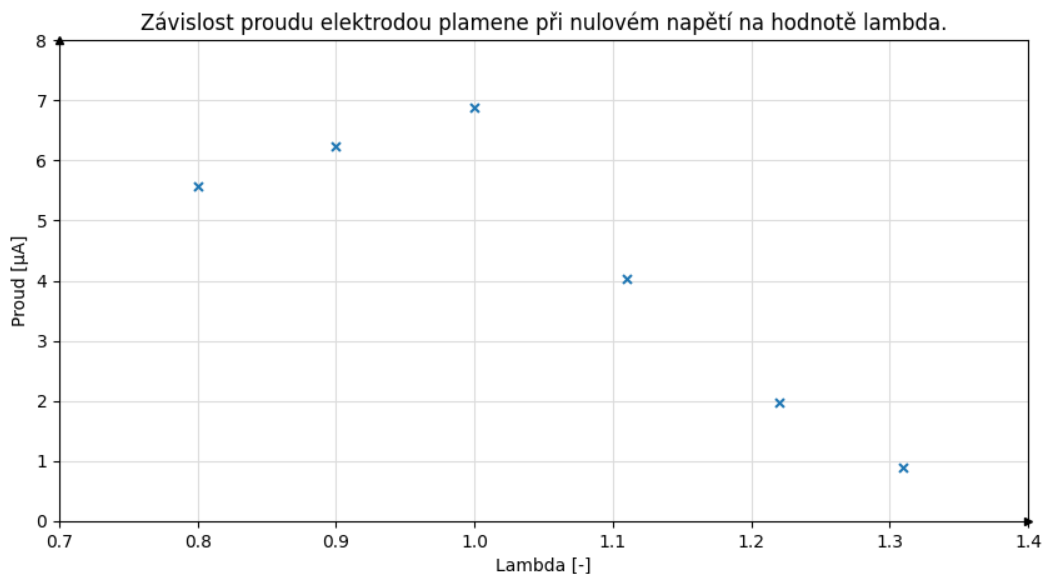
Pro budoucí implementaci automatického simulátoru plamene byly změřeny i voltampérové charakteristiky pro různé hodnoty lambda, které lze vidět na obrázku 4.73.



Obr. 4.73: Voltampérová charakteristika plamene pro různé hodnoty lambda při konstantních otáčkách ventilátoru.

Zde je vidět značný posun termionického napětí do záporné části charakteristiky s hodnotou lambda blíží se 1. Při takovém hoření dochází ke spalování veškeré směsi, ale zároveň i k vytváření vysoké koncentrace jedovatého CO . Reálně se používá lambda vyšší než 1 (přibližně okolo 1,2 - 1,3) z důvodu kompromisu mezi nízkými emisemi (CO , NO_x) a účinností. Při vysoké hodnotě lambda se spalovací komora přebytečným vzduchem zbytečně chladí a klesá účinnost. Termionické napětí se pro rozsah lambda od 1,3 do hodnoty přibližně 0,8 (v této oblasti danou metodou nebylo možné změřit lambda) pohybuje v mezích od 0,32 do 0,595 V.

Sklony voltampérových charakteristik se při přiblížení lambda 1 zvyšují, neboť reálně dochází k řízenému zvýšení výkonu plynového kotle vlivem lepšího spalování. Účelem nebylo měření pro stejný výkon a různou hodnotu lambda, protože ani v reálném zapojení se tak plynový kotel nechová.

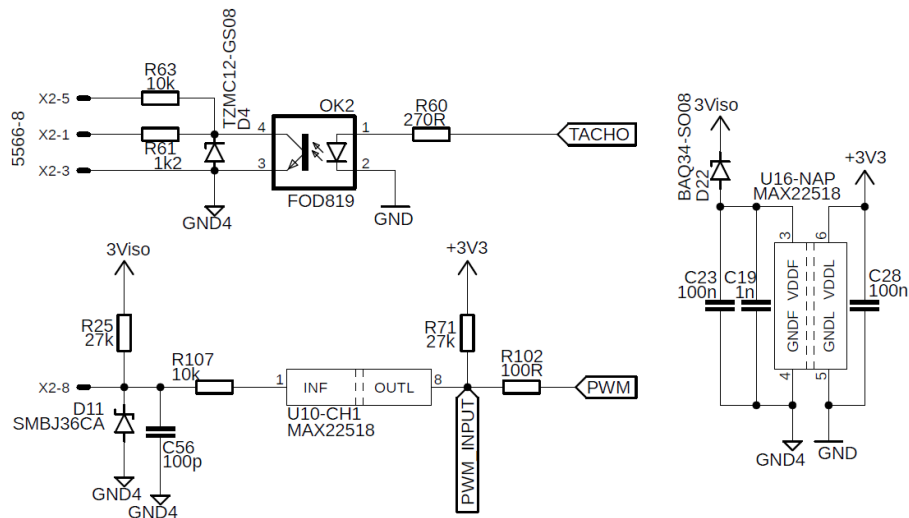


Obr. 4.74: Závislost proudu elektrodou plamene při nulovém napětí na hodnotě lambda.

Na obrázku 4.74 je vidět závislost proudu elektrodou plamene při nulovém napětí na různých hodnotách lambda. Na obrázku lze vidět, jak je maximálního proudu elektrodou plamene dosaženo při hodnotě lambda 1. Pro hodnoty lambdy větší než 1 dochází k rapidnímu snížení hodnoty proudu se zvyšující se hodnotou lambda. Vzhledem k metodě měření hodnoty lambda nebylo možné změřit hodnoty nižší než 1. Proto jsou hodnoty lambda 0,8 a 0,9 na obrázku 4.73 a 4.74 pouze orientační. Tato charakteristika slouží pro zjištění lambda 1, což řídicí jednotka využije pro kalibraci a nastavení poměru vzduchu a plynu v definované oblasti lambda [83]. Charakteristika by měla být jedním z parameterů, který se využije při budoucí implementaci automatického simulátoru plamene. Všechny hodnoty proudu byly změřeny při nulovém napětí na napájecím zdroji. Veškerá původní naměřená data jsou přiložena v elektronické příloze A.

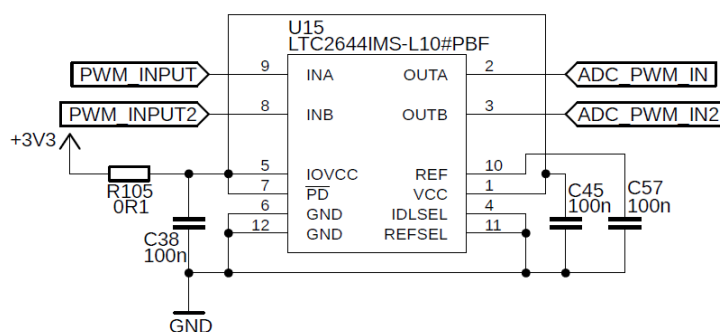
4.8.2 Simulátor ventilátoru

Simulátor ventilátoru je z větší míry firmwarovou záležitostí. Kvůli nutnému galvanickému oddělení se ze strany součástek jedná pouze o optočlen FOD819 pro snímání signálu PWM [84], neboli signálu, který řídí otáčky ventilátoru a generování signálu TACHO pomocí izolátoru MAX22518 [85], který udává informaci o otáčkách ventilátoru. Izolátor je výjimečný tím, že si generuje izolované napětí z výstupní strany na stranu vstupní.



Obr. 4.75: Obvody pro simulaci ventilátoru a galvanické oddělení od DUT.

Pro detekci požadovaných otáček ventilátoru je využitý integrovaný obvod LTC2644, který převádí střidu PWM signálu na napětí [86]. Měření tohoto napětí už zařídí interní A/D převodník v mikrokontroléru. Integrovaný obvod využívá interního referenčního napětí a je nastavený v režimu kontinuálního měření pomocí vstupu IDLSEL připojeného na zemní potenciál. Zapojení s obvodem LTC2644 je vidět ve schématu na obrázku 4.76. Nevýhodou zapojení je, že při odpojeném vstupním PWM signálu vyhodnocuje převodník střidu na napětí jako hodnotu blízkou 100 % kvůli vstupnímu Pull-up rezistoru. Proto je vstupní PWM signál zároveň připojen k mikrokontroléru, kde nepřítomnost signálu mikrokontrolér pomocí externího přerušení vyhodnotí správně.



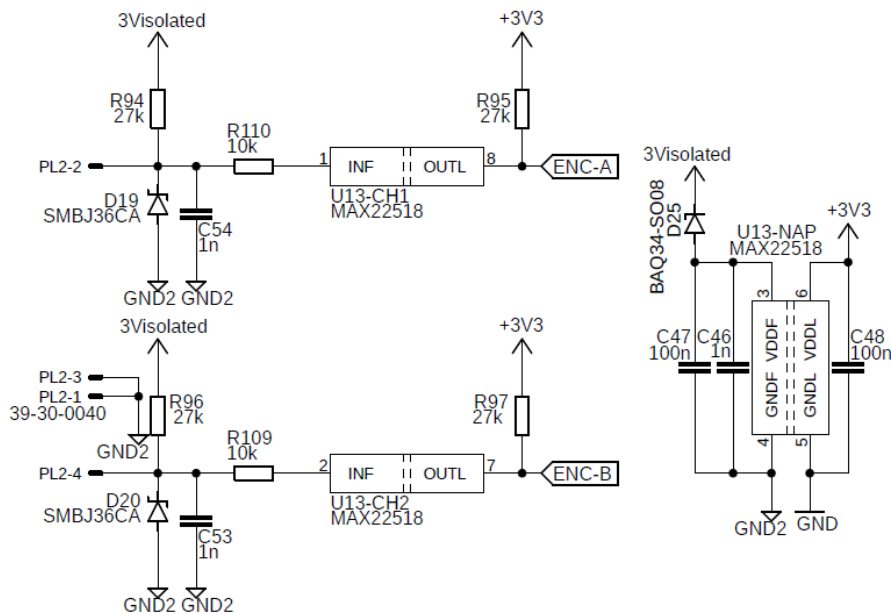
Obr. 4.76: Obvody pro měření řídicího PWM signálu pro ventilátor.

Aby se simulátor choval skutečně jako ventilátor, je zapotřebí napodobit náběh otáček a doznění otáček skutečného ventilátoru. Tuto problematiku má již na starosti firmware, který upravuje výstupní TACHO signál podle PWM vstupního sig-

nálu. V mikrokontroléru je tudíž nutné správně nastavit takový regulátor, který bude stabilní pro řadu nastavení koeficientů uživatelem (možnost přesnějšího nastavení náběhu a doznění simulátoru ventilátoru). Z tohoto důvodu byl upřednostněn PI regulátor před regulátorem PID. Použitý PI regulátor řeší náběh a doznění otáček změnou svých konstant K_P a K_I . Takto dojde k nastavení různé doby náběhu a doznění. Tento princip řízení se nazývá princip plánování zesílení [87]. Výpočtem nové hodnoty dojde k nastavení nové frekvence časovače, který obstarává změnu pro TA-CHO signál. Protože je potřeba překlápět mezi oběma stavy, je nutné nastavit frekvenci časovače dvojnásobnou. Simulátor ventilátoru by tak měl být plně automatizovaný. Na kartě simulátoru plamene se navíc nachází dva samostatné simulátory ventilátoru. Parametry K_P a K_I pro náběh a doznění lze nastavit pomocí MODBUS zprávy, stejně jako maximální otáčky ventilátoru a počet pulsů na otáčku. Pomocí zprávy MODBUS lze i vyčíst stav spínače APS (Air Pressure Switch - vzduchový tlakový spínač), který se sepne při proudění vzduchu systémem.

4.8.3 Detektor polohy škrťacího ventilu

Detekce polohy škrťacího ventilu by měla sloužit k úpravě spalovací směsi vzduchu a plynu (nastavení jejich poměru).



Obr. 4.77: Obvody pro detekci polohy škrťacího ventilu.

Škrťací ventil se skládá z ventilu tvořeného škrťacími čepelemi a krokového motoru, který ventil otevírá nebo přivírá. Přivřením škrťacího ventilu dochází k omezení množství plynu vcházejícího do spalovacího systému. Detektor polohy je postavený na stejném izolátoru jako detekce PWM u simulátoru ventilátoru. Izolátor

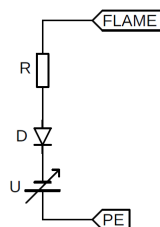
MAX22518 ze strany sekundární napájí rotační enkodér připojený na straně primární. Enkodér má svou rotační část připevněnou k ose krokového motoru a s otáčením dochází k přepínání enkodéru. Touto metodou tak dojde k zjištění polohy krokového motoru a při kalibraci spalovacího systému poté k přesnějšímu nastavení voltampérové charakteristiky simulátoru plamene. Zapojení izolátoru je na obrázku 4.77.

