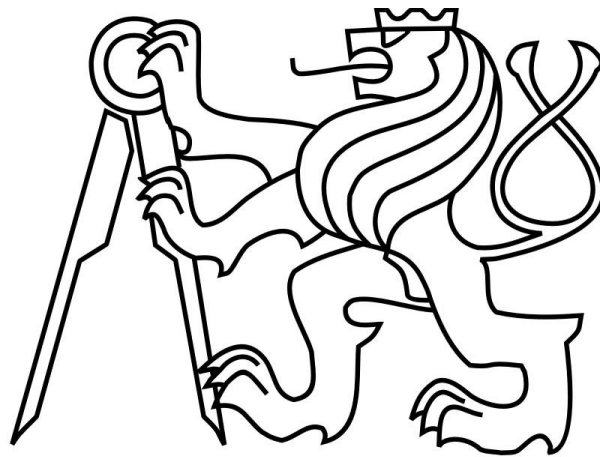


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky



Diplomová práce

Měřicí systém pro analýzu teplotního pole PLC modulů

Autor: Bc. Michal Fuxa

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Janíček, Ph.D.

2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Fuxa Jméno: Michal Osobní číslo: 439571
Fakulta/ústav: Fakulta elektrotechnická
Zadávající katedra/ústav: Katedra mikroelektroniky
Studijní program: Elektronika a komunikace
Specializace: Elektronika

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Měřicí systém pro analýzu teplotního pole PLC modulů

Název diplomové práce anglicky:

PLC Module Temperature Analyser

Pokyny pro vypracování:

- 1) Prostudujte referenční topný a měřicí systém pro Simatic ET200 MP, určete klíčové vlastnosti (systém slouží pro měření teplotního pole na povrchu testovaného modulu, testovaný modul zároveň tepelně exponuje – simulace reálného provozu).
- 2) Navrhněte rozšíření výše uvedeného systému, tak aby umožňoval reprodukovat teplotní pole libovolného modulu ET200 MP. Koncept musí být navržen s ohledem na budoucí využití u dalších řad z rodiny Simatic.
- 3) Klíčové vlastnosti systému jsou reprodukovatelnost měření, reprodukovatelnost výroby měřicího zařízení, maximální chyba měření teploty ± 1 °C, potlačení závislosti teplotního profilu na napájecím napětí, rozsah provozní teploty: 25 °C – 100 °C, rozsah napájecího napětí: 19,2 V – 28,8 V, vstupní a výstupní data měřicího systému budou v textovém nebo CSV formátu.
- 4) Určete přesnost systému pro měření a reprodukci teplotního pole. Proveďte diskusi vnějších vlivů na měřicí systém (okolní teplota, napájecí napětí, poloha systému, proudění vzduchu).
- 5) Porovnejte dosažené výsledky pro vybrané moduly Simatic ET200 MP.

Seznam doporučené literatury:

- 1) Norma IEC 61131 - Industrial-Process Measurement and Control - Programmable Controllers.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vladimír Janiček, Ph.D., katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: 30.01.2020

Termín odevzdání diplomové práce: 14.08.2020

Platnost zadání diplomové práce: 30.09.2021

Ing. Vladimír Janiček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování

„Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce doktoru Janíčkovi za cenné rady a připomínky v průběhu práce. Rovněž bych chtěl poděkovat všem kolegům ze společnosti Siemens, kteří se se mnou ochotně dělili o své znalosti a zkušenosti z oboru. Poděkování za podporu během celého studia náleží rodině a mé partnerce.“

Anotace

Cílem práce je vývoj modulů pro teplotní testování modulárních PLC z rodiny Siemens Simatic. Moduly mohou tepelně exponovat testované zařízení teplotním profilem jakéhokoli skutečného zařízení ze stejné řady. Moduly jsou navíc vybaveny funkcí automatického měření teplotní matice na bočních stěnách testovaného zařízení. Práce se rovněž zabývá vývojem měděných (odporových) teplotních senzorů, integrovaných v desce plošného spoje.

Klíčová slova: teplotní testy, měření teploty, Sigma-Delta AD převodník, Multiplexor

Abstract

The main goal of this work is the development of modules for temperature testing of modular PLC's from the Siemens Simatic family. The modules can thermally expose the device under test to the temperature profile of any real device from the same series. In addition, the modules are equipped with the function of automatic measurement of the temperature matrix on the side walls of the tested device. Thesis also deals with the development of copper (resistance) temperature sensors integrated in the printed circuit board.

Keywords: temperature tests, temperature measurement, RTD, Sigma-Delta ADC, Multiplexer, PLC

Obsah

Úvod.....	1
1. Teoretický rozbor	2
1.1. Klimatické testy.....	2
1.1.1. Klimatické testy dle normy	2
1.1.2. Současná testovací sestava	3
1.2. Požadavky na nový systém.....	4
1.2.1. Konstrukční provedení	4
1.2.2. Měření teploty	4
1.2.3. Topný systém	4
1.2.4. Napájení.....	4
1.2.5. Řízení a komunikace	5
2. Návrh řešení.....	6
2.1. Rámcová představa.....	6
2.1.1. Základní provedení modulů.....	6
2.1.2. Řídící deska	7
2.1.3. Topná deska.....	8
2.1.4. Deska se senzory	8
2.2. Volba teplotního senzoru.....	8
2.2.1. Platinové teplotní senzory	8
2.2.2. Termistory	9
2.2.3. Měděné teplotní senzory.....	10
2.3. Zkušební měření pro měděné senzory	10
2.3.1. Odhad parametrů	10
2.3.2. Zkušební deska	11
2.3.3. Měření	13
2.3.4. Naměřené hodnoty a kalibrace	14
2.3.5. Test stability senzorů.....	16
2.3.6. Zhodnocení použitelnosti	17
2.4. Způsob vyhodnocení odporových senzorů	18
2.4.1. Ohmova metoda	18
2.4.2. Sériová srovnávací metoda.....	19
2.5. Výběr AD převodníku	19
2.5.1. Požadavky na AD převodník.....	20
2.5.2. Sigma-Delta ADC	20
2.6. Vytápění	21
2.6.1. Topné elementy	21
2.6.2. Řízení výkonu a napájení topných elementů.....	22
2.6.3. Omezení vlivu napájecího napětí	24
3. Vývoj prototypu.....	25
3.1. Konstrukční řešení.....	25
3.1.1. Konstrukční kryty.....	25
3.1.2. Vnitřní uspořádání.....	26
3.2. Sensorová deska.....	27
3.2.1. Zapojení sensorové matice	27
3.2.2. Multiplexory	28
3.2.3. Referenční teplotní senzor.....	30
3.2.4. Konektor pro flexibilní kabel	31
3.2.5. Návrh DPS.....	32
3.3. Topná deska.....	34
3.3.1. Topné elementy	34
3.3.2. Počet elementů a jejich rozvržení.....	35

3.4.	Řídící deska	37
3.4.1.	Struktura napájení.....	37
3.4.2.	Návrh zdroje pro 3V3 větev	39
3.4.3.	Komunikace.....	40
3.4.4.	Analogová část	41
3.4.5.	PWM signál.....	44
3.4.6.	Mikrokontrolér	45
3.4.7.	Specifika návrhu DPS	47
4.	Oživení prototypu a příprava měření.....	49
4.1.	Oživení prototypu.....	49
4.1.1.	Vývojové prostředí	49
4.1.2.	Konfigurace ADC AD7193.....	49
4.1.3.	Konfigurace multiplexorů ADG731	50
4.1.4.	PWM řadiče PCA9685	51
4.1.5.	Regulace topných elementů.....	51
4.1.6.	Zpracování dat	52
4.2.	Kalibrace a testy	53
4.2.1.	Kalibrace senzorové matice.....	53
4.2.2.	Měření teplotního profilu	54
4.2.3.	Kalibrace topných elementů.....	55
4.2.4.	Ověření replikovaného teplotního profilu	56
5.	Zhodnocení výsledků měření.....	57
5.1.	Kalibrace a měření teploty	57
5.1.1.	Chyba při výběru AD převodníku	57
5.1.2.	Kalibrace teplotních senzorů	58
5.1.3.	Nevhodné zvolení měřicího bodu.....	59
5.1.4.	Odhad chyby měření	61
5.2.	Replikace teplotního profilu.....	63
5.2.1.	Příprava kalibrace topných elementů	63
5.2.2.	Výsledky replikace teplotního profilu	64
Závěr.....		68

Seznam použitých zkratek

ADC	Analog-Digital Converter
DC	Direct Current
DPS	Deska plošných spojů
EUT	Equipment Under Test
GPIO	General-purpose input/output
HAL	Hardware Abstraction Layer
HN	Heating Neighbours
I/O	Input/Output
I2C	Inter-Integrated Circuit
LED	Light-Emitting Diode
MCU	Microcontroller unit
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PCB	Printed circuit board
PGA	Programable Gain Array
PLC	Programmable Logic Controller, programovatelný logický automat
PPM	Parts Per Million
PWM	Pulse-Width Modulation
RTD	Resistance Remperature Detector
SMD	Surface-Mount Device
SPI	Serial Peripheral Interface
TI	Texas Instruments
TM	Thermally Representative Module
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter

Seznam obrázků

Obr. 1 - Příklad modulu z řady S7-1500 [4].....	1
Obr. 2 - Umístění modulů s ventilačními otvory v klimatické komoře.....	3
Obr. 3 - Návrh základních bloků testovacího modulu.....	6
Obr. 4 - Ideové blokové schéma řídicí desky.....	7
Obr. 5 - příklad charakteristiky NTC a PTC termistoru [8].....	9
Obr. 6 - Příklad senzoru tvořeného měděnou cestou v DPS.....	10
Obr. 7 - legenda pro výpočet odporu vodivé cesty na jádru (core) plošného spoje.....	11
Obr. 8 - Typy senzorů na zkušební DPS - a) 10 mm x 10 mm (cca 5 Ω), b) dvouvrstvý 10 mm x 10 mm (cca 10 Ω), c) 15 mm x 15 mm (cca 10 Ω).....	12
Obr. 9 - zkušební deska pro měděné teplotní senzory.....	12
Obr. 10 – Graf požadovaného průběhu teploty v klimatické komoře.....	13
Obr. 11 - Provizorní kovový kryt desky s měděnými senzory teploty.....	14
Obr. 12 - Ukázka proložení naměřených hodnot přímkou.....	15
Obr. 13 - Reálný průběh teploty při tepelném namáhání.....	17
Obr. 14 - Ohmova metoda pro malé odpory, a) dvousvorkové zapojení a b) čtyřsvorkové zapojení... ..	18
Obr. 15 - příklad sériové srovnávací metody měření odporu pomocí A-D převodníku.....	19
Obr. 16 - Blokové schéma Σ - Δ modulátoru [14].....	20
Obr. 17 - Potlačení a tvarování šumu ve frekvenční oblasti a blokové schéma Σ - Δ ADC [15].....	21
Obr. 18 - čipové SMD rezistory.....	22
Obr. 19 - Ukázka průběhu napětí s různou hodnotou střídavy [17].....	23
Obr. 20 - Provedená úprava konstrukčního krytu.....	26
Obr. 21 - Vnitřní uspořádání modulu.....	27
Obr. 22 - Princip zapojení měřicí smyčky.....	28
Obr. 23 - Zapojení multiplexorů ADG731.....	29
Obr. 24 - Příklad diferenciálního měření pomocí dvou multiplexorů.....	30
Obr. 25 - Zapojení referenčního senzoru teploty Pt1000.....	31
Obr. 26 - Zapojení konektoru pro senzorovou desku.....	31
Obr. 27 - Provedení teplotního senzoru v matici.....	32
Obr. 28 - Provedení senzorové DPS.....	33
Obr. 29 - Zapojení topného elementu.....	35
Obr. 30 - Umístění spínacích tranzistorů na DPS.....	35
Obr. 31 - Erni MicroSpeed [19].....	36
Obr. 32 - Rozvržení topných elementů.....	36
Obr. 33 - Blokové schéma napájecího řetězce.....	37
Obr. 34 - Vstupní obvody napájecího napětí.....	37
Obr. 35 - Přenosová frekvenční charakteristika dolní propusti [20].....	38
Obr. 36 - Ukázka formuláře v aplikaci WEBENCH®.....	39
Obr. 37 – Zapojení snižujícího měniče pro napájecí větev 3V3.....	40
Obr. 38 - schéma komunikační části.....	41
Obr. 39 - Zapojení AD převodníku AD7193.....	42
Obr. 40 – RC dolní propust pro analogové vstupy ADC.....	43
Obr. 41 - RC dolní propust pro vstup reference s referenčním rezistorem.....	43
Obr. 42 - Zapojení PWM řadiče PCA9685.....	45
Obr. 43 - Zapojení MCU.....	46
Obr. 44 - Řídicí DPS.....	47
Obr. 45 - Diagram časování průběhů pro multiplexor ADG731 [18].....	50
Obr. 46 - Kalibrace matice teplotních senzorů.....	53
Obr. 47 - Měření teplotního profilu.....	54
Obr. 48 - Kalibrace topných elementů.....	55
Obr. 49 - Zapojení bufferu před referenční vstup ADC.....	58
Obr. 50 - Příklad kalibračních odchylek při nesprávně provedené kalibraci.....	59