4.8.4 Simulátor plamene

Simulátor plamene by měl dostatečně simulovat elektrické vlastnosti plamene, které řídicí jednotka snímá. Plamen, jak již bylo určeno z měření, se chová jako horší vakuová dioda. Proto jeho charakteristiku lze na základě měření nahradit třemi základními prvky. Jsou jimi elektrický odpor, dioda a záporný napěťový zdroj. Elektrický odpor bude řídit směrnici sklonu voltampérové charakteristiky, dioda zahnuté koleno a napájecí zdroj bude posouvat charakteristiku v napěťové ose. Za normálních podmínek by bylo nutné simulovat i svodový proud elektrody plamene (diferenční odpor v závěrném směru v řádech stovek $M\Omega$). Řídicí jednotka však ověřuje závěrnou část charakteristiky plamene pouze poměrově, a proto po dohodě s vývojáři firmy Resideo ji není potřeba simulovat.

Vlastní funkce se tak bude skládat z manuálního simulátoru plamene (v budoucím rozšíření by měl být připraven pro možnost implementace automatického simulátoru plamene). Manuální režim bude řízený přes MODBUS zprávy pomocí nastavení odporu, termionického napětí a stavu plamene (sepnuto, nebo rozepnuto). Plně automatický režim by v budoucnu měl být řízen za pomoci vstupních stavů systému (poloha škrtkového plynového ventilu, stav plynového ventilu a otáčky ventilátoru).

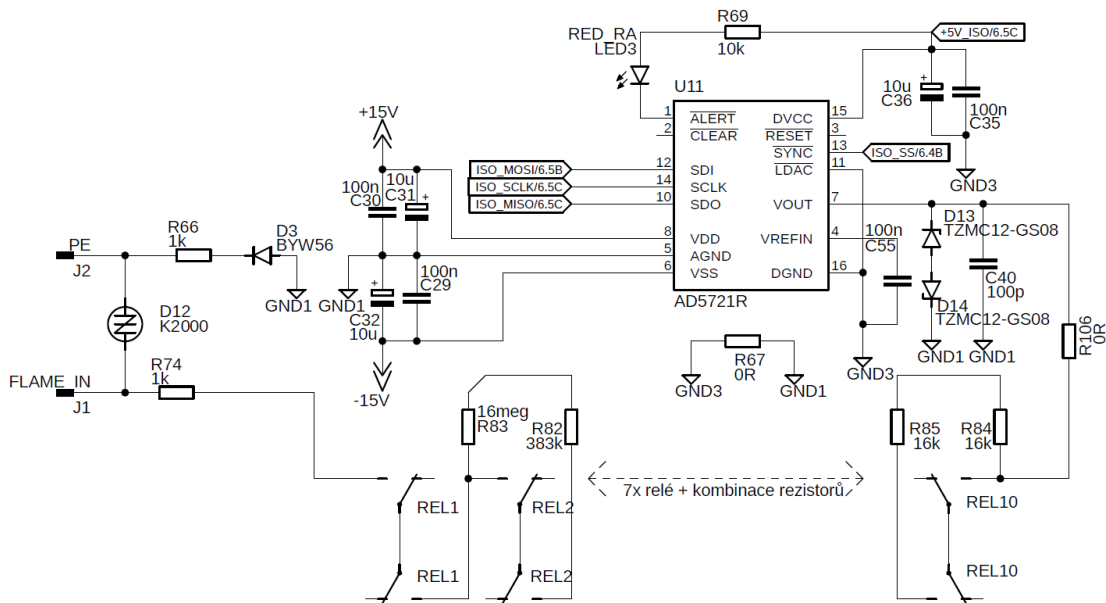
Samotný simulátor plamene tak lze řídit za pomoci tří funkčních bloků zobrazených v topologii na obrázku 4.78.



Obr. 4.78: Topologie zapojení simulátoru plamene.

Na obrázku 4.79 je již zapojený simulátor plamene v reálném použití na dané kartě. Pokud bude probíhat měření proudu, budou svým způsobem přispívat pouze

rezistory a dioda. Ve chvíli, kdy není měřen proud plamenem, se plamen chová jako zdroj malého napětí (typicky stovky milivoltů). V topologii je zapojený i sériový zdroj napětí s D/A převodníkem AD5721R, který je zapojený podle katalogového zapojení [88]. D/A převodník je napájený ze symetrického měniče napětí ± 15 V. Pro ochranu před vyšším napětím, které by se mohlo na výstupu D/A převodníku objevit, je na výstup připojena sériová dvojice antisériově zapojených Zenerových diod se Zenerovým napětím 15 V a kondenzátor 100 pF. Při poruše, zkratu na výstupu nebo jiném problému se rozsvítí na kartě červená LED dioda v oblasti D/A převodníku signalizující chybu.



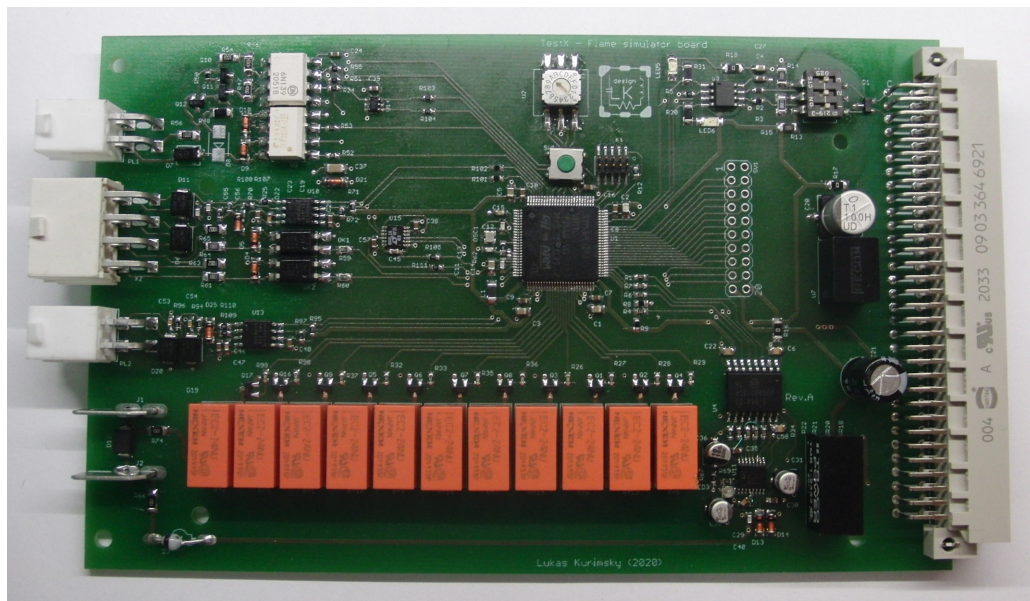
Obr. 4.79: Simulátor plamene.

Protože elektroda plamene může být kombinovaná s elektrodou zapalovací, na vstupu simulátoru by se tak mohlo objevit vysoké zapalovací napětí až okolo 20 kV. Z tohoto důvodu je mezi vstupní svorky připojený sidac K2000 [89], který velmi rychle omezí napětovou špičku nad 200 V a ochrání tak další obvody připojené za ním. Aby bylo možné nastavit různou intenzitu plamene, lze za pomoci relé nastavit odpor v cestě simulovaného proudu. Rezistory lze nastavit v rozsahu od zhruba 32 k Ω do 32 M Ω s krokem 32 k Ω . Relé E2C-24NU jsou použité z důvodu možnosti průtoku nízkého proudu (řádově mikroampéry) [65] a elektrických izolačních vlastností až do 200 V. I rezistory musí být přizpůsobeny tomuto vyššímu napětí.

4.8.5 Výsledná karta simulátoru plamene

Výsledná karta je zobrazena na obrázku 4.80. Na kartě se nachází dva simulátory ventilátoru, dva digitální vstupy používané na kartě digitálních vstupů, inkremen-

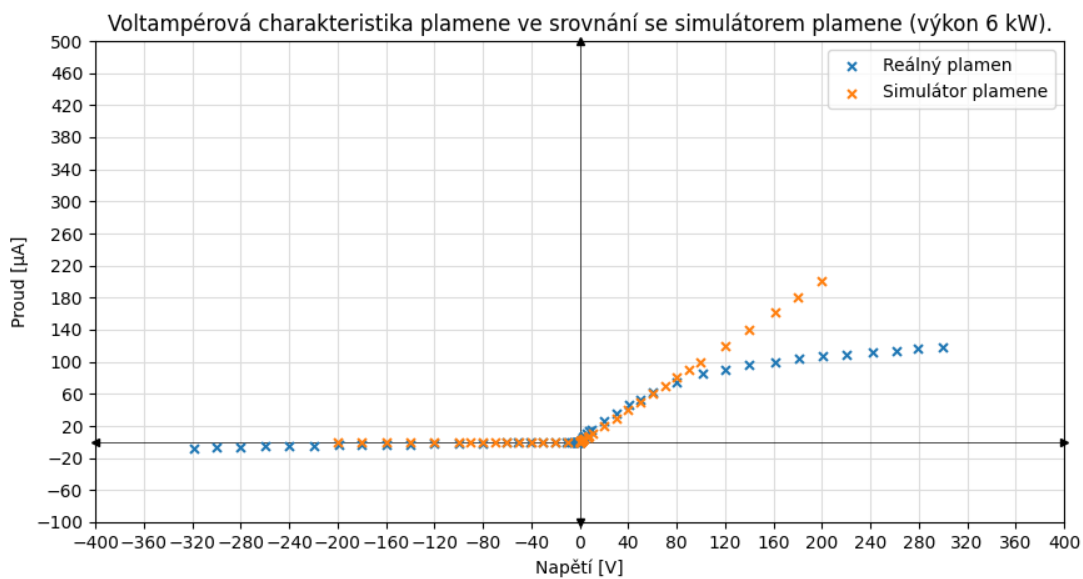
tální snímač polohy škrtkého ventilu a simulátor plamene. Simulátor plamene lze nastavit prozatím v manuálním režimu. Manuální režim dovoluje nastavení hodnoty odporu, termionického napětí a stavu simulátoru plamene (hoří, nebo nehoří). Automatický režim by se v budoucnu měl sám starat o nastavení charakteristiky plamene na základě vstupních parametrů popsaných výše. Pomocí MODBUS zprávy lze nastavit nebo vyčíst parametry simulátorů ventilátoru, vlastnosti simulátoru plamene a stav digitálních vstupů. Sepnutí plamene může záviset na stavu digitálních vstupů, kterými lze detekovat přítomnost napětí na plynovém ventilu.



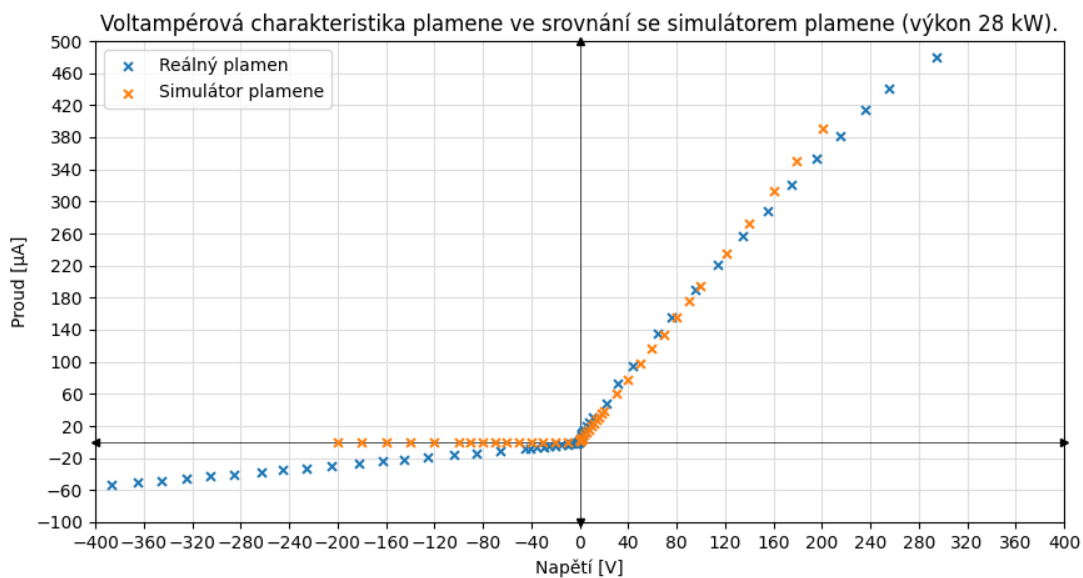
Obr. 4.80: Vyrobená a naprogramovaná karta simulátoru plamene.

4.8.6 Ověření funkce simulátoru plamene

Ověření vlastností voltampérové charakteristiky simulátoru plamene podléhalo stejnému měření jako měření vlastností reálného plamene. Použity byly stejné měřicí přístroje i zdroj napětí vlastní výroby. Nastaveny byly dvě charakteristiky, pro které bylo měření uskutečněno, a to pro výkon kotle 6 kW a 28 kW. Po nastavení odporu simulátoru plamene, podle vypočítané hodnoty diferenčního odporu skutečného plamene pro dané výkony, křivka simulátoru plně nekopírovala sklon voltampérové charakteristiky reálného plamene. Proto bylo nutné dostavit hodnotu odporu a napětí simulátoru. To v budoucnu povede k firmwarové kompenzaci hodnot odporu a napětí pro přesné nastavení elektrických vlastností plamene. Měření proudu bylo uskutečněno pouze do napětí 200 V, neboť sidac zapojený mezi vstupními svorkami napětí vyšší než 200 V omezí a ochrání okolní obvody.



Obr. 4.81: Srovnání voltampérových charakteristik plamene a simulátoru plamene pro výkon kotle 6 kW a lambda 1,3.



Obr. 4.82: Srovnání voltampérových charakteristik plamene a simulátoru plamene pro výkon kotle 28 kW a lambda 1,3.

Pro výkon 6 kW byl nastaven odpor simulátoru plamene na hodnotu 1 M Ω a napětí zdroje v simulátoru na hodnotu -300 mV. Charakteristika pro výkon 6 kW je na obrázku 4.81 a zobrazuje srovnání voltampérové charakteristiky plamene (modrá křivka) a simulátoru plamene (oranžová křivka). Pro výkon 28 kW byl nastaven odpor simulátoru plamene na hodnotu 520 k Ω a napětí zdroje v simulátoru na hodnotu -450 mV. Charakteristika pro výkon 28 kW je na obrázku 4.82 a zobrazuje srovnání voltampérové charakteristiky plamene (modrá křivka) a simulátoru plamene (oranžová křivka).

Napětí zdroje simulátoru a změřené termionické napětí se liší. Tento rozdíl bude pravděpodobně důsledkem úbytku napětí na diodě D3 (na obrázku 4.79) při nízkém průchodu proudem. Voltampérová charakteristika simulátoru tak byla vždy nastavena, aby počátek charakteristiky při nulovém napětí dodával do obvodu podobný proud jako reálný plamen při daném výkonu. Sklon charakteristiky je pak již nastaven odporem simulátoru. V oblasti napětí od 0 do 100 V se charakteristiky simulátoru plamene a reálného plamene víceméně překrývají, a proto lze považovat simulátor za dostatečný. V budoucnu by bylo dobré, pro účely nových projektů s přesnějším snímáním, rozšířit simulátor o závěrný směr voltampérové charakteristiky (simulace nastavitelného svodového proudu elektrody plamene) a, jak již bylo popsáno výše, také automatické řízení simulátoru plamene na základě parametrických vstupů (otáčky ventilátoru, poloha škrtkového ventilu).

4.8.7 Přehled MODBUS registrů

Stav jednotlivých parametrů a stavů simulátoru se nastavuje za pomoci MODBUS paketů. Přehled nejdůležitějších registrů pro práci s nastavením stavů a parametrů je zobrazen v tabulce 4.21.

Vyčítání i zápis mohou mít společný registr, avšak rozdílný funkční kód. Hodnotou je buď 16-bitové číslo (stav vstupů, simulátorů ventilátoru, simulátoru plamene nebo nastavení digitálních vstupů) nebo číslo s plovoucí desetinnou čárkou (float - maximální otáčky ventilátoru a odpor plamene). Podmínka sepnutí plamene pro digitální vstupy určuje za jakých podmínek dojde k sepnutí plamene při otevření plynového ventilu. Pokud bude nastavená hodnota 1, bude požadovaný signál na prvním digitálním vstupu. Pokud bude hodnota 2, bude požadovaný signál na druhém digitálním vstupu. Při hodnotě 3 je nutné mít signál na obou digitálních vstupech.

4.8.8 Zapojení konektorů

V tabulce 4.22 je vidět zapojení konektoru pro kartu simulátoru plamene. První číslo v buňce je číslo pinu na konektoru, za ním se nachází označení digitálního vstupu (IN) a jeho pinu (1 pro kladnější polaritu a 2 pro zápornější). Dále se v tabulce

Tab. 4.21: Přehled nejdůležitějších registrů a funkčních kódů pro ovládání karty simulátoru plamene.

Popis příkazu	Funkční kód čtení/zápisu	Registr
Přečíst/nastavit odpor plamene	0x03 / 0x10	0x0601
Přečíst/nastavit stav plamene	0x03 / 0x06	0x0602
Přečíst/nastavit termionické napětí	0x03 / 0x10	0x0603
Přečíst/nastavit režim plamene (do budoucna)	0x03 / 0x06	0x0604
Přečíst stav digitálního vstupu 1	0x03 / -	0x0605
Přečíst stav digitálního vstupu 2	0x03 / -	0x0606
Přečíst/nastavit podmínku sepnutí plamene pro dig. vstupy	0x03 / 0x06	0x0607
Přečíst/nastavit prahovou úroveň vstupu L1	0x03 / 0x06	0x0608
Přečíst/nastavit prahovou úroveň vstupu L2	0x03 / 0x06	0x0609
Přečíst/nastavit maximální otáčky ventilátoru 1	0x03 / 0x10	0x0610
Přečíst/nastavit maximální otáčky ventilátoru 2	0x03 / 0x10	0x0611
Přečíst/nastavit počet pulsů na otočku pro ventilátor 1	0x03 / 0x06	0x0612
Přečíst/nastavit počet pulsů na otočku pro ventilátor 2	0x03 / 0x06	0x0613
Přečíst/nastavit parametr Kp pro náběh ventilátoru 1	0x03 / 0x10	0x0614
Přečíst/nastavit parametr Ki pro náběh ventilátoru 1	0x03 / 0x10	0x0615
Přečíst/nastavit parametr Kp pro náběh ventilátoru 2	0x03 / 0x10	0x0616
Přečíst/nastavit parametr Ki pro náběh ventilátoru 2	0x03 / 0x10	0x0617
Přečíst/nastavit parametr Kp pro doběh ventilátoru 1	0x03 / 0x10	0x0618
Přečíst/nastavit parametr Ki pro doběh ventilátoru 1	0x03 / 0x10	0x0619
Přečíst/nastavit parametr Kp pro doběh ventilátoru 2	0x03 / 0x10	0x0620
Přečíst/nastavit parametr Ki pro doběh ventilátoru 2	0x03 / 0x10	0x0621
Přečíst stav APS pro ventilátor 1	0x03 / -	0x0622
Přečíst stav APS pro ventilátor 2	0x03 / -	0x0623

nachází označení vstupů pro enkodér (ENC-A, ENC-B a GND pro zemní potenciál). Pro simulátory ventilátoru jsou na konektor X2 přivedeny vstupy PWM-1 a PWM-2 (vstup pro řídicí PWM signál), výstupy TACHO-1 a TACHO-2 (výstupy pro detekci otáček ventilátoru v DUT) a připojení napájecího napětí pro Pull-up rezistory (PULLUP-1 a PULLUP-2). Konektory PL1 a PL2 jsou typu Molex Mini-Fit o dvou řadách po dvou pinech a konektor X2 je typu Molex Mini-Fit o dvou řadách po čtyřech pinech. Konektory J1 a J2 typu Fast-On jsou pro připojení simulátoru plamene (FLAME) a zemního potenciálu (PE) k DUT.

Tab. 4.22: Přehled výstupů na konektorech.

PL1		PL2		X2				J1	J2
4: IN2-2	3: IN1-2	4: ENC-A	3: GND	8: PWM-1	7: PWM-2	6: PULLUP-1	5: PULLUP-2	FLAME	PE
2: IN2-1	1: IN1-1	2: ENC-B	1: GND	4: GND	3: GND	2: TACHO-1	1: TACHO-2		

5 Ovládací software

Ovládací software je založený na jazyce Python a jeho knihovnách pySerial, pyModbus, six a crcmod. Nejprve je nutné nainportovat nastavení komunikačního kanálu převodníku USB -> UART a další funkce, které jsou používány při ovládání skriptu.

Výpis 5.1: Načtení knihoven a používaných funkcí.

```
import serial
import crcmod
from Utils.eurocard_tools import FloatPackage, ReadAnalogValue
import Libs.modbus as ECT
import Settings.modbus_config as ECT_MOD
```

Poté se spustí inicializace pro daný COM port v počítači (například COM2). Pro použití testovacího zařízení je nutné nastavit lichou paritu ('E'), která je ve firmware aplikačních karet nastavená.

Výpis 5.2: Nastavení COM portu pro komunikační rozhraní.

```
MOD0 = ECT.Modbus(COM2, parity='E')
```

Dále proběhne přiřazení adres jednotlivým kartám dle nastaveného hexadecimálního dekodéru.

Výpis 5.3: Přiřazení adresy kartě digitálních vstupů.

```
ECTesterInput = ECT_MOD.modbus_config(MOD0, address=1)
```

V tuto chvíli lze komunikovat s aplikačními kartami a provádět jakékoliv operace. Při ukončení činnosti je nutné uzavřít otevřený COM port.

Výpis 5.4: Ukončení komunikace uzavřením COM portu.

```
if MOD0 is not None:
    MOD0.close()
```

5.1 Příklady ovládání karet

Pro ovládání karet lze využít tři základní příkazy, dva pro zápis (16-bitové číslo a datový typ float) a jeden pro čtení (kde pro určení datového typu musí být zadán parametr). Níže jsou uvedeny všechny příklady typu čtení a zápisu hodnot. Pod proměnnými ECTesterInput a ECTesterNTC jsou inicializovány karty digitálních vstupů a digitálních potenciometrů.

Výpis 5.5: Zápis hodnoty 0xFFFF do registru 0x0104 karty digitálních vstupů.

```
ECTesterInput.write("ThresholdL1", 0xFFFF)
```

Provedení zápisu do karty vstupů, kde se pod nadefinovaným ID "ThresholdL1" skrývá registr 0x0104, do kterého se zapisuje hodnota 0xFFFF (zkratování Zenerových diod na všech digitálních vstupech).

Následně dojde k vyčtení nastavené hodnoty z registru 0x0104 do proměnné Vycteno. Parametr number není nutné pro vyčítání 16-bitového čísla zadávat. Jedná se o defaultně přednastavenou hodnotu počtu registrů.

Výpis 5.6: Vyčtení hodnoty z registru 0x0104 karty digitálních vstupů.

```
Vycteno = ECTestInput.read("ThresholdL1")
```

Při zápisu formátu float (formát plovoucí desetinné čárky) je již nutné formovat data do podoby formátu float tak, aby mohlo dojít ke správnému přenosu dat. Před odesláním je formát rozdělen na dvě 16-bitová čísla a ty jsou následně přijatou aplikační kartou transformována do správné podoby formátu float. O proces rozdělení dat se stará funkce FloatPackage. Pod nadefinovaným ID "NTC1_Value" se skrývá registr 0x0010.

Výpis 5.7: Zápis hodnoty 96500 Ω do digitálního potenciometru 1 ve formátu float.

```
ECTesterNTC.write_multiple("NTC1_Value", FloatPackage(96500.0))
```

Poslední proces se skládá ze dvou kroků. V prvním dojde k přečtení dat, kde jako zadaný parametr number se objevuje hodnota 2, což značí příjem dvou 16-bitových čísel. O následnou transformaci do formátu float se stará funkce ReadAnalogValue. Výsledná hodnota ve formátu float se nachází v proměnné VyslednaHodnota.

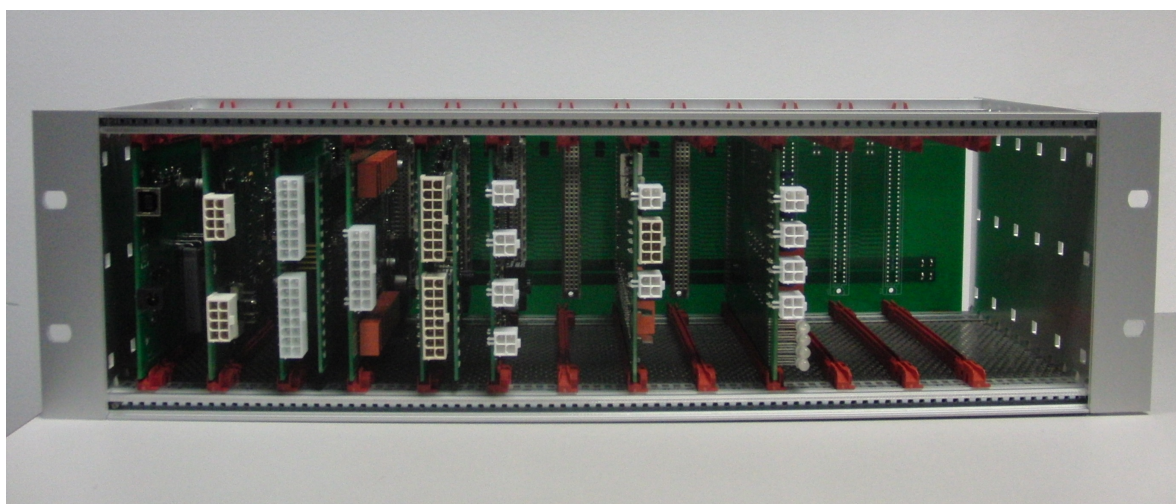
Výpis 5.8: Vyčtení hodnoty digitálního potenciometru 1 ve formátu float.

```
Precteno = ECTestNtc.read("NTC1_Value", number=2)  
VyslednaHodnota = ReadAnalogValue(Precteno)
```

Nadefinovaná MODBUS ID jsou pro všechna čtení/zápisy zapsána v souboru Settings/modbus_id.py ve složce se skriptem.