Obr. 51 - Chyba měření způsobená nevhodným zvolením měřicího bodu	60
Obr. 52 - Rozvržení regulačních skupin.....	63
Obr. 53 – Vzorek 1, horizontální pozice, 60 °C (zdroj vlevo, výsledek vpravo)	64
Obr. 54 – Vzorek 2, horizontální pozice, 60 °C (zdroj vlevo, výsledek vpravo)	65
Obr. 55 - Vzorek 1, vertikální pozice, 40 °C (zdroj vlevo, výsledek vpravo).....	65
Obr. 56 - Vzorek 2, vertikální pozice, 40 °C (zdroj vlevo, výsledek vpravo).....	66

Seznam tabulek

Tab. 1 - Výběr z naměřených hodnot odporu	15
Tab. 2 - Výběr z vypočtených hodnot teploty	16
Tab. 3 - Výběr z hodnot odchylek od referenční teploty	16
Tab. 4 - výběr z hodnot odchylky od reference po tepelném namáhání	17
Tab. 5 - Seznam požadavků na výběr MCU	46
Tab. 6 - tabulka interních registrů ADC AD7193	50
Tab. 7 - Vzorek 1, horizontální pozice, 60 °C	64
Tab. 8 - Vzorek 2, horizontální pozice, 60 °C	65
Tab. 9 - Vzorek 1, vertikální pozice, 40 °C	66
Tab. 10 - Vzorek 2, vertikální pozice, 40 °C	66

Úvod

PLC neboli Programmable Logic Controller (česky programovatelný logický automat) je průmyslový řídicí počítač, sloužící k řešení různorodých automatizačních úloh. PLC se používají například v průmyslové výrobě, energetice a ve spoustě dalších odvětví. Vyskytují se buď v kompaktní podobě, kdy je řídicí část včetně vstupů a výstupů zabudována do jednoho zařízení, nebo v modulární formě, kdy máme zvlášť řídicí jednotku (CPU, Central Processing Unit), ke které připojujeme rozšiřující moduly. Zvláštním případem jsou pak distribuované systémy, Tedy vzdálené spojení řídicí jednotky a rozšiřujících modulů. Tato práce se zabývá vývojem systému pro teplotní testování PLC Siemens Simatic. Rodina Simatic nabízí především modulární a distribuované systémy (souhrnně označené jako ET 200), pro řešení širokého množství automatizačních úloh. Vlajkovou lodí, s momentálně nejvýkonnějšími PLC z rodiny Simatic, je řada S7-1500 (viz obr. 1), která nabízí jak modulární, tak decentralizovaný distribuovaný systém (označovaný jako ET 200MP). [1][2][3]



Obr. 1 - Příklad modulu z řady S7-1500 [4]

1. Teoretický rozbor

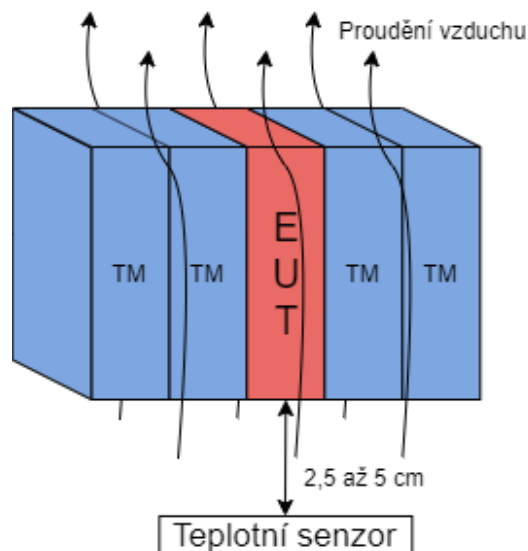
Tato kapitola nastiňuje problematiku klimatických testů PLC modulů v klimatické komoře. Dále popisuje pomocnou testovací sestavu, která je využívána při testování PLC řady Simatic S7-1500 a stanovuje požadavky na nový systém.

1.1. Klimatické testy

Teplotní testy se provádí za účelem ověření funkčnosti elektronického zařízení v požadovaném teplotním rozsahu (např. 0 až 60 °C). Zařízení je v podmínkách průmyslového provozu vystaveno mnohem náročnějším podmínkám, než je tomu například u běžné spotřební elektroniky. Zároveň je však kladen důraz na mnohem vyšší životnost (desítky let). Proto je nutné kontrolovat také to, zda se modul v jakékoliv konfiguraci a sestavě nepřehřívá.

1.1.1. Klimatické testy dle normy

Klimatické testy PLC popisuje například norma IEC 61131-2-2 [5]. Norma popisuje například umístění daného typu zařízení v klimatické komoře. Například pokud se jedná o modulární systém, je nutné do komory umístit i další moduly, které budou testovaný objekt (EUT) obklopotovat. Tyto moduly se označují jako TM (thermally representative module). Rozdíl je také mezi zařízeními s ventilačními otvory a bez nich, to má vliv například na polohu senzoru, který měří ambientní teplotu, viz obr. 2. Tato práce se však zabývá výhradně testem, při kterém je zařízení vystaveno statickému působení suchého tepla (dry heat). Dry heat [6] je druh klimatického testu, při kterém je zařízení v klimatické komoře zahříváno na předem definovanou kladnou teplotu (bez zvyšování vlhkosti uvnitř komory). Nastavená teplota odpovídá katalogovým požadavkům na dané zařízení. Při tomto testu se primárně zkoumá chování zařízení a jeho schopnost pracovat při této teplotě. Během testu je nutné se co nejvíce přiblížit reálným provozním podmínkám zařízení. Je třeba nasimulovat nejhorší možný případ tepelné zátěže zařízení. Toho v praxi můžeme dosáhnout třeba tak, že testované zařízení umístíme zatížené na maximum do klimatické komory, přičemž ho z obou stran obklopíme dalšími plně zatíženými moduly ze stejné řady.



Obr. 2 - Umístění modulů s ventilačními otvory v klimatické komoře

1.1.2. Současná testovací sestava

Současná testovací sestava se skládá ze dvou testovacích modulů a samotného testovaného zařízení (EUT). Testovací moduly nahrazují reálné sousední moduly testovaného zařízení. Simulují plně zatížené moduly v sousedních pozicích (teplotní ekvivalent). Tyto moduly jsou interně označovány jako HN (heating neighbours). Druhou funkcí testovacích modulů (HN) je měření teploty, resp. teplotního pole na styčných plochách EUT a testovacích sousedů (boční stěny EUT). Teplotní profil je v rámci rozložení teplot v dané HW konfiguraci pevný, nelze jej jednoduše měnit. Tato soustava tří modulů je dále vložena do teplotní komory s nastavenou maximální ambientní teplotou pro EUT. Výstupem měření je teplotní pole na bočních stěnách EUT, případně teplota přímo na kritických komponentách (volitelné). Teploty na bočních stěnách nesmí překročit interní standardy (nastavba oproti normě). Současný systém je možné označit jako pasivní, protože vyžaduje externí řízení a zaznamenávání měřených teplot. Moduly mají pouze výstupy teplotních čidel (připojení plochým kabelem) a připojení napájení. Motivací pro návrh nového systému bylo především zdokonalení a zjednodušení celého procesu (zjednodušení ve formě snazší obsluhy). V neposlední řadě jde také o vytvoření konceptu, použitelného pro další řady modulů z rodiny Simatic.

1.2. Požadavky na nový systém

Na základě studie současných zařízení pro teplotní testy byla sestavena skupina požadavků pro nový referenční systém HN, rovněž pro řadu zařízení S7-1500.

1.2.1. Konstrukční provedení

Požadavek na konstrukční provedení vyplývá z principu měření. Vzhledem k tomu, že měřicí moduly mají zastoupit reálné zařízení ze stejné řady jako EUT, mělo by se konstrukční provedení co nejvíce blížit reálnému modulu (včetně uchycení na stejnou lištu). Toho lze dosáhnout například použitím stejné konstrukční krabičky nebo krytu s určitou úrovní úprav. Druhým požadavkem je snadná konektivita (nejlépe jedním konektorem) se zbytkem systému.

1.2.2. Měření teploty

Měření teploty musí být provedeno maticí teplotních senzorů umístěnou na boční stěně přilehlé k EUT. U referenčního designu pro řadu S7-1500 musí být matice o rozměrech 7 senzorů horizontálně a 8 vertikálně. Dohromady tedy 56 vhodně zvolených teplotních senzorů. Sensory musí být umístěny uvnitř desky plošného spoje (DPS). Měření teploty by mělo probíhat s maximální absolutní chybou ± 1 °C. Měření teploty může vyžadovat kalibraci, nutná je však opakovatelnost měření s danou přesností.

1.2.3. Topný systém

Topný systém se bude nacházet uvnitř zařízení. Provedení by mělo za daných podmínek odpovídat distribuci tepla v reálném modulu a od toho se musí odvíjet i umístění topné DPS. Topná deska bude obsahovat sadu topných elementů. Řízení výkonu elementů by mělo probíhat nezávisle pro každý element nebo alespoň po skupinách. Počet a rozmístění topných elementů bude voleno tak, aby bylo možné napodobit teplotní profil libovolného modulu z dané řady. Důležitá je opakovatelnost nastavení teplotního profilu pro jednotlivá měření (absolutní chyba teplotního profilu do ± 5 %). Součástí práce by mělo být porovnání generovaného teplotního profilu a teploty profilu výchozího zařízení (nebo referenčního systému).

1.2.4. Napájení

Zařízení by měla být konstruována na napájení nominálním stejnosměrným napětím 24 V s možným rozsahem ± 20 % (19,2 až 28,8 V). Tato hodnota vychází z napájecích napětí používaných rodiny Simatic. Moduly by měly být schopny pracovat nezávisle na rozsahu napájecího napětí.

1.2.5. Řízení a komunikace

Řídicí deska by měla být umístěna uvnitř testovacího modulu (každý modul bude mít svoji) a to především z důvodu kompaktnosti a uživatelské přívětivosti. Nutnost složitějšího propojování by zvyšovalo pravděpodobnost chyby obsluhy a také časovou náročnost přípravy měření. Při návrhu je nutné zohlednit fakt, že řídicí deska by mohla teplotně ovlivňovat průběh měření. Je nutné tedy dbát na využití nízkopříkonových součástek. Nový systém by měl být schopný zvládat autonomní práci. Bude se tedy jednat o aktivní systém a jednotlivé moduly spolu musí komunikovat. Rozhodujícím parametrem je snadná konektivita a robustnost takového spojení (eliminace chyb obsluhy).