6 Prototyp testovacího zařízení

Na obrázku 6.1 je zobrazen již hotový prototyp testovacího zařízení pro automatizované testování řídicích jednotek plynových kotlů. Skládá se z modulových karet, které simulují běžné provozní a okrajové podmínky pro řídicí jednotku plynového kotle. Testovací zařízení již obsahuje celkem sedm aplikačních karet a jednu kartu komunikační a napájecí. Systém je zároveň připraven pro budoucí rozšíření dalšími modulovými kartami. Jedním z možných budoucích rozšíření by mohla být autonomní řídicí karta, která by nahradila nadřazený řídicí systém (PC) v případě potřeby dlouhodobého testování (například životnostní testy zařízení).



Obr. 6.1: Výsledný prototyp testovacího zařízení pro automatizované testování řídicích jednotek plynových kotlů.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a vytvořit prototyp testovacího zařízení určeného pro automatizované testování řídicích jednotek plynových kotlů firmy Resideo. Základem je testovací systém postavený na modulární koncepci. Modulární řešení obsahuje několik funkčních a aplikačních karet, které plně simulují normální nebo okrajové okolní podmínky plynové kotle. Aplikační karty jsou založeny na architektuře 32-bitového mikrokontroléru STM32L073VBT6, případně PSoC mikrokontroléru CY8C5467AXI-LP108. Obsah karet se dělí na řídicí a aplikační část, kde řídicí část se stará přímo o komunikaci s nadřazeným systémem pro možnosti ovládní aplikační části a případně poskytnutí dat, zatímco aplikační část slouží k samotné funkci dané karty. Spojení mezi kartami pomocí konektoru DIN 41612 vytváří základní deska, která zároveň určuje formát karet velikosti Eurocard standardu. Každá karta připojená do systému musí mít z důvodu identifikace adresu, která se volí pomocí hexadecimálního enkodéru. Celkem lze zapojit až 16 karet do jedné testovací sestavy. Pokud by ani tento počet nestačil, lze vytvořit novou instanci s druhou testovací soustavou (je nutné použít jinou komunikační kartu). Každá sestava musí obsahovat na začátku vedení jednu komunikační kartu kvůli polarizačním rezistorům a terminačnímu rezistoru. Základní deska dále rozvádí napájecí napětí +24 V pro všechny aplikační karty. Komunikace probíhá za pomoci MODBUS protokolu po komunikační sběrnici RS-485, která je rozvedena jako páteřní síť na základní desce. Všechny zadané cíle byly splněny a nejdůležitější vlastnosti karet včetně řešení problémů jsou popsány v následujících odstavcích.

Karta výstupů, která má představovat stavové spínače byla vytvořena pomocí 16 relé buzených pomocí serioparalelního budiče TPIC6C595, který pomocí integrované diodové struktury umožní rychlejší vybití energie cívky relé a zároveň ochrání interní budící tranzistor. Výhodou karty je možnost spínání malého (nejčastěji 24 V) a nízkého napětí (230 V) v rámci jedné karty. Karta totiž obsahuje dva konektory s výstupy relé, které jsou od sebe izolovaně vzdálené 5 mm. Lze tak bezpečně připojit a spínat oba typy napětí v rámci jedné karty. Stav sepnutých relé pro optickou indikaci zobrazují LED diody na horním panelu. Spotřeba této karty se při sepnutých výstupech pohybuje okolo 135 mA. U dané karty lze pomocí MODBUS registrů přečíst nebo nastavit stav jednotlivých relé (včetně sepnutí při maskování ostatních relé).

Komunikační karta vytváří napájecí napětí pro ostatní aplikační karty a převádí komunikační rozhraní z USB (nadřazený systém) na RS-485 pro aplikační karty. Základem převodníku komunikace je integrovaný obvod FT230XS, který se stará o převod z komunikačního rozhraní USB na UART. Toto rozhraní je dále galvanicky odděleno pomocí izolátoru komunikace ISO7041 a o převod na sběrnici RS-485

se poté stará integrovaný obvod MAX485. Vstupní napětí se liší podle typu osazeného napájecího zdroje na komunikační kartě. Pro zvolenou variantu s integrovaným obvodem LTC3115 typu SEPIC se vstupní napětí pohybuje zhruba od 15 V do 40 V stejnosměrných (v případě střídavého vstupního napětí 24 V střídavých). Napájecí zdroj jako takový dokáže dodat proud až 1 A při vstupním napětí 25 V střídavých. Teplota měniče je sice hraniční, ale není kritická. Měnič tak splňuje dané požadavky na svůj výkon. V budoucnu by bylo dobré doplnit měnič napětí o malý chladič, nebo použít 4vrstvý plošný spoj pro lepší rozvod tepla. Při vývoji byly použity integrované obvody SP485 ze skladových zásob firmy. Problém u těchto integrovaných obvodů nastal ve chvíli, kdy došlo k odpojení vysílání daným převodníkem. Vygenerovaný překmit byl detekovaný obvodem na přijímací straně a mikrokontrolér, který pak data vyhodnocoval, s překmitem pracoval jako s novým bitem. Posun dat, který mikrokontrolér provedl, způsobil znehodnocení celého přijatého paketu. Problém se podařilo vyřešit dvěma způsoby. První řešení spočívá v připojení kondenzátorů s hodnotou minimálně 2,2 nF na sběrnici u vodičů A a B proti zemnímu potenciálu. Hrany signálu se trochu zaoblily, ale problém tak byl vyřešen. Druhým řešením je použití komunikačních převodníků s lepšími parametry, jako jsou třeba MAX3430 nebo MAX3462.

Karta analogových výstupů má za úkol simulovat analogové teplotní či tlakové senzory s proudovými nebo napěťovými výstupy. Na kartě se nachází čtyři D/A převodníky AD5423, které dokážou generovat v napěťovém módu napětí od 0 do ± 10 V a v proudovém módu proud od 0 do ± 24 mA. O napájení těchto D/A převodníků se stará izolovaný integrovaný měnič napětí (z 24 V na 15 V) v kladné části a spínaný měnič napětí s integrovaným obvodem LM43601 (z 15 V na -15 V) v záporné části. Sériové zapojení měničů je provedeno z důvodu možnosti nesymetrického vytížení obou zdrojů. Galvanické oddělení na kartě je provedeno pomocí izolátoru komunikace SPI a izolovaný měnič napětí. Při plném vytížení všech analogových kanálů s proudem -24 mA dosahují teploty maximálně 63,3 °C, což je dobrá hodnota pro dlouhodobé provozní podmínky. Na D/A převodnicích bylo provedeno měření odchylky nastavené hodnoty pro oba rozsahy. V případě obou módů (jak napěťový, tak proudový) byla měřená chyba nižší než chyba TUE, kterou udává katalogový list. Nejvyšší absolutní chyba napěťového rozsahu dosáhla hodnoty pod 2,5 mV v kladné polaritě a pod 0,5 mV v polaritě záporné. Nejvyšší absolutní chyba proudového rozsahu dosáhla hodnoty pod 15 μ A v obou polaritách. Pomocí MODBUS registrů lze přepnout mód nebo zapsat výstupní hodnotu napětí či proudu.

Karta digitálních vstupů detekuje přítomnost vstupního napětí. Díky svému řešení dokáže detekovat napětí od 5 V do 230 V jak stejnosměrných, tak střídavých. Řešení je provedeno zdrojem proudu, který je nastaven přibližně na 800 μ A. Čím větší napětí se objeví na vstupu, tím větší bude ztrátový výkon na výkonovém tran-

zistoru. Pro omezení ztrátového výkonu na tranzistoru na polovinu je na vstupu digitálního vstupu usměrňovací dioda RS1M. Voltampérová charakteristika digitálního vstupu by měla podle simulace přepnout na sepnutý stav při napětí přibližně 4 V. Při měření voltampérové charakteristiky došlo k sepnutému stavu pro měřený optočlen již při napětí 2,74 V při proudu 450 μA . Rozdíl hodnoty napětí, při které dojde k sepnutí, je pravděpodobně způsoben velkým rozptylem hodnoty CTR optočlenu. Celkem se na kartě nachází 16 digitálních vstupů a jsou řešené stejně izolovaně jako na kartě výstupů. Karta obsahuje dva konektory, které jsou odděleny izolační vzdáleností 5 mm, a lze tak připojit zároveň na jeden malé a na druhý nízké napětí. Alternativní funkcí digitálního vstupu 1 a 3 je měření frekvence a střídy vstupního signálu. Tato funkce by mohla být využita například při měření signálů ze zpětnovazebních čerpadel. U signálu s frekvencí 250 Hz lze měřit frekvenci s chybou do 0,07 % a střídu s chybou okolo 1 %. Vzorkování vstupního signálu zajišťuje časovač mikrokontroléru s frekvencí 160 kHz. Problémem u galvanicky odděleného signálu je nesymetrie náběžné a sestupné hrany. Ta je u optočlenu 6N139 poměrně velká, ale pro signály s frekvencí do 250 Hz celkem zanedbatelná. U náběžné hrany bylo zpoždění změřeno s hodnotou 2,8 μs a u hrany sestupné s hodnotou 30 μs . Tuto nesymetrii by bylo možné kompenzovat ve firmware a zlepšit tak přesnost měření střídy. Při testování teplotního vytížení karty digitálních vstupů byla teplota na výkonovém tranzistoru až 54 °C při připojení napětí 230 V střídavých a až 75,6 °C při připojení napětí 230 V_{rac} (usměrňené nevyfiltrované střídavé napětí - nejhorší možný případ). Teplota při napětí V_{rac} je poměrně vyšší a mohla by vést k postupné degradaci a snížení spolehlivosti. Nevyfiltrované střídavé napětí se může vyskytovat u některých druhů používaných elektromagnetických ventilů. Pomocí MODBUS registru lze nastavit prahové hodnoty, číst stav digitálních vstupů, nebo frekvenci a střídu vstupních signálů na kanálech 1 a 3.

Karta digitálních potenciometrů je vytvořena pro simulaci teplotních odporových snímačů, nejčastěji typu NTC. Zvoleny byly digitální potenciometry AD5720 kvůli své přesnosti a ceně. Z důvodu zmenšení nastavovaného kroku až na 20 Ω jsou zapojeny dva digitální potenciometry do série (jeden s hodnotou 20 k Ω a druhý s hodnotou 100 k Ω). Chyba digitálních potenciometrů je v případě využití „Resistor performance mode“ režimu maximálně 1 % v téměř 90 % rozsahu. Pro ověření vlastností digitálních potenciometrů bylo provedeno měření odchylky nastavené hodnoty od hodnoty měřené. Minimální hodnota odporu, od které by měla maximální chyba dosahovat 1 %, byla vypočítána na 14062,5 Ω . Chyba pro hodnoty odporu nižší než necelých 14 k Ω může být větší než 1 %, což pro simulátor NTC snímače je akceptovatelné (simulace vysokých teplot při nízkém odporu). Změřená hodnota relativní chyby se pro hodnoty přibližně od 14 k Ω pohybuje okolo ± 1 %. Chyba digitálních potenciometrů je tak ověřena a splňuje požadované hodnoty. Nastavení digitálního

potenciometru probíhá pomocí MODBUS registru, kde lze nastavit/vyčíst hodnotu jednotlivých digitálních potenciometrů, nebo spustit verifikaci hodnot. V případě úspěšné verifikace se vedle výstupního konektoru rozsvítí zelená LED dioda, v případě neúspěšné červená LED dioda.