2. Návrh řešení

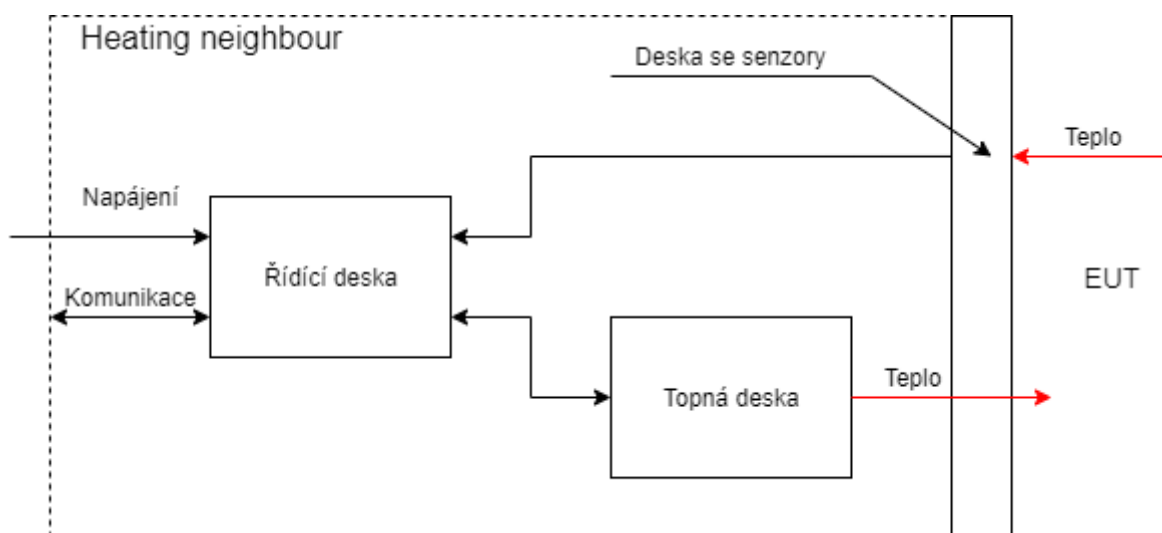
Tato kapitola se věnuje návrhu řešení aktivních modulů pro klimatické testy (suché teplo) PLC modulů z rodiny Siemens Simatic na teoretické úrovni (z pohledu výběru vhodných technologií a metod). Cílem je navrhnout takové řešení, které bude použitelné pro libovolný modulový systém Simatic.

2.1. Rámcová představa

Na základě analýzy stávající testovací sestavy pro řadu S7-1500 (a stanovených požadavků) je třeba vytvořit rámcovou představu o podobě nových aktivních modulů.

2.1.1. Základní provedení modulů

Jak už vyplývá z analýzy stávajícího systému, bude se jednat o dvojici zrcadlově otočených modulů. Každý modul se bude skládat ze tří částí. První částí bude řídicí deska, která bude obsahovat hlavní mikrokontroler a všechny řídicí obvody pro měření teploty, vytápění a také obvody pro napájení celého systému. Druhou částí bude topná deska, která bude obsahovat určitý počet topných elementů. Tyto dvě desky budou uvnitř modulu. Třetí část bude tvořit deska s maticí teplotních senzorů, ta bude umístěna na styčné ploše s testovaným objektem (EUT) a bude tvořit jednu z bočních stěn modulu (HN). Základní vnitřní blokové schéma jednoho modulu ukazuje obr. 3.



Obr. 3 - Návrh základních bloků testovacího modulu

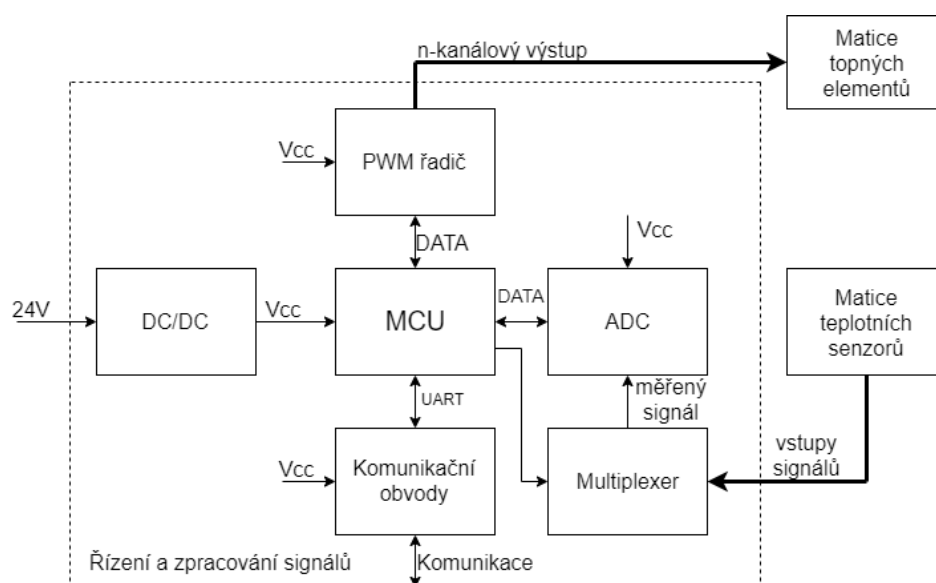
2.1.2. Řídící deska

Jak vyplývá ze stanovených požadavků, každý modul by měl mít vlastní řízení. To bude realizováno na samostatném plošném spoji. Jedním z důvodů pro volbu samostatného plošného spoje je vlastní tepelné vyzařování použitých součástek, které by mohlo ovlivňovat regulaci vytápění. Umístění řízení na samostatnou desku (oddělenou od topné desky vzduchovou mezerou), by mělo tuto negativní vlastnost aktivního modulu značně omezit. I přesto je třeba důkladně zvážit výběr součástek v souladu s požadavky na nízkou spotřebu.

Jako výpočetní jednotka bude sloužit mikrokontrolér. V současnosti jsou velmi oblíbené MCU z rodiny STM32. STM32 jsou 32bitové RISC mikrokontroléry postavené na jádrech ARM Cortex-M. Jejich výhodou je jejich snadná dostupnost, cenově výhodné vývojové kity včetně debuggeru (stovky korun) a v poslední době také velmi rozsáhlá komunita uživatelů. V nabídce jsou rovněž nízko-příkonové verze, které budou ideální volbou pro tento druh aplikace. Výběr konkrétního mikrokontroléru řeší kapitola 3.4.6.

Řídící deska bude sloužit k regulaci topných elementů a měření teploty pomocí připojených senzorů. Řízení vytápění bude za účelem nízké spotřeby řídicího obvodu probíhat pomocí pulzně-šířkové modulace (PWM). Měření teploty bude probíhat prostřednictvím analogově-digitálního převodu, tedy měření napětí na senzorech a jeho převod na číselnou hodnotu.

Dále by měla deska umět zpracovat všechna naměřená data a ve vhodném formátu je odeslat po sběrnici do PC nebo do nadřazeného modulu, který bude umístěn mimo teplotní komoru, proto bude součástí i transceiver pro komunikaci na sběrnici (transceiver bude zajišťovat převod napěťových úrovní).



Obr. 4 - Ideové blokové schéma řídicí desky

2.1.3. Topná deska

Úkolem topné desky bude simulovat tepelné působení reálného zatíženého modulu a vytvořit tak jeho tepelný ekvivalent. Deska se bude skládat z desítek topných elementů rovnoměrně rozmístěných po desce. Aby bylo možné se co nejpřesněji přiblížit k teplotnímu poli reálného modulu, bude každý element řízen nezávisle. Topné elementy budou odporové. Nejjednodušší řešení je použití SMD rezistorů s vhodnou velikostí pouzdra. Tyto elementy budou velmi levné a také snadno dostupné i v požadované přesnosti.

2.1.4. Deska se senzory

Plošný spoj se senzory bude nahrazovat boční stěnu modulu, která bude na rozhraní testovacího modulu s EUT. Použity budou analogové senzory uspořádané do matice 7×8 (56). U tak velkého množství senzorů se jeví použití analogových senzorů jako nejvíce vhodné. Některé digitální senzory (např. LM75) neumožňují adresaci tak velkého počtu senzorů na jedné sběrnici. Jiné senzory (např. DS18B20) vyžadují navázání komunikace s každým senzorem jednotlivě při každém startu zařízení. Při použití multiplexoru může mít zpracování signálu z analogových senzorů na starosti jediný obvod (AD převodník), díky tomu bude toto řešení vykazovat mnohem nižší spotřebu. Zapojení a komunikace budou přinášet mnohem méně komplikací (oproti digitálním senzorům). Dále je třeba řešit přestup tepla na senzor. Jelikož má být senzor umístěn uvnitř DPS, je určitě lepší volit senzory z materiálů s vyšší tepelnou vodivostí a s kompaktnějšími rozměry. Plastové pouzdro SOP tyto požadavky určitě nespĺňuje. Na základě vybraného typu senzoru je třeba vybrat vhodný AD převodník a také vhodnou metodu měření.

2.2. Volba teplotního senzoru

Pro vytvoření senzorové matice je třeba především zvolit vhodné teplotní senzory, s ohledem na požadavky na přesnost, opakovatelnost měření a zda je možné s nimi takovou matici realizovat.

2.2.1. Platinové teplotní senzory

Platinové teplotní senzory jsou variantou odporových teplotních senzorů všeobecně známých pod zkratkou RTD. Platinové senzory jsou nejčastěji k dostání pod označením Pt100 a Pt1000, přičemž písmena Pt značí, že se jedná o platinové teplotní senzory. Číslo za touto značkou značí nominální elektrický odpor při $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tyto senzory se typicky realizují na keramické destičce, na kterou je vhodným technologickým způsobem (např. napařováním) nanášena tenká vrstva platiny do podoby

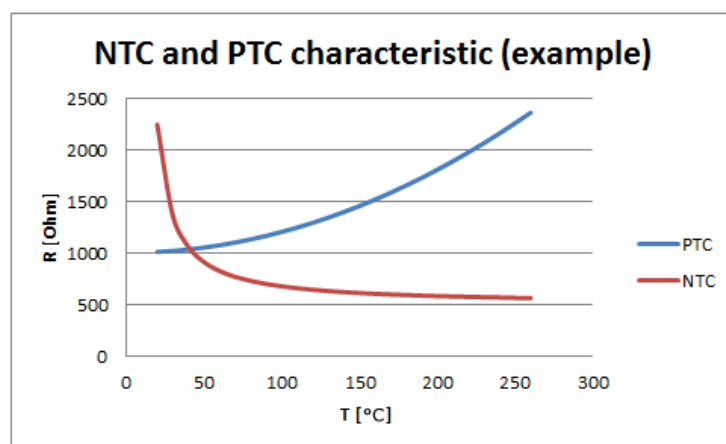
meandru (možná je též realizace na trubičce). Konce meandru jsou pak vhodně nakontaktovány v závislosti na provedení senzoru. K dostání jsou jak vývodové varianty (měděné drátky), tak varianty SMD s různou velikostí pouzdra.

Mezi výhody platinových senzorů patří především vysoká linearita závislosti odporu na teplotě. Navíc je tvar tohoto průběhu přesně definován normou (DIN/IEC 60751), přepočet odporu na teplotu je tedy velice snadný. Sensory mají i relativně vysokou přesnost. V rámci požadovaného rozsahu je největší odchylka měření při 100 °C $\pm 0,27$ °C (ve třídě přesnosti 1/3 B), pro nižší teploty se odchylka zmenšuje (pro 0 °C činí už jen $\pm 0,1$ °C) [7]. Negativem platinových senzorů je jejich nižší citlivost a také pomalejší odezva (oproti termistorům). Otázkou ovšem zůstává, jakým způsobem integrovat tento typ senzorů do plošného spoje tak, aby byl možný přenos tepla z EUT na senzory.

2.2.2. Termistory

Termistor rovněž představuje součástku, jejíž odpor je závislý na teplotě. Na rozdíl od odporových teploměrů se však jedná o polovodičovou součástku, která je vyrobena z různých oxidů kovů a keramických materiálů. Existují dva základní druhy termistorů. První variantou jsou tzv. pozistory (PTC) s kladným teplotním koeficientem (odpor roste s rostoucí teplotou). Druhou variantou jsou negastory (NTC) se záporným teplotním koeficientem (odpor s rostoucí teplotou klesá).

Díky použití vhodných polovodičových směsí se vyznačují termistory velmi vysokou citlivostí a rychlou odezvou (řádově citlivější a rychlejší než odporové teploměry, které jsou vyrobené pouze z kovu). Přesnost může být srovnatelná nebo lepší s RTD. Nevýhodou termistorů je jejich značná nelinearita viz obr. 5.



Obr. 5 - příklad charakteristiky NTC a PTC termistoru [8]

Další a poněkud zásadnější nevýhodu představuje absence konkrétní průmyslové normy, která by definovala přesný průběh závislosti odporu na teplotě, jako je tomu u platinových teplotních

senzorů. Například NTC termistor s odporem $10\text{ k}\Omega$ můžeme dostat s mírně odlišnými variantami charakteristik, což může komplikovat záměnnost jednotlivých senzorů. Proto by pro tuto aplikaci bylo lepší dát přednost platinovým teplotním senzorům. [9][10][11]

2.2.3. Měděné teplotní senzory

Při hledání alternativy k platinovým teplotním senzorům přišlo na myšlenku měděných teplotních senzorů. Mělo by se jednat o měděné meandry vytvořené na plošném spoji, princip je tedy podobný jako u platinových senzorů, rovněž jde tedy o senzory typu RTD. Senzory by však vznikali současně s tvorbou plošného spoje, při leptání měděné vrstvy, byly by tak jeho součástí. Tou nejdůležitější výhodou tohoto řešení je fakt, že matice teplotních senzorů se dá do plošného spoje integrovat při standardní výrobě, která je snadno dostupná. Opakovatelnost výroby takového řešení by byla tedy zaručena.



Obr. 6 - Příklad senzoru tvořeného měděnou cestou v DPS

Teoretický návrh senzoru je zobrazen na obr. 6. Senzor je tvořen měděnou cestou, kterou protéká proud. Změna teploty vyvolá změnu odporu motivu (měď má kladný teplotní součinitel odporu, s rostoucí teplotou odpor roste), který znamená změnu úbytku napětí, který je měřen mezi naznačenými body.

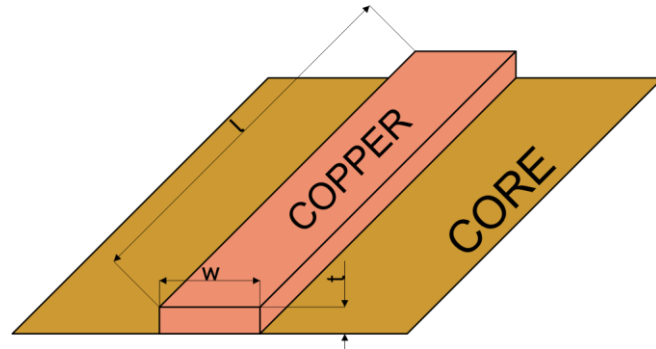
2.3. Zkušební měření pro měděné senzory

Myšlenku teplotních senzorů realizovaných přímo na PCB bylo nejprve třeba ověřit.

2.3.1. Odhad parametrů

V prvním kroku bylo nutno provést zkušební výpočty. Cílem bylo zjistit v jakých rozměrech a s jakými parametry bude možné takový senzor realizovat. Vstupními požadavky byly přibližné rozměry (kolem $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$) s hodnotou elektrického odporu minimálně v řádu jednotek ohmů. Výpočet předpokládaného odporu senzoru byl proveden pomocí vzorce (1). Legenda k výpočtu je znázorněna na obr. 7, přičemž ρ je konstanta rezistivity (měrný elektrický odpor), která činí (dle [12])

0,018 $\mu\Omega\text{m}$, α je teplotní součinitel odporu, který pro měď činí $3,92 \cdot 10^{-3}$ [12]. Výpočet byl proveden pro hodnotu $t = 25^\circ\text{C}$.



Obr. 7 - legenda pro výpočet odporu vodivé cesty na jádru (core) plošného spoje

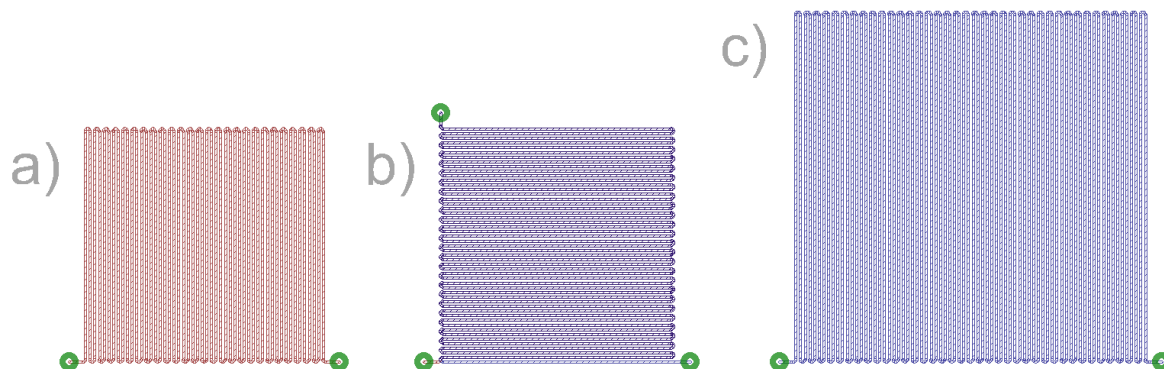
$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} [1 + \alpha(t - 20)] = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot t} [1 + \alpha(t - 20)]$$

$$R = 0,018 \cdot 10^{-6} \frac{505 \cdot 10^{-3}}{35 \cdot 10^{-6} \times 0,1 \times 10^{-3}} [1 + \alpha(25 - 20)] \quad (1)$$

Pro výrobu plošného spoje se senzory je uvažováno čtyřvrstvé provedení. Běžná tloušťka vnitřní vrstvy mědi je 35 μm s minimální šířkou spoje 100 μm . Elektrický odpor senzoru s touto tloušťkou a šířkou spoje a rozměrech 10 mm x 10 mm by měl být přibližně 2,65 Ω (délka spoje pro výpočet byla použita pouze přibližná). Pro tloušťku vnitřní měděné 18 μm vychází odpor přibližně dvojnásobně.

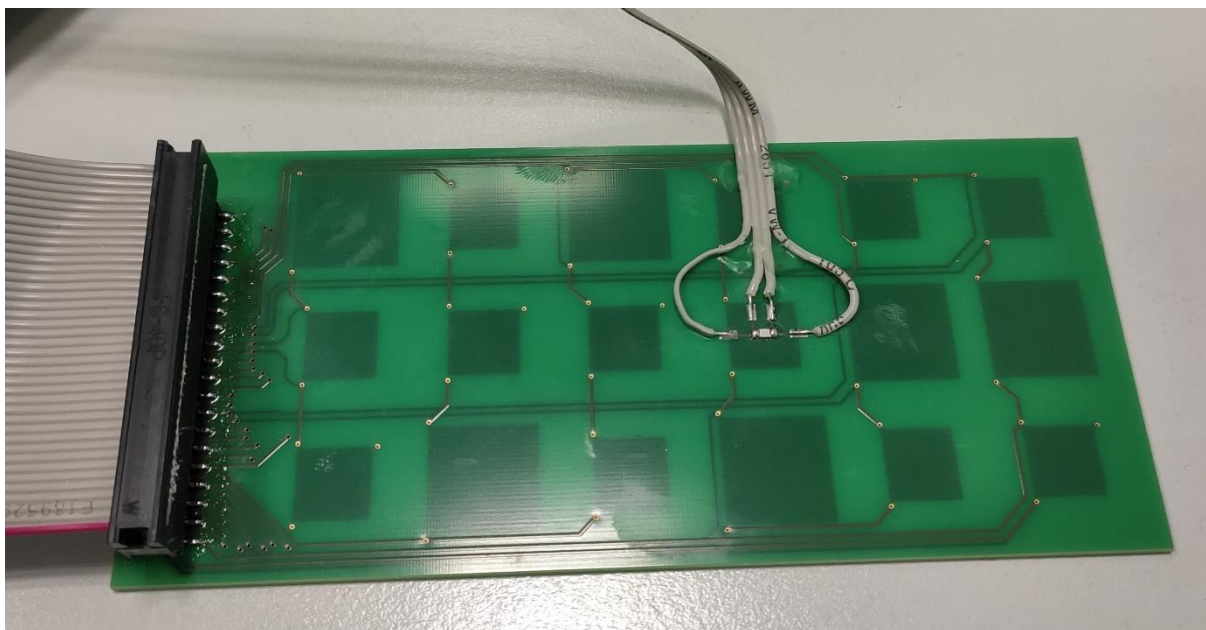
2.3.2. Zkušební deska

Pro účely zkušebního měření v klimatické komoře byl vytvořen plošný spoj s osmnácti senzory umístěnými do matice 3×6 . Realizovány jsou celkem tři typy senzorů, aby bylo možné porovnat různé varianty (obr. 8). Jejich teoretický odpor by měl být 5 Ω a 10 Ω .



Obr. 8 - Typy senzorů na zkušební DPS - a) 10 mm x 10 mm (cca 5 Ω), b) dvouvrstvý 10 mm x 10 mm (cca 10 Ω), c) 15 mm x 15 mm (cca 10 Ω)

Rozmístění senzorů na desce je různé a snaží se pokrýt všechny varianty (uprostřed, nahoře, dole, vlevo nebo vpravo), aby bylo možné odhalit případný zásadní vliv umístění senzoru na desce na měření teploty (testuje se také opakovatelnost/relativní přesnost rozměrů motivu). Všechny senzory jsou vyvedeny na konektor na kraji desky. Měření napětí bude probíhat čtyřsvorkově při konstantním proudu (přibližně 10 mA). Zkušební deska je zachycena na obr. 9.

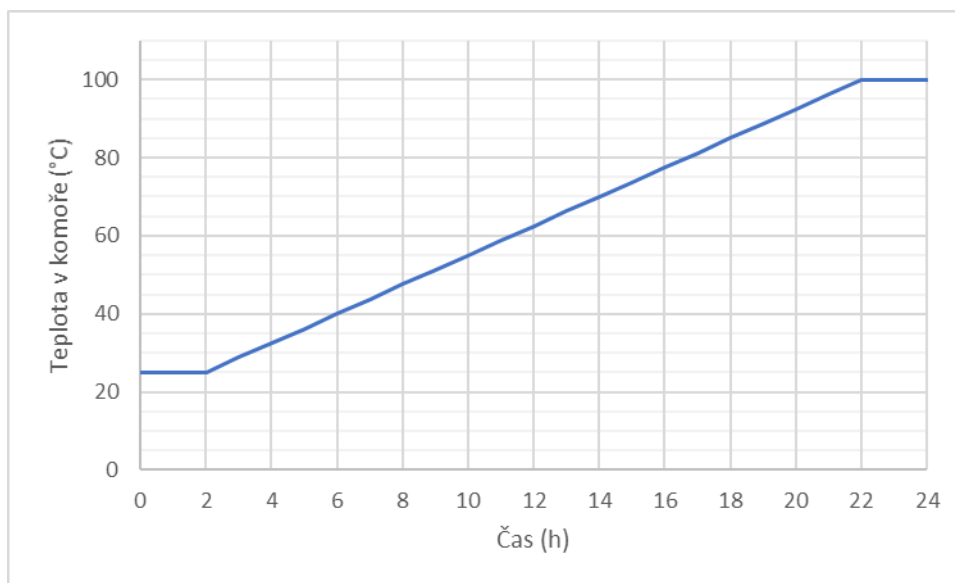


Obr. 9 - zkušební deska pro měděné teplotní senzory

Na vrchní vrstvě plošného spoje se kromě konektoru pro připojení měřicího přístroje nachází také kalibrační senzor PT1000, který slouží jako reference. Pro zkušební účely byl použit senzor třídy B.

2.3.3. Měření

Zkušební měření probíhalo v klimatické komoře Weiss Technik při teplotách 25 až 100 °C. Test byl naplánován na 24 h (obr. 10), přičemž první 2 h byla nastavena teplota 25 °C, aby došlo k ustálení teploty na testovací desce. Poté následovalo 20hodinové pozvolné navyšování teploty až na konečných 100 °C. Poslední 2 h sloužily jako rezerva, kdy komora stále držela teplotu 100 °C, aby se stačila teplota ustálit i na testovaném objektu.



Obr. 10 – Graf požadovaného průběhu teploty v klimatické komoře

Použitá teplotní komora disponuje ventilátorem, ten se stará o homogenní podmínky v celém prostoru komory. Nicméně tento ventilátor by mohl způsobovat nežádoucí proudění vzduchu kolem testovaného objektu (mohlo by způsobovat nerovnoměrné rozložení teploty na povrchu měřeného objektu). Z toho důvodu byl pro měření vytvořen provizorní kovový box.



Obr. 11 - Provizorní kovový kryt desky s měděnými senzory teploty

Kryt sloužil kromě částečného omezení proudění vzduchu také k navýšení tepelné kapacity prostředí v okolí desky, tedy potlačit například zvlnění vzniklé regulací teploty komory.