Karta PWM vstupů a výstupů je určena pro měření frekvence a střídy vstupního signálu a generování výstupního signálu s nastavitelnou frekvencí a střídou. Jako jediná aplikační karta je založena na PSoC mikrokontroléru CY8C5467AXI-LP108 z důvodu využití rychlého zpracování signálu na straně programovatelné digitální části mikrokontroléru. PWM vstup je po hardwarové stránce založen na rychlém vstupním komparátoru TLV3202 s nastavitelnou prahovou hodnotou. Před vstupním komparátorem se nachází dělič napětí pro možnost detekce přítomnosti vyšších napětí (až do 24 V). O nastavitelnou prahovou hodnotu se stará D/A převodník uvnitř PSoC se sledovačem napětí tvořeným operačním zesilovačem MCP6002 a rezistory vytvářejícími hysterezi komparátoru. PWM výstup je generovaný PSoC mikrokontrolérem, který spíná integrovaný obvod TC4432. Ten se za normálních podmínek (pouze záporný výstup TC4432) chová vůči výstupu jako tranzistor typu otevřený kolektor. V případě připnutí kladného výstupu pomocí SSR optočlenu TLP222A se výstup chová jako v režimu Push-Pull. O omezení výstupního proudu se stará rezistor s hodnotou 680 Ω . Pro integrovaný obvod TC4432 a obecně pro režim Push-Pull je nutné generovat výstupní napětí. To je řešeno nastavitelným měničem napětí s integrovaným obvodem TLV61046A, který výstupní kanály napájí. Napěťový měnič typu BOOST lze nastavit v rozsahu napětí od 4,5 V do 24 V stejnosměrných. Výstupní napětí nastavuje PSoC mikrokontrolér pomocí MODBUS zprávy. Maximální hodnotu výstupního napětí lze nastavit pomocí DIP přepínače. Výstupní napětí měniče sleduje A/D převodník v PSoC mikrokontroléru. Krok nastavení napětí je zhruba 1,5 V. Digitální zpracování vstupního signálu je provedeno pomocí funkčního stavového automatu (napsaného v jazyce Verilog), který ovládá čítače a měří tak počet pulsů v kladné a záporné polaritě vstupního signálu. Vzorkování probíhá na frekvenci 12 MHz kvůli možnosti přesnější detekce nižších frekvencí (typicky okolo 80 až 200 Hz). V případě přetečení čítače, aneb při setrvání v jednom stavu déle, než je doba vypršení (přibližně 1,39 sekundy), dojde k vyvolání přerušování v mikrokontroléru. Tím je zajištěna detekce klidového stavu v logické 0 nebo 1. O PWM výstupy se taktéž stará PLD část PSoC mikrokontroléru a je možné nastavit frekvenci v rozsahu od 32 Hz do 200 kHz se střídou v závislosti na frekvenci (čím vyšší frekvence, tím méně přesné nastavení střídy). Na výsledné kartě se nacházejí celkem 4 vstupní PWM kanály a 4 výstupní PWM kanály. Tři výstupní PWM kanály jsou 16-bitové, zatímco poslední kanál je pouze 8-bitový (u něj lze zvolit nejnižší frekvenci přibližně 8,5 kHz). Podobně tak první dva vstupní PWM kanály obsahují dva 24-bitové čítače a další dva kanály pouze 16-bitové. Je tomu tak

z důvodu nedostatku prostředků v digitální části mikrokontroléru PSoC. Minimální měřitelná frekvence PWM vstupu je 2 Hz a měřená chyba na frekvenci 20 kHz není větší než 0,35 %. Pomocí MODBUS registrů lze nastavit módy, prahové hodnoty, výstupní napětí nebo vyčíst hodnoty frekvencí, střídavy a napětí.

Karta pro napájení DUT je určena pro připojování/odpojování střídavého napětí od 24 do 230 V k zátěži. Výhodou karty je připojování zátěže při nulové hodnotě vstupního napětí a odpojování zátěže při nulovém výstupním proudu. Tento proces by měl zajistit delší životnost kontaktů relé. Karta je postavena na dvou základních blocích - blok detektoru průchodu vstupního napětí nulou a bloky detektorů průchodu proudu nulou. Napájení strany detektorů je řešeno ze střídavého vstupu pomocí proudového zdroje, jaký je použitý na kartě digitálních vstupů pro napájení stabilizátoru napětí s integrovaným obvodem TPS71533. Napájecí zdroj se tedy skládá z jednocestného usměrňovače, proudového zdroje, zásobníku energie tvořeného kondenzátorem, Zenerovy diody a nízkopříkonového stabilizátoru TPS71533. V kladné půlčlenně zdroj proudu napájí stabilizátor a nabíjí zásobník energie až na Zenerovo napětí, v záporné půlčlenně je energie z kondenzátoru odebírána pro napájení detektorů. Proudový zdroj zajišťuje široký rozsah vstupních napětí. Detektory musí mít malou spotřebu, aby jim během záporné půlčlenně vystačila energie z kondenzátoru. Detektor proudu snímá úbytek napětí na antiparalelně zapojených Schottkyho diodách a pomocí komparátoru s vestavěnou hysterezí vyhodnocuje proud tekoucí diodami. Při přítomnosti průchozího proudu je výstupní stav překlopen. Detektor vstupního napětí je složený ze tří bipolárních tranzistorů s vysokým zesilovacím činitelem. Při průchodu napětí nulou vygeneruje detektor úzký puls detekující průchod. Lze tak zajistit přítomnost napětí na vstupu. Pulsy jsou do řídicí části přeneseny pomocí izolátoru ADuM1440. Všechny obvody včetně izolátoru jsou nízkopříkonové pro snížení ztrát při napájení vyšším vstupním napětím. U detektorů proudu bylo nutné ošetřit stabilitu při odpojeném výstupu přidáním rezistoru a dvou kondenzátorů. Čas sepnutí a rozepnutí kontaktů relé při daných podmínkách byl změřený, ve firmware vykompenzovaný a ověřený. Na výsledné kartě se nacházejí tři výstupní kanály schopné spínat zátěž až 4 A. Stav kanálů a vstupního napětí je indikován pomocí LED diod. Při připojení zátěže 4 A byla na Schottkyho diodách změřena maximální teplota téměř 70 °C, což je teplota vyhovující daným podmínkám. Pomocí MODBUS registru lze sepnout/rozepnout výstupní kanály.

Dále bylo provedeno měření elektrických vlastností plamene na elektrodě plamene v plynovém kotli Bosch Nefit. Měřeními byly získány voltampérové charakteristiky plamene pro dva různé výkony kotle (6 a 28 kW) a voltampérové charakteristiky pro různé hodnoty součinitele přebytku vzduchu lambda. Měřeními se zároveň zjišťovalo i termionické napětí plamene. Na základě těchto charakteristik a měření, byla zvolena topologie simulátoru plamene skládající se z polovodičové diody, nastavitel-

ného odporu a nastavitelného zdroje napětí. Ověřena tak byla topologie náhradního schématu plamene z patentu US9784449B2. Z naměřených hodnot byly odečteny hodnoty pro určení sklonu charakteristik a byl tak vypočítán diferenční odpor plamene v propustném směru. Tyto hodnoty diferenčního odporu včetně hodnot termionického napětí měly sloužit pro nastavení simulátoru plamene na stejné parametry pro ověření správné funkce.

Karta simulátoru plamene je funkčně nejsložitější kartou. Za úkol má simulovat elektrické vlastnosti plamene a ventilátor. Karta je složena z dílčích částí jako jsou dva digitální vstupy, dva simulátory ventilátoru, vstup pro připojení rotačního enkodéru (pro detekci polohy škrtkového ventilu) a samotného simulátoru plamene. Simulátor ventilátoru přijímá ze vstupu signál PWM, který odděluje izolátor MAX22518 s interním mikro DC/DC měničem. Za izolátorem je zapojený integrovaný obvod LTC2644, který převádí střihu signálu na hodnotu napětí, kterou měří interní A/D převodník mikrokontroléru. Zpětnovazební signál TACHO pak generuje mikrokontrolér a budí tak optočlen, který spíná signál na straně DUT. Simulátor ventilátoru je založen na PI regulátoru, kterému je možné nastavit rozdílné parametry pro náběh a doběh tak, aby byl co nejvíce podobný skutečnému ventilátoru. Ověřením simulátoru plamene bylo provedeno srovnání voltampérových charakteristik simulátoru a reálného plamene. Kvůli reálným parametrům diody se však charakteristiky nepřekrývaly a bylo potřeba dostavit hodnotu napětí a odporu. Charakteristiky se v rozsahu napětí od 0 do 100 V téměř překrývají, a proto lze považovat simulátor za dostatečný.

Celé zařízení složené ze všech aplikačních karet a karty komunikační bylo navrženo a vyrobeno. Nyní testovací zařízení podléhá testování inženýry ve firmě Resideo. Případné nedostatky nebo úpravy byly zároveň řešeny v průběhu vývoje zařízení. Celkem již existuje 1 kompletní sestava a 3 sestavy se čtyřmi základními aplikačními kartami (karta výstupů, digitálních vstupů, digitálních potenciometrů a analogových výstupů) a kartou komunikační. Jedním z možných budoucích rozšíření by mohla být autonomní řídicí karta, jež by nahradila nadřazený řídicí systém (PC) v případě potřeby dlouhodobějšího testování (testy životnosti zařízení).

Firmware jednotlivých aplikačních karet je napsán v programovacím jazyce C a stejně jako ovládací software byl okomentován. Vzhledem k rozsahu příloh byla výrobní data, firmware, software, měření i návrhy napájecích zdrojů přiloženy v elektronických přílohách připojených pouze k tištěné verzi diplomové práce.

Literatura

- [1] KITNER, Radek. *Typy testování software (trídění testů)*. [online]. 2017, 1 [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: https://kitner.cz/testovani_softwaru/typy-testovani-software-trideni-testu/
- [2] BUREŠ, Miroslav, Miroslav RENDA, Michal DOLEŽEL, Peter SVOBODA, Zdeněk GRÖSSL, Martin KOMÁREK, Ondřej MACEK a Radoslav MLYNÁŘ. *Efektivní testování softwaru: klíčové otázky pro efektivitu testovacího procesu*. 1. Praha: Grada, 2016. Profesionál. ISBN 978-80-247-5594-6.
- [3] PATTON, Ron. *Testování softwaru*. Praha: Computer Press, 2002. Programování. ISBN 80-722-6636-5.
- [4] Programátor pragmatik: jak se stát lepším programátorem a vytvářet kvalitní software. *HUNT, Andrew a David THOMAS*. Přeložil Ivo MAGERA, přeložil Lubomír PTÁČEK. Brno: Computer Press, 2007. [cit. 2020-07-07]. ISBN 978-80-251-1660-9.
- [5] KITNER, Radek. *Přehled testovacích technik* [online]. 2017, 1 [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: https://kitner.cz/testovani_softwaru/prehled-testovacich-technik/
- [6] ELLIMS, M., J. BRIDGES a D.C. INCE. *Unit Testing in Practice*. 15th International Symposium on Software Reliability Engineering [online]. IEEE, 2004, 3-13 [cit. 2020-10-28]. ISBN 0-7695-2215-7. ISSN 1071-9458. Dostupné z: DOI:10.1109/ISSRE.2004.44
- [7] MICHALEC, Libor. *Testování elektronických zařízení pro inteligentní budovy*. [online]. 2016, 1 [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/testovani-elektronickyh-zarizeni-pro-inteligentni-budovy.html>
- [8] ESENOWO JACK, Kufre, Emmanuel O. NWANGWU, Israel AGWU ETU a Ernest Ugwunna OSUAGWU. *A Simple Thermistor Design for Industrial Temperature Measurement*. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*. [online]. 2016, 11(05), 57-66. [cit. 2020-10-28]. ISSN 23203331. Dostupné z: DOI:10.9790/1676-1105035766
- [9] *Termistor*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Termistor>

- [10] Texas Instruments Inc [on-line]. *Datasheet 4- to 20-mA Current Loop Transmitter Reference Design*. 4- to 20-mA Current Loop Transmitter Reference Design [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ug/tiduam6/tiduam6.pdf>
- [11] VOJÁČEK, Antonín. *Proudová smyčka 4-20 mA - obecný popis*. [online]. 2014, Vydání 1. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/proudova-smycka-4-20-ma-obecny-popis>
- [12] *Current loop connection*. [online]. Divize b.v., 2012. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://www.divize.com/techinfo/currentloop-connection.html>
- [13] MARGOLIN, Jed. *The Mystery of the Flakey Furnace*. [online]. 2016. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://jmargolin.com/furnace/index.htm>
- [14] *Součinitel přebytku vzduchu*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sou%C4%8Dinitel_p%C5%99ebytku_vzduchu
- [15] Nefit Bosch SupportLine. *Bosch Nefit ProLine Eco HRC24/CW4*. Nefit ProLine Eco HR-ketel. 2020. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.nefit-bosch.nl/producten/cv-ketels/proline-eco>
- [16] EBM Papst. [on-line]. *Datasheet BG-Motor BG 2212*. 1-phase, 1-core internal rotor motor. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: https://www.ebmpapst.us/media/content/products/downloads/Motors_BG_EN.pdf
- [17] *PID regulátor*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001. [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/PID_regul%C3%A1tor
- [18] KAČÍREK, Jiří. *Stavíme kvadrokoptéru: PID regulátor*. ROOT.cz [online]. 2015. [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/stavime-kvadrokopteru-pid-regulator/>
- [19] ŠTĚPÁN, Radek. [online]. *VÍTE, JAK FUNGUJE OBĚHOVÉ ČERPADLO?*. Náš dům. 2016. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.nasdum.eu/vite-jak-funguje-obehove-cerpadlo/>
- [20] Grundfos Holding. [on-line]. *GRUNDFOS DATA BOOKLET*. UPM3. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://api.grundfos.com/literature/Grundfosliterature-5439390.pdf>