2.3.4. Naměřené hodnoty a kalibrace

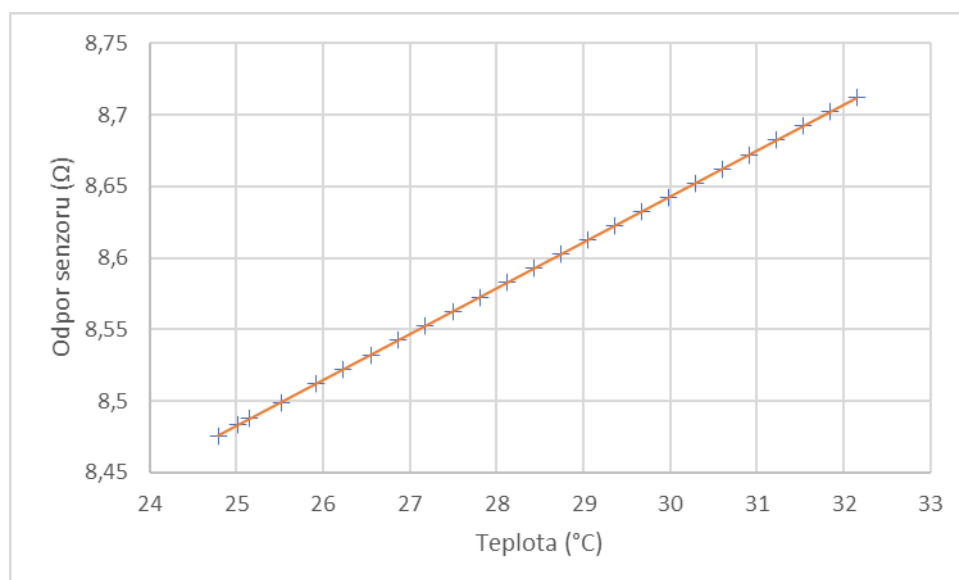
Výstupem měření bylo napětí v pro 18 různých senzorů, protékající proud v miliampérech a v neposlední řadě výstup referenčního teplotního senzoru. Při zpracování výsledků byl prvním krokem přepočítání změřených napětí a proudů na odpor (změřená závislost odporu na teplotě). Tímto krokem byl zjištěn odpor jednotlivých typů elementů (viz tab. 1). Pro elementy 10 mm × 10 mm bylo odpor při 25 °C někde mezi 8 až 9 Ω, pro dvouvrstvé 10 mm × 10 mm byl odpor cca 19 Ω, pro jednovrstvé 15 mm × 15 mm cca 17 (cca 10 Ω). To znamená, že výsledný odpor senzorů představoval více jak jedenapůlnásobek oproti vypočteným hodnotám. Toto může být podle výrobce desek (Gatema PCB) způsobeno výrobními tolerancemi (např. podleptáním mědi, tloušťkou měděné folie nebo její čistotou). Pro další měření a výpočty byl vybrán senzor 10 × 10 mm v jedné vrstvě, protože disponoval dostatečným odporem a preferovaným rozměrem, a navíc s jednodušší konstrukcí (pouze jedna vrstva a o jeden prokov méně).

Tab. 1 - Výběr z naměřených hodnot odporu

T _{REF} (°C)	RS1 (Ω)	RS2 (Ω)	RS3 (Ω)	RS4 (Ω)	RS5 (Ω)	RS6 (Ω)
25,026	8,755	8,759	8,729	8,680	8,771	8,484
40,214	9,256	9,260	9,228	9,176	9,273	8,969
55,195	9,751	9,755	9,722	9,667	9,769	9,449
70,018	10,240	10,244	10,209	10,151	10,258	9,922
85,108	10,738	10,743	10,706	10,645	10,758	10,405
100,034	11,232	11,236	11,198	11,134	11,252	10,883

Druhým krokem bylo provést kalibraci pomocí již naměřených hodnot odporu a teploty z referenčního čidla. K tomu byl použit tabulkový procesor MS Excel (stejně jako v prvním kroku). Vzhledem k tomu, že změřená závislost odporu senzorů na teplotě (měřeno referenčním senzorem) je značně lineární, je možné pro kalibraci využít metodu nejmenších čtverců na proložení závislosti přímkou (viz obr. 12). K tomuto účelu je v Excelu určena funkce LINEST (česky LINREGRESE). Hlavním argumentem této funkce je množina hodnot z osy Y (odpor senzoru) a jako nepovinný argument (pro tento účel však velmi důležitý) hodnoty z osy X (referenční teplota). Výstupem funkce jsou koeficienty polynomu 1. stupně. Tento polynom (2) slouží jako vzorec pro převod změřeného odporu na teplotu a jeho koeficienty A a B jsou kalibračními konstantami, každý senzor má tedy své (mohou vypadat například takto: A = 0,03302, B = 7,928). R je dále odpor senzoru a t je teplota odpovídající podle kalibrace.

$$R = At + B \Rightarrow t = \frac{R - B}{A} \quad (2)$$



Obr. 12 - Ukázka proložení naměřených hodnot přímkou

V tomto momentě, kdy je kalibrace hotová, můžeme pro změřený odpor zjistit ekvivalentní teplotu (vzorek hodnot, viz tab. 2) a následně zjistit odchylky kalibrovaného průběhu teploty od referenční hodnoty (tab. 3).

Tab. 2 - Výběr z vypočtených hodnot teploty

T _{REF} (°C)	ts1 (°C)	ts2 (°C)	ts3 (°C)	ts4 (°C)	ts5 (°C)	ts6 (°C)
25,026	25,056	25,043	25,034	25,040	25,049	25,030
40,214	40,207	40,210	40,208	40,208	40,208	40,206
55,195	55,207	55,209	55,206	55,208	55,207	55,208
70,018	70,009	70,010	70,009	70,011	70,010	70,010
85,108	85,106	85,107	85,108	85,106	85,105	85,104
100,034	100,066	100,061	100,056	100,064	100,062	100,062

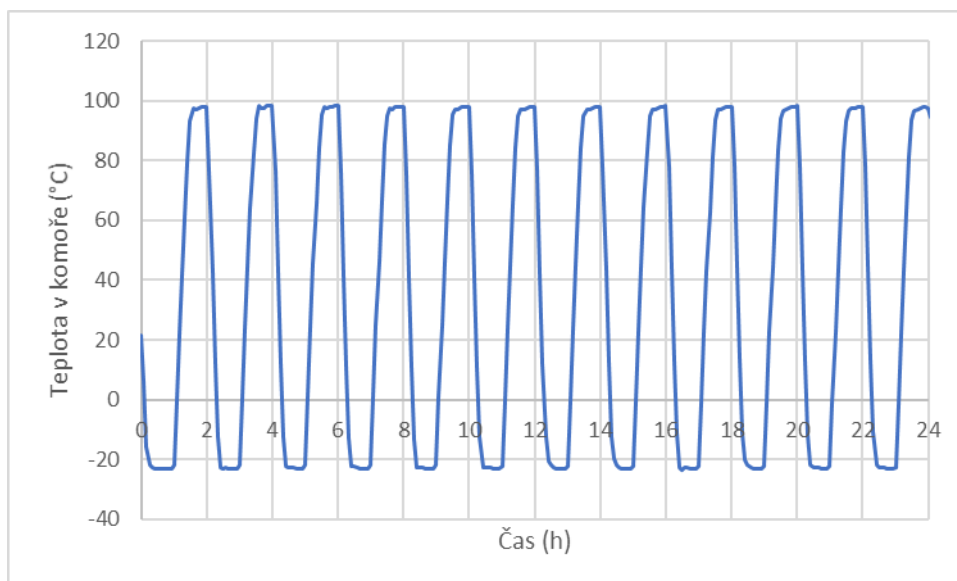
Tab. 3 - Výběr z hodnot odchylek od referenční teploty

T _{REF} (°C)	Δts1 (°C)	Δts2 (°C)	Δts3 (°C)	Δts4 (°C)	Δts5 (°C)	Δts6 (°C)
25,026	0,030	0,017	0,008	0,014	0,023	0,004
40,214	-0,007	-0,004	-0,006	-0,006	-0,006	-0,008
55,195	0,012	0,014	0,011	0,013	0,012	0,013
70,018	-0,009	-0,008	-0,009	-0,007	-0,008	-0,008
85,108	-0,002	-0,001	0,000	-0,002	-0,003	-0,004
100,034	0,032	0,027	0,022	0,030	0,028	0,028

Výsledky kalibrace se pohybovaly v rozmezí minimální odchylky -0,024 °C a maximální odchylky +0,033 °C od referenční teploty (pro 25 °C je to rozdíl menší než 0,15 %). Možnosti senzoru jsou velmi příznivé.

2.3.5. Test stability senzorů

Ačkoliv se senzory po prvním testu a kalibraci jeví jako připraveny k přímému nasazení, nebylo známo nic o jejich dlouhodobé stabilitě. Chování senzorů po dlouhodobější zátěži a stárnutí samotné desky bylo předmětem dalšího testu. Tento test probíhal ve dvou fázích a rovněž v klimatické komoře. V první fázi šlo o tepelné namáhání cyklickými skokovými změnami nastavené teploty, a to konkrétně mezi -20 °C a +100 °C po dobu 24 hodin s periodou střídání 1 hodina (čas na ustálení teploty v komoře). Změřený průběh teploty v komoře znázorňuje obr. 13.



Obr. 13 - Reálný průběh teploty při tepelném namáhání

V druhé fázi šlo o zopakování prvního testu, tedy měření odporu senzorů při postupné navyšování teploty v komoře od 25 °C do 100 °C (viz kapitolu 2.3.3). Pro výpočet teploty byla použita původní kalibrace před tepelným namáháním. Odchytky senzorů se po namáhání posunuly směrem do kladných hodnot do intervalu -0,007 až +0,095 (ukázka hodnot viz tab. 4). Při 25 °C to odpovídá stále velmi příznivé odchylce pod 0,5 %. Změřená odchylka při 25 °C byla ale ve skutečnosti nižší (přibližně 0,25 %), ale je nutné počítat vždy s nejhorší možnou variantou.

Tab. 4 - výběr z hodnot odchylky od reference po tepelném namáhání

TREF (°C)	Δt_{s1} (°C)	Δt_{s2} (°C)	Δt_{s3} (°C)	Δt_{s4} (°C)	Δt_{s5} (°C)	Δt_{s6} (°C)
25,011	0,040	0,031	0,036	0,063	0,057	0,049
40,221	0,024	0,013	0,023	0,053	0,037	0,042
55,131	0,045	0,038	0,049	0,072	0,058	0,064
70,178	0,025	0,012	0,028	0,047	0,036	0,040
85,192	0,030	0,018	0,031	0,051	0,039	0,044
99,821	0,067	0,050	0,048	0,074	0,068	0,065

2.3.6. Zhodnocení použitelnosti

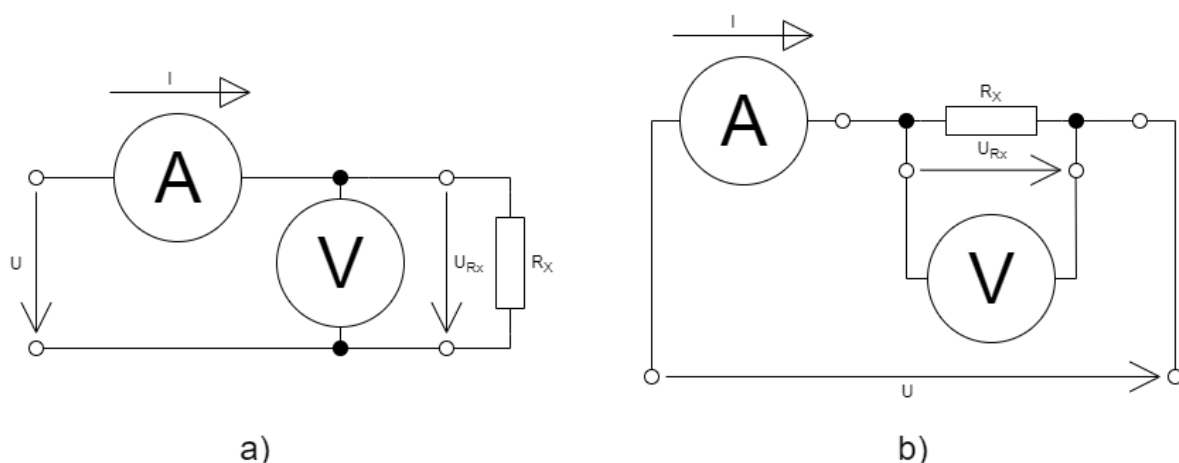
Proběhlé testy ukazují na vhodnost použití těchto senzorů. Je třeba však pamatovat na několik důležitých zjištění. Kvůli relativně velkým rozdílům mezi jednotlivými senzory je třeba provádět důkladnou kalibraci a každý senzor musí mít svoje kalibrační konstanty. Musí být použitý precizní měřicí systém, a to hlavně kvůli relativně malé citlivosti senzorů (podobně jako u platinových senzorů). Dlouhodobá stabilita senzoru se zdá být přijatelná, ale je třeba s tímto mírným driftem počítat. Řešením je například opakování kalibrace v určitých časových intervalech (např. jednou za rok až dva roky) nebo případně zvýšením tolerance.

2.4. Způsob vyhodnocení odporových senzorů

U odporových senzorů (včetně teplotních) se změna měřené veličiny projevuje změnou odporu. Odpor můžeme měřit přímo (například ohmmetrem) nebo nepřímo přes změnu napětí a proudu (např. ohmovou metodou).

2.4.1. Ohmova metoda

Ohmova metoda je jeden z nepřímých způsobů měření odporu. Pokud změříme napětí na neznámém odporu a proud, který jím protéká, můžeme pomocí Ohmova zákona tento neznámý odpor dopočítat. Metoda se používá v několika modifikacích podle velikosti měřeného odporu. Nejběžnější variantou je zapojení, které umožňuje dvousvorkové připojení měřeného odporu. Pro malé a střední odpory s hodnotou blízko hodnotě vnitřního odporu ampérmetru, můžeme využít zapojení obr. 14 a). V tomto zapojení je paralelně s měřeným odporem zapojen voltmetr. Díky velkému odporu voltmetru a malé hodnotě měřeného odporu, protéká téměř veškerý proud měřeným odporem, tím velmi omezíme chybu metody. Nevýhoda této metody spočívá především v tom, že se při měření zásadně uplatňuje odpor přívodů. Pokud je odpor přívodů srovnatelný s nejistotou měření nebo se dokonce blíží k velikosti měřeného odporu, je mlžné využít tzv. čtyřsvorkového zapojení (obr. 14 b)). V tomto zapojení je odpor přívodů potlačen, protože neměříme úbytek napětí na těchto vodičích (napětí měříme přímo na měřeném odporu).

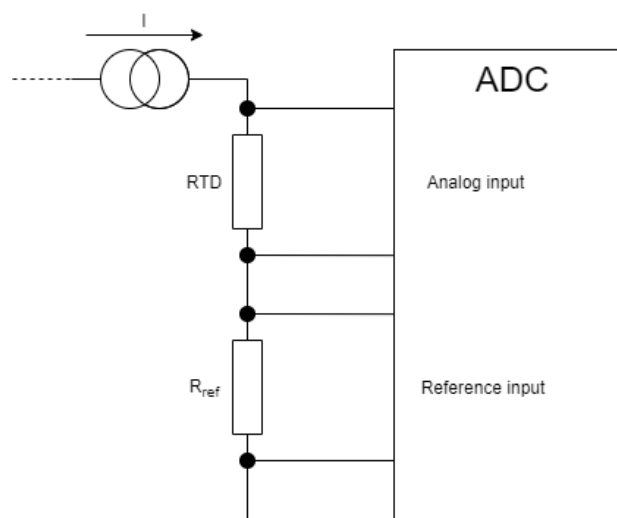


Obr. 14 - Ohmova metoda pro malé odpory, a) dvousvorkové zapojení a b) čtyřsvorkové zapojení

Čtyřsvorkové zapojení se běžně využívá právě v aplikacích odporových senzorů teploty, kdy by mohl odpor přívodů značně ovlivnit výsledek měření. [13]

2.4.2. Sériová srovnávací metoda

Srovnávací metoda je založena na porovnání napětí na měřeném odporovém senzoru s napětím na sériově zapojeném referenčním rezistoru nebo odporovém etalonu se známou (přesnou) hodnotou. Odporů protéká stejný proud. Tento způsob je výhodný při použití s analogově-digitálními převodníky, zvláště pak s převodníky s diferenčními vstupy. Napětí na referenčním rezistoru je přivedeno na referenční vstup A-D převodníku a napětí na měřeném senzoru je přivedeno na diferenční analogový vstup viz obr. 15. Výhodou je potlačení rušení díky simultánnímu odečítání měřeného a referenčního napětí. Výstupní číselná hodnota převodníku je pak přímo roven poměru měřeného a referenčního odporu.



Obr. 15 - příklad sériové srovnávací metody měření odporu pomocí A-D převodníku

Využití této metody se jeví jako nejpříznivější hlavně z hlediska potlačení šumu a zvlnění napájecího proudu nebo napětí. Navíc stejně jako čtyřsvorková Ohmova metoda potlačuje uplatnění odporu vodičů. Touto metodou je rovněž možné měřit více senzorů v jedné smyčce, což bylo vzhledem k požadavku na větší počet senzorů považováno za nutné. Nevýhodou může být fakt, že je tato metoda opravdu velmi přesná jen pro hodnoty odporu blízké referenčnímu rezistoru. [13]

2.5. Výběr AD převodníku

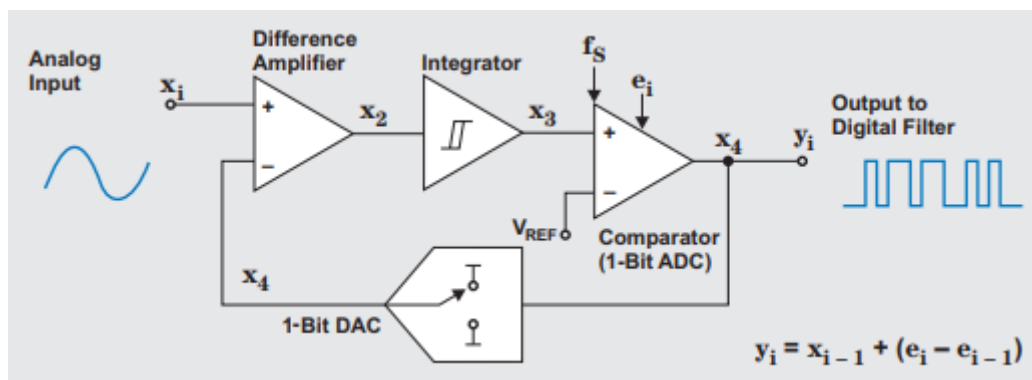
Základem měřicího systému, pro vybrané senzory teploty, bude kromě vhodně zvolené metody také dostatečně kvalitní převodník analogové hodnoty na číselnou, která je nutná pro další zpracování pomocí MCU.

2.5.1. Požadavky na AD převodník

Pro stanovení požadavků na vhodný AD převodník je třeba znát především charakter vstupního signálu. Zvolený typ sensorů, tedy měděné RTD, se vyznačuje především nižší hodnotou odporu (oproti platinovým sensorům). Pokud je uvažován měřící rozsah Převodník by měl disponovat schopností pro potlačování šumu (typicky Sigma-Delta ADC), který by mohl splývat s velmi malou změnou vstupního signálu. Jelikož nelze senzory, kvůli parazitnímu zahřívání, napájet příliš velkým proudem, lze předpokládat, že i napětí na jednotlivých senzorech bude relativně nízké, proto byl dalším požadavkem integrovaný zesilovač s nastavitelným ziskem (PGA) s vysokou přesností. Aby bylo možné měřit napětí na sériově řazených senzorech a zároveň použít sériovou srovnávací metodu, musel být převodník rovněž vybaven diferenčními vstupy pro signál i referenci. Nutnost kalibrace sensorů vyžadovala také připojení referenčního platinového senzoru, proto měl mít zvolený převodník také více jak jeden diferenční vstup a v ideálním případě také druhý vstup pro referenci.

2.5.2. Sigma-Delta ADC

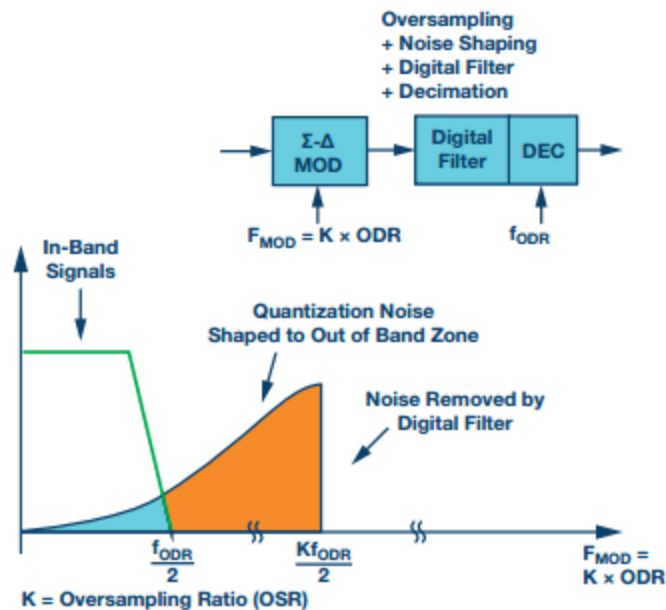
Sigma-Delta ADC je analogově-digitální převodník, jehož hlavní součástí je Sigma-Delta modulátor. Blokové schéma modulátoru je na obr. 16.



Obr. 16 - Blokové schéma Σ - Δ modulátoru [14]

Modulátor převádí nízkofrekvenční analogový signál na vysokofrekvenční posloupnost jedniček a nul. Patří mezi modulátory pracující na principu tzv. převzorkování (oversampling), kdy je vstupní signál navzorkován mnohonásobně vyšší frekvencí, než udává vzorkovací teorém. Díky tomu se výrazně zvedne rozlišení takového modulátoru a dojde k potlačení nízkofrekvenčního šumu (hlavně kvantizačního). Obsažený integrátor má zároveň tendenci tvarovat tento šum, a kromě jeho potlačení na nízkých frekvencích ho přesouvat do vyšších frekvencí mimo oblast užitečného signálu. Samotný Σ - Δ AD převodník je dále vybaven digitálním filtrem typu dolní propust, který tento šum odstraní. Odtud jde signál do decimátoru, kde je tento vysokorychlostní datový tok zredukován na pomalejší (bez ztráty

informace), který se dále mnohem lépe zpracovává. Podoba signálu v časové oblasti s blokovým schématem Σ - Δ převodníku jsou zobrazeny na obr. 17.



Obr. 17 - Potlačení a tvarování šumu ve frekvenční oblasti a blokové schéma Σ - Δ ADC [15]

Díky těmto vlastnostem jsou Σ - Δ AD převodníky vysoce ceněnými pro nízkofrekvenční aplikace vyžadující vysokou přesnost měření a pro které jsou kladeny vysoké nároky na potlačení šumu. Jako vhodnou řadou kandidátů, kteří splňují také požadavky uvedené v kapitole 2.5.1, se jevíly převodníky od firmy Analog devices AD719x. [14][15][16]

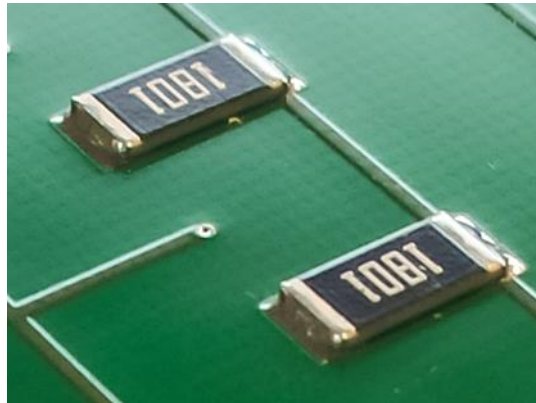
2.6. Vytápění

Ústředním prvkem topné části jsou topné senzory. Návrh topné části byl však především o výběru vhodného způsobu pro jejich napájení a regulaci výkonu.

2.6.1. Topné elementy

Topným elementem je zde myšlen prvek, ve kterém se převádí elektrický výkon na Jouleovo teplo, tedy teplo které vzniká ve vodiči průchodem elektrického proudu. Vyzářené teplo je přímo úměrné výkonu. Vytápění bude kalibrováno na teplotu ustálenou na boční stěně. Nejběžnějším typem elektrických topných článků jsou ty odporové. Běžně se využívají například v domácích spotřebičích. Na úrovni běžné velikosti DPS mohou být topným tělesem například běžné rezistory. Rezistory umožňují prakticky neomezené možnosti řízení výkonu a řadu různých konstrukčních provedení. Pro topné elementy byly nakonec zvoleny tzv. čipové SMD rezistory (obr. 1), které se vyrábí ve velkém množství velikostních variant. Výběr konkrétní velikosti tak může být zvolen podle

konkrétních požadavků pro zvolenou řadu PLC. Například požadavek na vyzářený výkon bude odlišný u řady PLC Simatic S7-1500 a u mnohem menších PLC z řady ET 200SP.