- [21] *Jak vybrat oběhové čerpadlo*. Akoupeľnyatopeni.cz [online]. 2018. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.akoupeľnyatopeni.cz/clanky/jak-vybrat-obehove-cerpadlo>
- [22] Grundfos Holding. [on-line]. *Montážní a provozní návod*. ALPHA1 L. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: https://www.cerpadlabezstarosti.cz/index.php?controller=attachment&id_attachment=280
- [23] POUCHA, Pavel. *Komunikace pro průmyslových linkách RS485 a RS422*. PA-POUCH Store. [online]. [cit. 2020-11-05]. Dostupné z: <https://papouch.com/komunikace-pro-prumyslovych-linkach-rs485-a-rs422-p3735/>
- [24] SOLTERO, Manny, Jing ZHANG a Chris COCKRIL. *RS-422 and RS-485 Standards Overview and System Configurations: Application report SLLA070D*. [online]. Texas Instruments, 2020, 25. [cit. 2020-09-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slla070d/slla070d.pdf>
- [25] *Modicon Modbus Protocol Reference Guide: PI-MBUS-300*. [online]. Rev. J. North Andover, Massachusetts 01845: MODICON, 1996. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: https://modbus.org/docs/PI_MBUS_300.pdf
- [26] OSTŘÍŽEK, Tomáš. *Testovací platforma pro board-level testy*. [online]. Brno, 2020. [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/189366>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Marek Bohrn.
- [27] ČSN EN 60950-1: *Zařízení informační technologie - Bezpečnost - Část 1: Všeobecné požadavky*. 2. Praha: Český normalizační institut, 2006. Edice 2.
- [28] STMicroelectronics. *AN2867 Application note: Oscillator design guide for ST microcontrollers*. [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/y7f34bow>
- [29] STMicroelectronics. *STM32L073x8 STM32L073xB STM32L073xZ Datasheet - Production data*. [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l073vb.pdf>
- [30] STMicroelectronics. *AN4467 Application note: Getting started with STM32L0xx hardware development*. [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/2ehhesvy>
- [31] SEIKO EPSON CORPORATION. *CRYSTAL UNIT FA-128*. [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1995792.pdf>

- [32] STMicroelectronics. *RM0367 Reference manual*. Ultra-low-power STM32L0x3 advanced Arm®-based 32-bit MCUs. [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/tfjtj3ts>
- [33] Cypress Semiconductor Corporation [on-line]. *Datasheet PSoC® 5LP: CY8C54LP Family*. Programmable System-on-Chip (PSoC®). [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.cypress.com/file/45926/download>
- [34] DING, Mark. *32-bit MCU Knowledge Base - Serial Wire Debug (SWD)*. Silicon Laboratories. [online]. 2014. [cit. 2020-11-05]. Dostupné z: https://www.silabs.com/community/mcu/32-bit/knowledge-base.entry.html/2014/10/21/serial_wire_debugs-qKCT
- [35] Maxim Integrated. [on-line]. *Datasheet MAX481/MAX483/MAX485/MAX487-MAX491/MAX1487*. Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers. [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1487-MAX491.pdf>
- [36] Maxim Integrated. [on-line]. *Datasheet MAX3483/MAX3485/MAX3486/MAX3488/MAX3490/MAX3491*. 3.3V-Powered, 10Mbps and Slew-Rate-Limited True RS-485/RS-422 Transceivers. [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX3483-MAX3491.pdf>
- [37] Texas Instruments Inc. [on-line]. *Datasheet ISO3080, ISO3082, ISO3086, ISO3088*. ISO308x Isolated 5-V Full- and Half-Duplex RS-485 Transceivers. [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso3088.pdf>
- [38] Texas Instruments Inc. [on-line]. *Datasheet TPD2E001*. TPD2E001 Low-Capacitance 2-Channel ESD-Protection for High-Speed Data Interfaces. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpd2e001.pdf>
- [39] Future Technology Devices International Limited. [on-line]. *FT230X USB TO BASIC UART IC*. USB to BASIC UART IC. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT230X.pdf
- [40] Texas Instruments Inc. [on-line]. *Datasheet ISO7041*. ISO7041 Ultra-Low Power Four-Channel Digital Isolator. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso7041.pdf>

- [41] Littelfuse, Inc. [on-line]. *Datasheet SM712*. TVS Diode Arrays (SPA® Diodes) ® Diodes) General Purpose ESD Protection - SM712. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/240/Littelfuse_TVSDiodeArraySM712_Datasheet.pdf-345740.pdf
- [42] Linear Technology. [on-line]. *Application note AN139*. Power Supply Layout and EMI. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an139f.pdf>
- [43] Multicomp Pro. [on-line]. *Datasheet HTA5U100*. Schottky Barrier Rectifier. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2864107.pdf>
- [44] Coilcraft Inc. [on-line]. *Datasheet PFL3215*. Shielded Power Inductors. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/597/pfl3215-270652.pdf>
- [45] Texas Instruments Inc. [on-line]. *Datasheet LMR16030*. LMR16030 SIMPLE SWITCHER® 60-V, 3-A Step-Down Converter With 40- μ A IQ. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmr16030.pdf>
- [46] Analog Devices Inc. [on-line]. *Datasheet LTC3115-1*. LTC3115-1 - 40V, 2A Synchronous Buck-Boost DC/DC Converter. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3115-1.pdf>
- [47] Exar Corporation. [on-line]. *Datasheet SP483/SP485*. Low Power Half-Duplex RS-485 Transceivers. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.maxlinear.com/ds/sp483-sp485.pdf>
- [48] Maxim Integrated. [on-line]. *Datasheet MAX3430*. \pm 80V Fault-Protected, Fail-Safe, 1/4-Unit Load, +3.3V RS-485 Transceiver. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX3430.pdf>
- [49] Maxim Integrated. [on-line]. *Datasheet MAX3462*. +5V, Fail-Safe, 20Mbps, Profibus RS-485/RS-422 Transceivers. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX3460-MAX3464.pdf>
- [50] Texas Instruments Inc. [on-line]. *Datasheet SN54HCT125, SN74HCT12*. QUADRUPLE BUS BUFFER GATES WITH 3-STATE OUTPUTS. [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hct125.pdf>

- [51] Texas Instruments Inc. [on-line]. *Datasheet TPIC6C595*. TPIC6C595 Power Logic 8-Bit Shift Register. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpic6c595.pdf>
- [52] OMRON Corporation. [on-line]. *Datasheet G5NB PCB Power Relay*. A Miniature Relay with 1-pole 3A/5A Switching Capability and 10 kV Impulse Withstand Voltage. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: https://omronfs.omron.com/en_US/ecb/products/pdf/en-g5nb.pdf
- [53] Analog Devices Inc. [on-line]. *Datasheet AD5753*. Single-Channel, 16-Bit Current and Voltage DAC with Dynamic Power Control and HART Connectivity. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5753.pdf>
- [54] Analog Devices Inc. [on-line]. *Datasheet AD5423*. Single-Channel, 16-Bit Current/Voltage Output DAC with HART Connectivity. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5423.pdf>
- [55] Texas Instruments Inc. [on-line]. *Datasheet LM43601*. LM43601 3.5-V to 36-V, 1-A Synchronous Step-Down Voltage Converter. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm43601.pdf>
- [56] TOSHIBA. [on-line]. *Datasheet TLP222A, TLP222A-2*. TOSHIBA Photocoupler Photorelay. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/461023.pdf>
- [57] TOSHIBA. [on-line]. *Datasheet TLP127*. TOSHIBA Photocoupler GaAs Ired & Photo-Transistor. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/ccdfd686f056bc5ca6d3a147a9b84f06/TLP127-TPL.U.F.pdf>
- [58] AVAGO Technologies. [on-line]. *Datasheet HCPL-0700, HCPL-0701, HCNW138, HCNW139, 6N139, 6N138*. Low Input Current, High Gain Optocouplers. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://docs.broadcom.com/doc/AV02-1359EN>
- [59] AVAGO Technologies. [on-line]. *Datasheet HCPL-4701/-4731/-070A/-073A*. Very Low Power Consumption High Gain Optocouplers. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://www.broadcom.com/products/optocouplers/industrial-plastic/digital-optocouplers/100kbd/hcpl-4701>
- [60] Diodes Incorporated. [on-line]. *Datasheet FMMT458*. 400V NPN HIGH VOLTAGE TRANSISTOR IN SOT23. [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/115/FMMT458-610442.pdf>

- [61] Analog Devices Inc. [on-line]. *Datasheet AD5270/5271*. 1024-/256-Position, 1% Resistor Tolerance Error, SPI Interface and 50-TP Memory Digital Rheostat. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5270_5271.pdf
- [62] Analog Devices Inc. [on-line]. *Datasheet AD5235*. Nonvolatile Memory, Dual 1024-Position Digital Potentiometer. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5235.pdf>
- [63] Texas Instruments Inc. [on-line]. *Datasheet TPL0501*. TPL0501 - 256-Taps, Single-Channel, Digital Potentiometer With SPI Interface. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpl0501-100.pdf>
- [64] Analog Devices Inc. [on-line]. *Datasheet AD5260/AD5262*. 1-/2-Channel 15 V Digital Potentiometer. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5260_5262.pdf
- [65] KEMET Electronics Corporation. [on-line]. *Datasheet EC2-5NU*. Miniature Signal Relays EC2/EE2. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: https://content.kemet.com/datasheets/KEM_R7002_EC2_EE2.pdf
- [66] Analog Devices, Inc. [on-line]. *Datasheet AD5271*. Low Power, Buffered 24-Bit Sigma-Delta ADC. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7791.pdf>
- [67] Texas Instruments Inc. [on-line]. *Datasheet TLV3201, TLV3202*. TLV320x 40-ns, microPOWER, Push-Pull Output Comparators. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv3202.pdf>
- [68] Microchip Technology, Inc. [on-line]. *Datasheet MCP6001/1R/1U/2/4*. 1 MHz, Low-Power Op Amp. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP6001-1R-1U-2-4-1-MHz-Low-Power-Op-Amp-DS20001733L.pdf>
- [69] Microchip Technology, Inc. [on-line]. *Datasheet TC4431/TC4432*. 1.5A High-Speed 30V MOSFET Drivers. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21424d.pdf>
- [70] Texas Instruments Inc. [on-line]. *Datasheet TLV61046A*. TLV61046A 28-V Output Voltage Boost Converter with Power Diode and Isolation Switch. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv61046a.pdf>

- [71] Maxim Integrated. [on-line]. *Application note AN818*. Digital Adjustment of DC-DC Converter Output. Voltage in Portable Applications. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: https://content.kemet.com/datasheets/KEM_R7002_EC2_EE2.pdf
- [72] Texas Instruments Inc. [on-line]. *Datasheet TPS715*. TPS715 50-mA, 24-V, 3.2- μ A Supply Current Low-Dropout Linear Regulator in SC70 Package. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps715.pdf>
- [73] Texas Instruments Inc. [on-line]. *Datasheet TLV7011*. TLV701x and TLV702x Small-Size, Low-Power, Low-Voltage Comparators. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv7011.pdf>
- [74] Texas Instruments Inc. [on-line]. *Analog Engineer's Circuit: Amplifiers SNOA999 - July 2018*. Zero crossing detection using comparator circuit. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/snoa999/snoa999.pdf>
- [75] Diodes Incorporated. [on-line]. *Datasheet PDS1040*. 10A SCHOTTKY BARRIER RECTIFIER POWERDI5. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/Ds30538.pdf>
- [76] TE Connectivity. [on-line]. *Datasheet RT334024 4-1393240-8*. SCHRACK Power PCB Relay RT1. [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: <https://www.te.com/usa-en/product-4-1393240-8.datasheet.pdf>
- [77] Semiconductor Components Industries. [on-line]. *Datasheet NUD3160, SZ-NUD3160*. Industrial Inductive Load Driver. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/nud3160-d.pdf>
- [78] EPCOS AG. [on-line]. *Datasheet S07K275*. Leaded Varistors Standard Series. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://datasheet.octopart.com/S07K275-EPCOS-datasheet-8222148.pdf>
- [79] CURRY, Neil. [on-line]. *ANOTHER ZERO-CROSSING DETECTOR*. 2018. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.nutsvolts.com/questions-and-answers/another-zero-crossing-detector>
- [80] Analog Devices, Inc. [on-line]. *Datasheet ADuM1440*. Micropower Quad-Channel Digital Isolators. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuM1440_1441_1442_1445_1446_1447.pdf

- [81] MARGOLIN, Jed. *Flame sensing system*. 2017. United States. Patent US9784449B2. Přihlášeno 2014-05-30. Zapsáno 2017-10-10. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US9784449B2/en>
- [82] *Časopis pro pěstování matematiky a fyziky*. Vol.63. Nr.7. 1934. ISSN 1802-114X. [on-line]. Dostupné z: <https://dml.cz/handle/10338.dmlcz/122106>
- [83] LANGIUS, Gerwin. *Method for operating a gas burner*. 2012. Netherlands. Patent EP2667097B1. Uděleno 2013-11-27. Zapsáno 2012-05-24. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/EP2667097B1/en>
- [84] Semiconductor Components Industries. [on-line]. *Datasheet FOD819 Series*. FOD819 4-Pin DIP High Speed Phototransistor Optocouplers. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/fod819-d.pdf>
- [85] Maxim Integrated. [on-line]. *Datasheet MAX22517-MAX22519*. Self-Powered, 2-Channel, 3.5kVRMS Digital Isolator. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX22517-MAX22519.pdf>
- [86] Analog Devices, Inc. [on-line]. *Datasheet LTC2644*. Dual 12-/10-/8-Bit PWM to VOUT DACs with 10ppm/°C Reference. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC2644.pdf>
- [87] VANDOREN, Vance. *Princip plánování zesílení*. Control Engineering. [on-line]. 2011. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: [http://www.controlengcesko.com/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews\[tt_news\]=3702](http://www.controlengcesko.com/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=3702)
- [88] Analog Devices, Inc. [on-line]. *Datasheet AD5761R/AD5721R*. Multiple Range, 16-/12-Bit, Bipolar/Unipolar Voltage Output DACs with 2 ppm/°C Reference. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad5761r_5721r.pdf
- [89] Teccor Electronics. [on-line]. *Datasheet Sidac*. Sidac (79 V to 330 V). 2002. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: https://www.digchip.com/datasheets/download_datasheet.php?id=465930&part-number=K2000E70

Seznam symbolů a zkratek

AC	Střídavý proud - Alternate Current
A/D	Analogově-digitální převodník - Analog/Digital
ADU	Aplikační datová jednotka - Application Data Unit
APS	Vzduchový tlakový spínač - Air Pressure Switch
ARM	Zdokonalený kontrolér typu RISC - Advanced RISC Machine
COM	Komunikační port - Communication port
CMOS	Komplementární technologie kov-oxid-polovodič - Complementary Metal Oxide Semiconductor
CRC	Cyklický redundantní součet - Cyclic Redundancy Check
D/A	Digitálně-analogový převodník - Digital/Analog
DC	Stejnosměrný proud - Direct Current
DIN	Německá průmyslová norma - Deutsche Industrie Norm
DIP	Pouzdro pro plastové integrované obvody - Dual In-line Package
DPS	Deska plošných spojů
DUT	Testované zařízení - Device Under Test
EMC	Elektromagnetická kompatibilita - Electromagnetic Compatibility
EMI	Elektromagnetické vyzařování - Electromagnetic Interference
EMS	Elektromagnetická odolnost - Electromagnetic Susceptibility
ESD	Elektrostatický výboj - Electrostatic Discharge
ESR	Ekvivalentní sériový odpor - Equivalent Series Resistance
FMEA	Analýza možného výskytu a vlivu vad - Failure Mode and Effects Analysis
FSM	Konečný stavový automat - Finite-State Machine
FSR	Plný rozsah - Full Scale Range
HDL	Jazyk popisující hardware - Hardware Description Language

HSE	Externí vysokofrekvenční oscilátor - High Speed External clock
HSI	Interní vysokofrekvenční oscilátor - High Speed Internal clock
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise - International Electrotechnical Commission
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci - International Organization for Standardization
LED	Elektroluminiscenční dioda - Light-Emitting Diode
MCU	Mikrokontrolér - Microcontroller Unit
NTC	Negativní teplotní koeficient - Negative Temperature Coefficient
OSI	Architektura otevřených systémů - Open Systems Architecture
PC	Osobní počítač - Personal Computer
PDU	Protokolová datová jednotka - Protocol Data Unit
PE	Ochranný vodič (zem) - Protected Earth
PLD	Programovatelný logický obvod - Programmable Logic Device
PLL	Smyčka fázového závěsu - Phase Locked Loop
PSoC	Programovatelný systém na čipu - Programmable System on Chip
PTC	Pozitivní teplotní koeficient - Positive Temperature Coefficient
PWM	Pulsní šířková modulace - Pulse Width Modulation
SEPIC	Měníč typu jednostranná primární indukční cívka - Single-Ended Primary Inductance Converter
SPI	Sériové periferní rozhraní - Serial Peripheral Interface
SSR	Polovodičové relé - Solid State Relay
SWD	Sériová ladící linka - Serial Wire Debug
TUE	Celková chyba D/A nebo A/D převodníku - Total Unadjusted Error
TVS	Omezovač přechodových napětí - Transient Voltage Suppressor
UART	Univerzální asynchronní sériová sběrnice - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

UDB	Univerzální digitální blok - Universal Digital Block
USB	Univerzální sériová sběrnice - Universal Serial Bus
UVLO	Blokování při podpětí - Undervoltage Lockout

Seznam obrázků

1.1	Orientační charakteristiky závislosti elektrického odporu na teplotě u NTC a PTC termistorů.	18
1.2	Dvou vodičové provedení proudové smyčky. Převzato z [12].	19
1.3	Řez plynovým kotlem Bosch Nefit ProLine Eco HRW24/CW4. Převzato z [15].	21
1.4	Standardní rozhraní pro řízení ventilátoru firmy EBM Papst. Převzato z [16].	22
1.5	Základní schéma PID regulátoru.	23
1.6	Standardní rozhraní pro řízení čerpadla firmy Grundfos. Převzato z [20].	24
1.7	Základní tvar MODBUS zprávy. Převzato z [25].	26
1.8	Vykonávání operace s MODBUS protokolem s bezchybným provedením požadavku. Převzato z [25].	27
1.9	Vykonávání operace s MODBUS protokolem s chybným provedením požadavku. Převzato z [25].	27
2.1	Rozvaděč s jistícími prvky a výstupem 24 V~.	30
2.2	Blokové schéma funkčních a měřicích karet.	31
2.3	Blokové schéma komunikační karty.	32
3.1	Zapojení krystalu HSI a reset periférie mikrokontroléru STM32 dle aplikačních poznámek AN2867 [28].	33
3.2	Zapojení 16-ti polohového rotačního enkodéru pro volbu adresy karty.	35
3.3	Zapojení programovacího/debugovacího konektoru pro připojení programátoru s rozhraním SWD k mikrokontroléru.	35
3.4	Blokové schéma páteřní sítě a jejího propojení s kartami pomocí RS-485.	36
3.5	Zapojení převodníku mezi rozhraním UART a RS-485.	36
3.6	Základní deska pro připojení aplikačních karet.	37
4.1	USB vstup na komunikační kartě s ESD ochranou.	38
4.2	Zapojení převodníku USB na UART.	38
4.3	Zapojení izolátoru komunikace pro galvanické oddělení.	39
4.4	Převodník UART na RS-485 s ochranou.	39
4.5	Vstupní usměrňovací můstek tvořený Schottkyho diodami s filtračními kondenzátory.	40
4.6	První varianta napájecího zdroje s integrovaným obvodem LMR16030.	41
4.7	Druhá varianta napájecího zdroje s integrovaným obvodem LTC3115.	42
4.8	Vyrobená a naprogramovaná komunikační a napájecí karta.	43
4.9	Snímek z termokamery při zatížení napájecího zdroje zátěží 24 Ω.	43

4.10	Krátký zákmit (glitch) na konci paketu komunikačního rozhraní po převodu z RS-485 na UART.	44
4.11	Ošetřené generování zákmitu (glitche) pomocí kondenzátorů s hodnotou 2,2 nF.	45
4.12	Zapojení budiče pro spínání relátek a pomocných obvodů.	46
4.13	Výstup integrovaného obvodu TPIC6C595. Převzato z [51].	46
4.14	Vyrobená a naprogramovaná karta výstupů.	47
4.15	Snímek z termokamery při sepnutí všech relé.	48
4.16	Měnič napětí z +15 V na -15 V použitý na desce s analogovými výstupy.	50
4.17	Blokové zapojení desky analogových výstupů.	50
4.18	Analogový výstup s integrovaným obvodem AD5423.	51
4.19	Vyrobená a naprogramovaná karta analogových výstupů.	52
4.20	Snímek z termokamery při zatížení všech výstupů proudem -24 mA (nejhorší možný případ).	53
4.21	Absolutní chyba nastavené hodnoty D/A převodníku AD5423 při nastavených napěťových výstupech.	54
4.22	Relativní chyba nastavené hodnoty D/A převodníku AD5423 při nastavených napěťových výstupech.	55
4.23	Absolutní chyba nastavené hodnoty D/A převodníku AD5423 při nastavených proudových výstupech.	55
4.24	Relativní chyba nastavené hodnoty D/A převodníku AD5423 při nastavených proudových výstupech.	56
4.25	Zapojení digitálního vstupu s nastavitelnými prahovými úrovněmi.	58
4.26	Zapojení digitálního vstupu v simulátoru LTspice.	59
4.27	Výsledky simulace digitálního vstupu pro vstupní signál o napětí 230 V střídavých.	60
4.28	Výsledky simulace digitálního vstupu pro nízké vstupní stejnosměrné napětí.	60
4.29	Ověření ztrátového výkonu a proudu tranzistorem při vstupním signálu 230 V střídavých.	62
4.30	Ověřená simulace pomocí reálného měření na digitálním vstupu.	63
4.31	Ověřená simulace pomocí reálného měření na digitálním vstupu.	65
4.32	Vyrobená a naprogramovaná karta digitálních vstupů.	66
4.33	Snímek z termokamery při připojení 230 V střídavých na všechny vstupy.	66
4.34	Snímek z termokamery při připojení 230 Vrac na všechny vstupy (nejhorší možný případ).	67
4.35	Zapojení odporového výstupu s digitálními potenciometry.	69
4.36	Varianty kombinace spínačů A až D, popsané v textu výše.	70

4.37	Převodník analogového napětí na digitální signál pro kontrolu funkčnosti digitálních potenciometrů.	71
4.38	Vyrobená a naprogramovaná karta digitálních potenciometrů.	72
4.39	Relativní chyba nastaveného odporu.	74
4.40	Absolutní chyba nastaveného odporu.	74
4.41	Zapojení digitálního vstupu pro měření frekvence a střídy signálu. . .	77
4.42	Zapojení digitálního výstupu pro generování PWM signálu.	77
4.43	Zapojení nastavitelného napájecího zdroje pro možnost nastavení výstupů typu Push-Pull.	78
4.44	Nastavení napětí napájecího zdroje měřené pomocí digitálního multimetru a interního A/D převodníku v PSoC.	79
4.45	HDL návrh PWM vstupu pro měření frekvence a střídy.	80
4.46	HDL návrh PWM výstupu.	81
4.47	HDL návrh komunikačních bloků UART s časovačem vypršení.	81
4.48	HDL návrh A/D a D/A převodníků.	82
4.49	Vyrobená a naprogramovaná karta PWM vstupů a výstupů.	82
4.50	Výstupní kanály nastavené na dané frekvence a střídy popsané v tabulce 4.15, zobrazené na osciloskopu.	83
4.51	Relativní chyba hodnoty střídy nastavená generátorem Tektronix AFG 3022 a změřená pomocí PWM vstupů.	84
4.52	Absolutní chyba hodnoty střídy nastavená generátorem Tektronix AFG 3022 a změřená pomocí PWM vstupů.	85
4.53	Blokové schéma karty pro napájení DUT.	87
4.54	Zapojení napájecího zdroje s proudovým zdrojem pro detektory průchodu napětí nulou a průchodu proudu nulou.	88
4.55	Zapojení jednoho kanálu detektoru procházejícího střídavého proudu s komparátorem TLV7011 [73].	89
4.56	Zapojení detektoru průchodu napětí nulou.	89
4.57	Zapojení digitálního izolátoru pro přenos detekčních pulsů.	90
4.58	Zapojení detektoru průchodu napětí nulou a průchodu proudu nulou v simulátoru LTspice.	91
4.59	Výsledky simulace detektoru průchodu napětí nulou a detektor průchodu proudu nulou pro vstupní signál s napětím 24 V střídavých a průchozím proudem 100 mA.	92
4.60	Nestabilní detekce průchozího proudu při odpojené zátěži a s připojeným napájením.	93
4.61	Zapojení opraveného kanálu detektoru procházejícího střídavého proudu s komparátorem TLV7011.	94