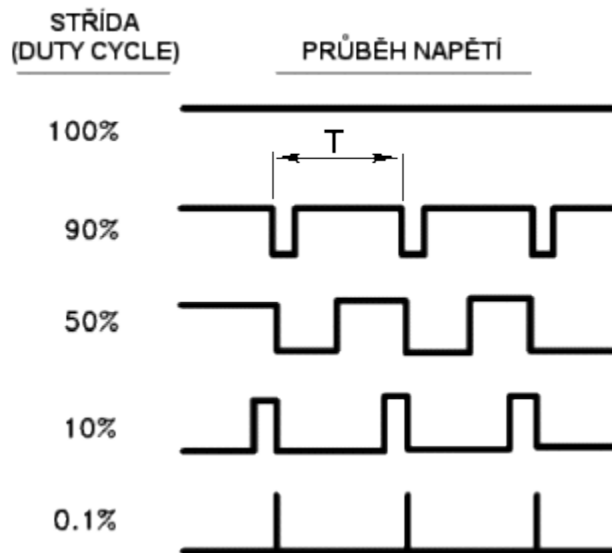


Obr. 18 - čipové SMD rezistory

2.6.2. Řízení výkonu a napájení topných elementů

Jak už bylo zmíněno výše, u odporových topných elementů lze vybírat z velkého množství způsobů regulace výkonu. Zřejmě nejjednodušším způsobem jsou metody založené na úbytku napětí na rezistoru. Zde se využívá k regulaci výkonu napěťového nebo proudového odporového děliče. Kvůli požadavku na co nejvyšší účinnost (minimalizace parazitní tepelné stopy), nelze tyto a podobné ztrátové způsoby regulace použít. Lineární způsoby regulace s parazitním úbytkem napětí můžeme nahradit spínáním (např. s využitím pulzně-šířkové modulace PWM). U spínání nahrazujeme poměrný úbytek napětí na regulátoru nebo např. rezistoru pouhým rozepnutím obvodu. Tím dojde ke snížení střední hodnoty napětí a proudu na zátěži. Parazitním prvkem je v tomto případě spínač (např. tranzistor). Důležitým parametrem pro účinnost bude v tomto případě především odpor spínače v sepnutém stavu.

PWM je druh dvoustavové diskretní modulace, kde je analogová hodnota reprezentována hodnotou střídý, která se nejčastěji vyjadřuje v procentech. Pomocí PWM je možné nastavit napětí nebo proud v rozsahu 0-100 %. Předpokladem pro použití PWM je určitá teplotní setrvačnost systému. S tímto je třeba počítat a podle toho i nastavit frekvenci PWM. Příklad PWM signálu s různými hodnotami střídý jsou zobrazeny na obr. 19. [17]



Obr. 19 - Ukázka průběhu napětí s různou hodnotou střídy [17]

Ke generování PWM signálu se vyrábí specializované obvody. Tyto obvody jsou k dostání s jedním kanálem PWM, ale také v provedení vícekanálovém, které jsou v drtivé většině učený pro napájení svítivých diod LED (např. LED7708 od ST Microelectronics, TLC5946 od TI nebo PCA9685 od NXP). Vícekanálové provedení byla pro toto použití preferovaná varianta, zejména díky jednoduché distribuci různých hodnot střídy do nezávislých elementů nebo jejich skupin, a to bez složitého multiplexování signálu z jednoho zdroje. Dále se dají rozdělit na ty s proudovým výstupem a na ty s výstupem napěťovým.

Výběr vhodného způsobu řízení pro topné elementy nakonec vyústil v požadavek na vícekanálový PWM řadič s napěťovým výstupem, který by však sloužil pouze jako driver pro spínání tranzistoru MOSFET. Tento způsob byl zvolen z důvodu minimalizace výkonové ztráty na řídicím prvku, což by zejména v případě vícekanálového provedení mohlo tvořit značný teplotní hotspot. Použití externího tranzistoru umožní umístění ztrátového prvku do lepší pozice, například přímo na topnou desku. Navíc díky téměř nulovému proudu do gate tranzistoru MOSFET není výstup řadiče téměř zatěžován. Z těchto důvodů je nevhodný řadič, který pracuje v proudovém módu. Jako napájecí napětí pro elementy bylo vybráno přímo napájecí napětí celého modulu, tedy vstupní napětí s nominální hodnotou 24 V. Použití nižšího napětí ze spínaného měniče umístěného na řídicí desce by opět vedlo k vytvoření nového nebo prohlubování již vytvořeného teplotního hotspotu. Nutno však podotknout, že vstupní napětí se může pohybovat v definovaném rozmezí, což by mohlo afektovat již kalibrovaný teplotní profil. Tento fakt je proto nutné kompenzovat (viz kapitola 2.6.3).

2.6.3. Omezení vlivu napájecího napětí

Napájením topných elementů přímo z napájecího napětí modulu (24 V) může vnášet do vyzářeného výkonu jistou chybu, protože rozmezí vstupního napětí je relativně velké. Ani při nastavení stejného výstupního napětí na zdroji, nemusí být skutečná výstupní hodnota napětí vždy úplně stejná. Proto by mělo být napájecí napětí modulu při všech procedurách měřeno, což umožní případnou korekci kalibračních hodnot PWM podle skutečného napájecího napětí tak, aby byl výkon na každém rezistoru vždy správný. Absolutní přesnost měření není v tomto případě zásadní, protože se vždy bude jednat pouze o poměrové měření (porovnání hodnoty při kalibraci a při skutečném testu). Pro tento účel byl tedy zvolen AD převodník integrovaný v MCU.

3. Vývoj prototypu

Po stanovení požadavků a diskuzi možného řešení může následovat vývoj a konstrukce funkčního prototypu.

3.1. Konstrukční řešení

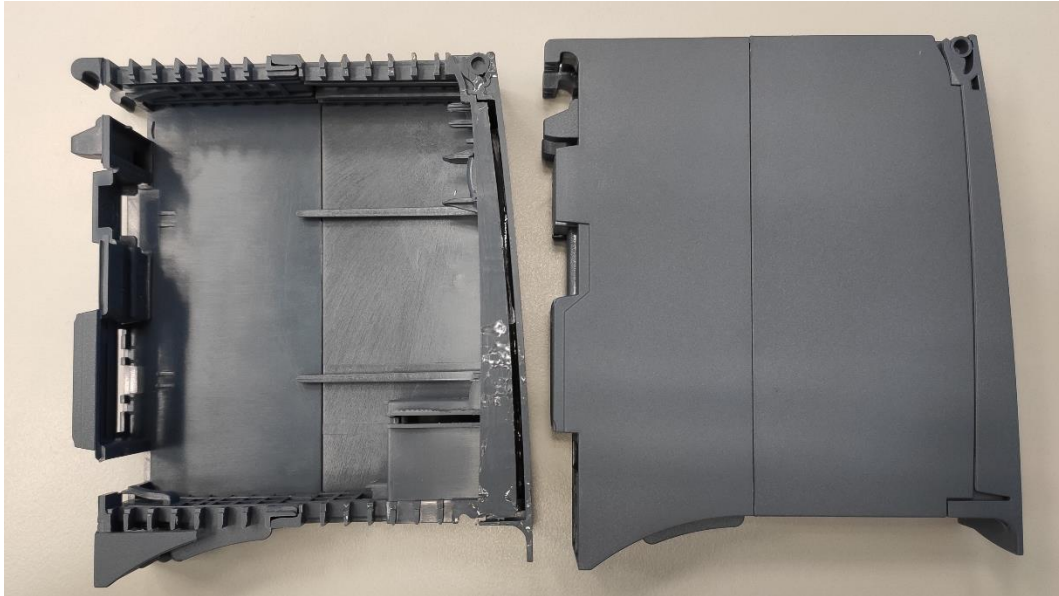
Návrh prototypu začal od konstrukčního řešení, a to primárně z toho důvodu, že právě tento bod se již od začátku jevil jako naprosto zásadní pro správnou funkci systému. Ze stanovených požadavků vyplývá, že konstrukční provedení musí být kompatibilní se sériově vyráběnými moduly z rodiny Simatic S7-1500. Výsledný produkt musí splňovat požadavek montáže na systémovou lištu beze změn oproti originálním modulům a pokrývat celou plochu boční stěny testovaného modulu. Především musí zachovat stejné principy proudění vzduchu (jedná se o systém s ventilačními otvory).

3.1.1. Konstrukční kryty

Pro prototypovou, případně malosériovou výrobu se nabízí několik řešení pro realizaci konstrukčních krytů zařízení. Vydát se můžeme dvěma hlavními cestami. První cesta využívá již existujících krabiček a boxů s případnými mechanickými úpravami, druhá pak spočívá ve vytvoření nové krabičky za použití technologií jako je 3D tisk nebo CNC frézování. Druhá cesta sice přináší mnohem dokonalejší výsledek (v podobě krabičky na míru), ale jedná se o řešení o něco komplikovanější a časově náročnější (stanovení rozměrů, příprava 3D modelu, příprava výroby, zkušební prototypy atd.). V tomto případě byla upřednostněna úspora času a pro první prototyp byly využity existující konstrukční kryt od modulů z rodiny S7-1500. Tato varianta už z principu zajistí potřebnou konstrukční kompatibilitu s minimem úprav.

Pro konstrukci modulů byly vybrány kryty od systémových napájecích zdrojů, protože na rozdíl od I/O modulů lze využít celý vnitřní objem. U I/O modulů zabírá přibližně polovinu objemu místo pro modul svorkovnice (front connector) a kabeláž.

Využití originálních krytů vyžaduje minimum úprav. Jedinou zásadní úpravou je nutnost odfrézování jedné z bočních stěn krytu, aby na její místo mohla být vlepena deska s teplotními sensory. Toto bylo pro zkušební účely provedeno ruční frézkou. Způsob úpravy viz obr. 20.

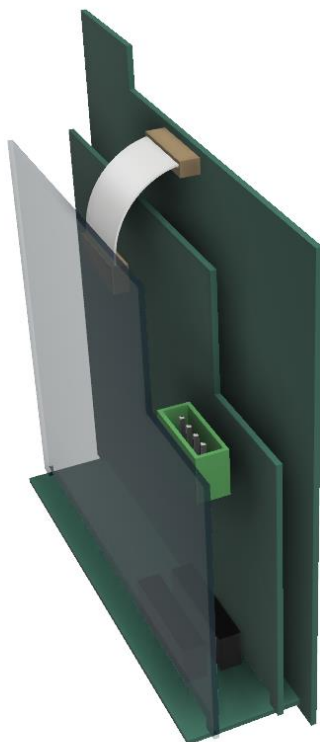


Obr. 20 - Provedená úprava konstrukčního krytu

Zbývající úpravy už jsou pouze drobnějšího charakteru. Patří mezi ně otvor konektoru pro připojení systémové svorkovnice a vyříznutí štěrbinu pro plochý kabel.

3.1.2. Vnitřní uspořádání

Vnitřní uspořádání zvolené konstrukční krabice umožňuje instalaci dvou shodné velikých DPS rovnoběžně s boční stěnou modulu. Jak už bylo zmíněno v kapitole 2.1.1, uvnitř modulů budou umístěny řídicí a topné DPS. Možná je rovněž instalace třetí DPS, která je ke dvěma předešlým kolmá. Třetí deska umožní osazení konektorů, do kterých budou dvě předchozí desky zasunuty. Tím bude umožněno spojení řídicí a topné desky, a tedy distribuce PWM signálu do topných elementů. Propojení řídicí desky se sensorovou bude provedeno pomocí plochého kabelu exteriérem modulu (viz obr. 21). Toto řešení bylo zvoleno z důvodu, že tyto dvě desky spolu přímo nesousedí a propojení vnitřkem by znamenal zásah do topné desky. Rovněž konektor pro tento kabel na sensorové desce je umístěn mimo modul, mimo hlavní styčnou plochu tak, aby neodváděl teplo z místa, kde se nacházejí senzory (a tím neovlivňoval výsledek měření). Toto platí i pro případné další součástky, které by bylo potřeba umístit na sensorovou desku. Uspořádání všech desek znázorňuje model na obr. 21. Vlevo se nachází průhledná řídicí deska. Deska uprostřed představuje topnou desku. Tyto dvě desky jsou propojeny spojovací deskou, na které jsou pouze dva konektory a propojovací cesty. Úplně vpravo se nachází deska sensorová.