4.62	Normální funkce detektorů při připojené zátěži s protékajícím proudem 100 mA a při napájecím napětí 24 V střídavých.	94
4.63	Průběh sepnutí výstupního kanálu při nulovém napětí zachycený osciloskopem.	95
4.64	Průběh rozepnutí výstupního kanálu při nulovém proudu zachycený osciloskopem.	96
4.65	Vyrobená a naprogramovaná karta pro napájení DUT.	97
4.66	Snímek z termokamery při připojení protékajícího proudu 4 A přes detektor proudu.	97
4.67	Zapojení testovaného plynového kotle Bosch Nefit.	99
4.68	Schéma zapojení pro měření voltampérové charakteristiky plamene.	100
4.69	Voltampérová charakteristika plamene pro výkon kotle 6 kW a lambda 1,3.	101
4.70	Voltampérová charakteristika plamene pro výkon kotle 28 kW a lambda 1,3.	101
4.71	Detailní voltampérová charakteristika plamene pro výkon kotle 6 kW a lambda 1,3.	103
4.72	Detailní voltampérová charakteristika plamene pro výkon kotle 28 kW a lambda 1,3.	103
4.73	Voltampérová charakteristika plamene pro různé hodnoty lambda při konstantních otáčkách ventilátoru.	104
4.74	Závislost proudu elektrodou plamene při nulovém napětí na hodnotě lambda.	105
4.75	Obvody pro simulaci ventilátoru a galvanické oddělení od DUT.	106
4.76	Obvody pro měření řídicího PWM signálu pro ventilátor.	106
4.77	Obvody pro detekci polohy škrťacího ventilu.	107
4.78	Topologie zapojení simulátoru plamene.	108
4.79	Simulátor plamene.	109
4.80	Vyrobená a naprogramovaná karta simulátoru plamene.	110
4.81	Srovnání voltampérových charakteristik plamene a simulátoru plamene pro výkon kotle 6 kW a lambda 1,3.	111
4.82	Srovnání voltampérových charakteristik plamene a simulátoru plamene pro výkon kotle 28 kW a lambda 1,3.	111
6.1	Výsledný prototyp testovacího zařízení pro automatizované testování řídicích jednotek plynových kotlů.	116

Seznam tabulek

1.1	Přehled stavů pro vstupní PWM signál čerpadla. Převzato z [20, 22].	25
1.2	Přehled stavů pro zpětnovazební PWM signál čerpadla. Převzato z [20, 22].	25
1.3	Přehled struktury funkčního kódu 0x03 protokolu MODBUS [25]. . .	28
1.4	Přehled struktury funkčního kódu 0x06 protokolu MODBUS [25]. . .	28
1.5	Přehled struktury funkčního kódu 0x10 protokolu MODBUS [25]. . .	28
3.1	Přehled enkódování adres funkčních a měřicích karet.	34
4.1	Přehled registrů a funkčních kódů pro ovládání karty výstupů.	48
4.2	Přehled výstupů na konektorech.	49
4.3	Přehled registrů a funkčních kódů pro ovládání karty analogových výstupů.	56
4.4	Přehled výstupů na konektorech.	57
4.5	Přehled možných optočlenů pro návrh digitálních vstupů a jejich parametry [57, 58, 59].	59
4.6	Porovnání prahové hodnoty teoretické a naměřené.	64
4.7	Porovnání vstupních a naměřených hodnot frekvence a střidy pomocí digitálního vstupu na kanálu 1.	64
4.8	Přehled registrů a funkčních kódů pro ovládání karty digitálních vstupů.	68
4.9	Přehled výstupů na konektorech.	68
4.10	Přehled možných digitálních potenciometrů a jejich parametry [61, 62, 63, 64].	69
4.11	Hodnoty odporu digitálních potenciometrů AD5270 naměřené pomocí A/D převodníku AD7791.	75
4.12	Přehled nejdůležitějších registrů a funkčních kódů pro ovládání karty digitálních potenciometrů.	75
4.13	Přehled výstupů na konektorech.	76
4.14	Přehled nastavení DIP přepínače pro limitování výstupního napětí. .	80
4.15	Změřené hodnoty frekvence a střidy PWM výstupů pomocí osciloskopu.	84
4.16	Přehled registrů a funkčních kódů pro ovládání karty PWM výstupů.	86
4.17	Přehled registrů a funkčních kódů pro ovládání karty PWM vstupů. .	86
4.18	Přehled výstupů na konektorech.	86
4.19	Přehled registrů a funkčních kódů pro ovládání karty pro napájení DUT.	98
4.20	Přehled výstupů na konektorech.	98
4.21	Přehled nejdůležitějších registrů a funkčních kódů pro ovládání karty simulátoru plamene.	113
4.22	Přehled výstupů na konektorech.	113

Seznam výpisů

5.1	Načtení knihoven a používaných funkcí.	114
5.2	Nastavení COM portu pro komunikační rozhraní.	114
5.3	Přiřazení adresy kartě digitálních vstupů.	114
5.4	Ukončení komunikace uzavřením COM portu.	114
5.5	Zápis hodnoty 0xFFFF do registru 0x0104 karty digitálních vstupů. .	114
5.6	Vyčtení hodnoty z registru 0x0104 karty digitálních vstupů.	115
5.7	Zápis hodnoty 96500 Ω do digitálního potenciometru 1 ve formátu float.	115
5.8	Vyčtení hodnoty digitálního potenciometru 1 ve formátu float.	115
B.1	Stavový automat pro měření frekvence a střídavy vstupního signálu. . .	143

Seznam příloh

A Obsah elektronické přílohy	142
B Zdrojové kódy	143

A Obsah elektronické přílohy

V přiložené elektronické příloze se nachází návrhy napájecích zdrojů s integrovanými obvody LMR16030 a LM43601 vygenerované aplikací WEBENCH® Design Center firmy Texas Instruments, schéma zapojení jednotlivých karet a naměřená data. Vzhledem k velikosti výrobních dat se nachází návrhy hardware jednotlivých karet, firmware pro každou desku obsahující mikrokontrolér a testovací skript v jazyce Python pro ovládání testovacího zařízení pouze na přiloženém USB flash disku k tištěné diplomové práci.

```
/ ..... Kořenový adresář přiloženého USB flash disku
|_ BOM_CompleteOrderPartlist.xlsx ..... Kompletní seznam součástí včetně
   objednacích čísel (Farnell a Mouser) a generátoru položek
|_ DES_LM43601_Design.pdf ..... Návrh napájecího zdroje s integrovaným obvodem
   LM43601
|_ DES_LMR16030_Design.pdf ..... Návrh napájecího zdroje s integrovaným obvodem
   LMR16030
|_ FW_ACRelay_Board.zip ..... Kompletní firmware karty pro napájení DUT
|_ FW_Analog_Output_Board.zip... Kompletní firmware karty analogových výstupů
|_ FW_Flame_Board.zip ..... Kompletní firmware karty simulátoru plamene
|_ FW_Input_Board.zip ..... Kompletní firmware karty digitálních vstupů
|_ FW_NTC_Board.zip ..... Kompletní firmware karty digitálních potenciometrů
|_ FW_PSOC_PWM_Board.zip ..... Kompletní firmware karty PWM vstupů a výstupů
|_ FW_Relay_Board.zip ..... Kompletní firmware karty výstupů
|_ HW_ACRelay_Board.zip ..... Kompletní výrobní data karty pro napájení DUT
|_ HW_Analog_Output_Board.zip ..... Kompletní výrobní data karty analogových
   výstupů
|_ HW_Backplane.zip ..... Kompletní výrobní data základní desky
|_ HW_Communication_Board.zip ..... Kompletní výrobní data komunikační karty
|_ HW_Flame_Simulator_Board.zip ..... Kompletní výrobní data karty simulátoru
   plamene
|_ HW_Input_Board.zip ..... Kompletní výrobní data karty digitálních vstupů
|_ HW_LED_Panel_for_Input_Board.zip.. Kompletní výrobní data LED panelu pro
   kartu digitálních vstupů
|_ HW_LED_Panel_for_Relay_Board.zip.. Kompletní výrobní data LED panelu pro
   kartu vstupů
|_ HW_NTC_Board.zip ..... Kompletní výrobní data karty digitálních potenciometrů
|_ HW_PWM_Board.zip ..... Kompletní výrobní data karty PWM vstupů a výstupů
|_ HW_Relay_Board.zip ..... Kompletní výrobní data karty výstupů
|_ MEAS_Measurements.zip ..... Naměřená data různých karet
|_ SW_Python_Script.zip ..... Zjednodušený skript pro ovládání karet testovacího
   zařízení
```

B Zdrojové kódy

Zdrojový kód pro stavový automat, který slouží pro měření frekvence a střídání vstupního signálu. Kód je psaný v jazyce Verilog. Je součástí firmware pro desku PWM vstupů a výstupů.

Výpis B.1: Stavový automat pro měření frekvence a střídání vstupního signálu.

```
module FSM (
    output reg DONE, // Definice výstupního registru pro příkaz dokončení čítání
    output reg HI_EN, // Definice výstupního reg. signálu pro čítání log. úrovně 1
    output reg LO_EN, // Definice výstupního reg. signálu pro čítání log. úrovně 0
    output reg RESET_OUT, // Definice výstupního reg. signálu pro reset log. obvodu
    input CLK, // Definice vstupního hodinového signálu
    input IN_SIG, // Definice vstupního měřeného signálu
    input RESET, // Definice vstupu pro reset měření
    input START // Definice vstupu pro spuštění měření
);

// Deklarace stavů
localparam ST_IDLE = 2'd0;
localparam ST_HI = 2'd1;
localparam ST_LO = 2'd2;
localparam ST_DONE = 2'd3;

// Deklarace pomocných registrů
reg flag_lo;
reg flag_hi;
reg [1:0] state;

always @(posedge CLK)
begin
    if (!RESET) // Pokud se nachází vstupní signál reset v logické úrovni 0,
        begin // pak je nastaven stav IDLE
            state <= ST_IDLE;
            RESET_OUT <= 1;
            HI_EN <= 0;
            LO_EN <= 0;
            DONE <= 0;
            flag_lo <= 0;
            flag_hi <= 0;
        end
    else
        begin // Pokud se vstupní signál reset dostane do logické úrovně 1,
            // pak se čeká na spuštění měření
            RESET_OUT <= 0; // Nejprve se zruší reset čítačů
            HI_EN <= 0; // Zakáže se spuštění čítače pro horní úroveň signálu
            LO_EN <= 0; // Zakáže se spuštění čítače pro dolní úroveň signálu
            DONE <= 0; // Výstupní indikace dokončení měření se zruší
            case (state)
                ST_IDLE:
                    begin
                        flag_lo <= 0; // Příznak pro měření dolní úrovně se zruší
                        flag_hi <= 0; // Příznak pro měření dolní úrovně se zruší
                        RESET_OUT <= 1; // Proveďte se reset všech čítačů
                        if (START) // Pokud přijde povel spuštění měření,
                            begin // čeká se na dolní úroveň signálu
```

```

        if(!IN_SIG)
        begin
            RESET_OUT    <= 0;    // Zruší se povel pro resetování čítačů
            state        <= ST_LO; // Nastaví se stav pro měření spodní
        end                // úrovně signálu
    end
end

ST_HI:
begin
    HI_EN            <= 1;    // Spuštění měření logické úrovně 1
    if (!IN_SIG)    // Ochrana před spuštěním měření mezi dobou
    begin            // náběhu a seběhu hrany
        HI_EN        <= 0;    // Vypnutí měření logické úrovně 1
        LO_EN        <= 1;    // Spuštění měření logické úrovně 0
        state        <= ST_LO; // Nastaví se stav pro měř. spodní úrovně signálu
        flag_lo      <= 1;    // Příznak měření spodní hrany se nastaví
    end
end

ST_LO:
begin
    if (flag_lo)
        LO_EN        <= 1; // Pokud se příznak dostane do logické 1,
    if (IN_SIG)    // pak se přepne na čítání log. úrovně 0
    begin
        LO_EN        <= 0; // Ukončení měření logické úrovně 0
        HI_EN        <= 1; // Spuštění měření logické úrovně 1
        state        <= ST_HI; // Nastaví se stav pro měření horní úrovně signálu
        flag_hi      <= 1; // Příznak měření horní hrany se nastaví
        if (flag_hi)
        begin
            state <= ST_DONE; // Přejchod do stavu dokončení měření
            HI_EN <= 0;    // Ukončení měření logické úrovně 1
        end
    end
end

ST_DONE:
begin
    DONE <= 1;    // Indikace dokončení měření a vymazání příznaků
    flag_lo <= 0;
    flag_hi <= 0;
end

    default: state <= ST_IDLE;    // Defaultní stav v případě skoku mimo stavy

endcase
end
end
endmodule

```