Obr. 21 - Vnitřní uspořádání modulu

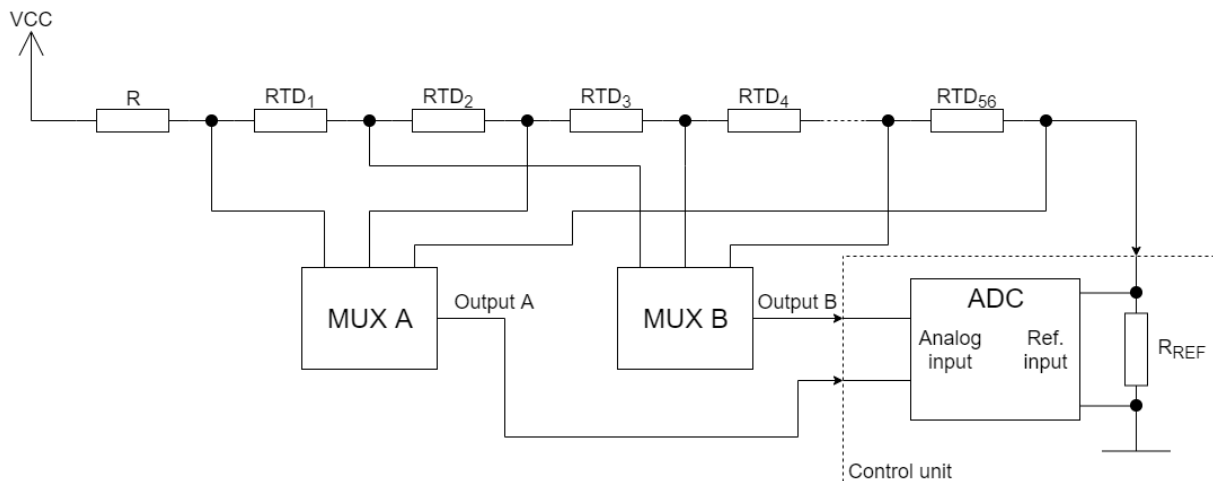
3.2. Senzorová deska

Senzorová deska je DPS s integrovanou maticí měděných teplotních senzorů (senzory popsány v kapitole 2.3), které slouží ke kontaktnímu měření teplotního pole na boční stěně. Součástí desky je také referenční teplotní senzor, sloužící ke kalibraci měděných odporových senzorů.

3.2.1. Zapojení sensorové matice

Měděné teplotní senzory mají vlastnosti velmi podobné běžným odporovým senzorům teploty. Pro měření odporu senzorů byla vybrána sériová srovnávací metoda popsaná v kapitole 2.4.2. Tato metoda umožňuje měření odporu více senzorů v jedné smyčce, proto bylo všech 56 senzorů zařazeno do série. Aby bylo možné měření provádět jedním analogovým vstupem ADC, musel být před tento vstup zařazen přepínač signálů, běžně označovaný jako multiplexor (anglicky multiplexer). Jelikož se jedná o diferenciální měření, bylo třeba použít dva multiplexory nebo jeden dvojitý, protože měření probíhá ve dvou bodech současně (výběr multiplexoru pospán v kapitole 3.2.2). Pro napájení měřicí smyčky byl zvolen zdroj konstantního napětí, a to konkrétně napájecí větev společná pro celou analogovou část. Jelikož se jedná o poměrové měření, které probíhá simultánně pro senzor i referenční rezistor, není nutné použití precizního zdroje proudu nebo napětí. Využití precizního lineárního zdroje

proudu napájeného z 24 V, by navíc znamenalo vytvoření nežádoucí výkonové ztráty. Zapojení měřicí smyčky je znázorněno na obr. 22. Sensory jsou k napájecímu napětí připojeny přes srážecí rezistor (ve schématu označený jako R). Některé druhy AD převodníků umožňují při použití vstupního bufferu připojit pouze napětí o několik desítek až stovek milivoltů nižší, než je napájecí napětí analogové části převodníku.



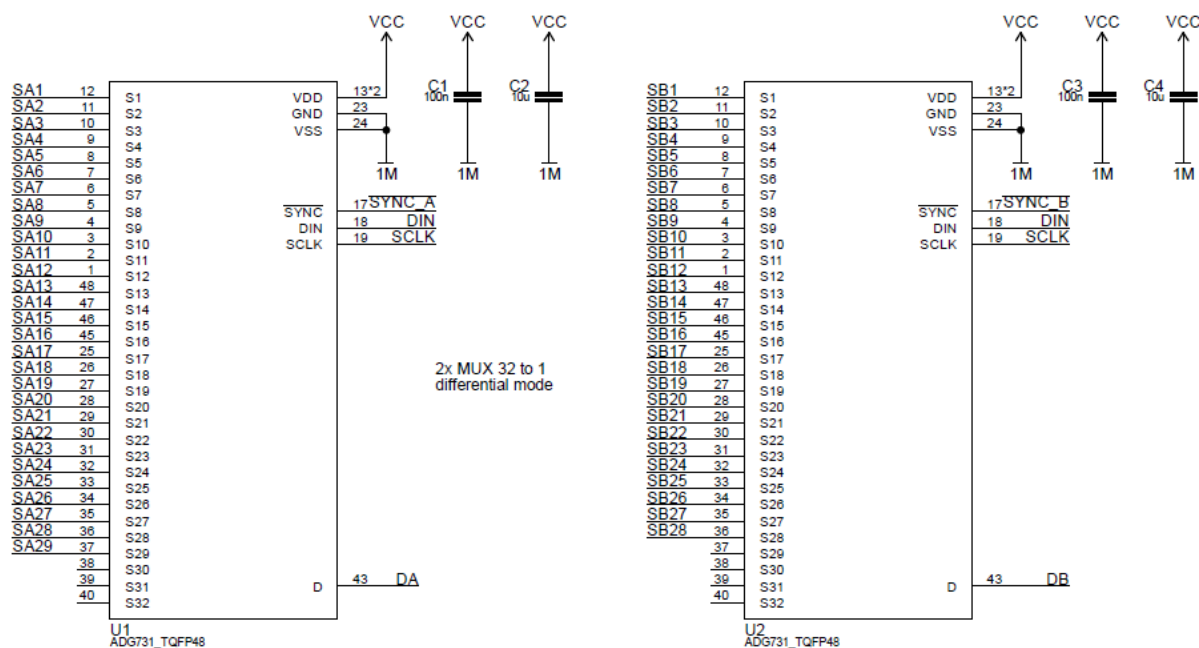
Obr. 22 - Princip zapojení měřicí smyčky

Ze schématu je patrné i zapojení multiplexorů. Mezi dvěma senzory je vždy pouze jeden měřicí bod. Každý vstup multiplexoru (kromě prvního a posledního), je tedy využitý pro měření dvou senzorů, proto se multiplexory vždy střídají. Zapojení bylo zvoleno hlavně z toho důvodu, že umožňuje snížit počet kanálů téměř na polovinu. Přesněji řečeno na polovinu plus jeden kanál mezi posledním senzorem a referenčním rezistorem, tedy celkem 57 bodů. U tohoto způsobu je nutné počítat s tím, že společně s odporem senzoru je měřen i odpor cesty, která senzory spojuje. Tato problematika je detailněji popsána v kapitole 5.1.3.

3.2.2. Multiplexory

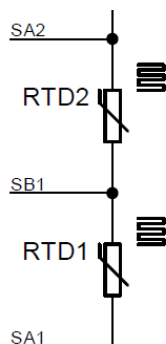
Z důvodu ušetření počtu vodičů mezi řídicí a senzorovou deskou, bylo rozhodnuto, že multiplexorová část bude umístěna přímo na senzorové desce. Tím se zredukoval počet vodičů z 59 na 14. Výběr vhodného typu multiplexoru se odvíjel především od velkého počtu senzorů. Běžné analogové multiplexory jsou k dostání v provedení do 16 kanálů. To znamená především konfigurace 16:1 (16 vstupů a jeden výstup) nebo řídicěji pak konfigurace $2 \times (8:1)$, ovšem pouze některé dvojitě multiplexory umožňují konfigurovat každý přepínač nezávisle. Při požadavku na 57 signálových cest (viz 3.2.1) by bylo potřeba celkem čtyř kusů obvodů v provedení 16:1. Běžný typ multiplexoru (např. typ 4067) se navíc konfiguruje paralelně pomocí dvojkového kódu. To pro 16 cest představuje 4 konfigurační vodiče a další pro aktivaci výstupu (enable), tedy celkem 20 vodičů jen pro konfiguraci multiplexorů. Zde by se dalo pro snížení počtu vodičů použít například posuvné registry. Tento způsob řešení však nepřicházel

v úvahu, protože multiplexory a další obvody musí být umístěny mimo plochu, kterou pokrývají senzory (viz konstrukční řešení 3.1). Z těchto důvodů bylo hledání multiplexoru s nadstandardními funkcemi víceméně nezbytné. Multiplexory, které mají dostatečný počet kanálů a zároveň umožňují jednoduchou konfiguraci nabízí třeba společnost Analog Devices. Konkrétně byly zvoleny dva multiplexory ADG731, každý s 32 vstupy. Seznam pinů a zapojení je zobrazen na obr. 23.



Obr. 23 - Zapojení multiplexorů ADG731

Tento typ multiplexoru se vyznačuje kromě velkého počtu kanálů také zabudovaným posuvným registrem, který umožňuje konfiguraci po třech vodičích (kompatibilní s rozhraním SPI). Konfigurace probíhá po vodičích označených jako invertovaný SYNC, DIN a SCLK. Vzhledem k tomu, že má obvod synchronizační pin (SYNC), který slouží k aktivaci obvodu pro vstup dat, je možná datový pin (DIN) a vstup hodinového signálu (SCLK) obou obvodů spojit. Ke konfiguraci dvou obvodů tak stačí pouze 4 vodiče, které vedou do konektoru na flexibilní kabel, odtud pak do řídicí desky a k MCU. Vstupy multiplexorů (značené jako SAx a SBx) jsou zapojeny podle principu z obr. 22 (3.2.1), příklad zapojení je znázorněn na obr. 24. Například pro měření senzoru RTD1, je třeba na multiplexoru A konfigurovat vstup SA1 a na multiplexoru B pak SB1. Pro měření senzoru RTD2, stačí překonfigurovat multiplexor A na vstup SA2.



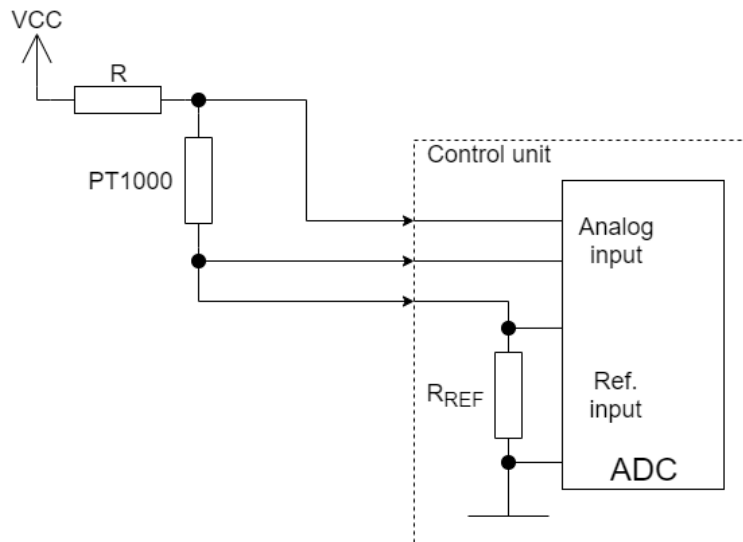
Obr. 24 - Příklad diferenciálního měření pomocí dvou multiplexorů

Výstupy multiplexoru DA a DB tvoří pár vodičů pro diferenciální měření napětí (resp. odporu) zvoleného senzoru diferenciálním AD převodníkem. Tento signál vede do jediného konektoru na desce a odtud flexibilním kabelem do řídicí desky, kde bude spojen s rozdílovým analogovým vstupem ADC.

Multiplexor je možné napájet napájecím napětím 1,8 až 5,5 V, případně symetrickým napájecím napětím až $\pm 2,5$ V. Při symetrickém napájení slouží pin označený jako VDD ke kladnému napájení a pin VSS k zápornému. Pro nesymetrické napájení je třeba pin VSS spojit s pinem GND a ty připojit k zemi. [18]

3.2.3. Referenční teplotní senzor

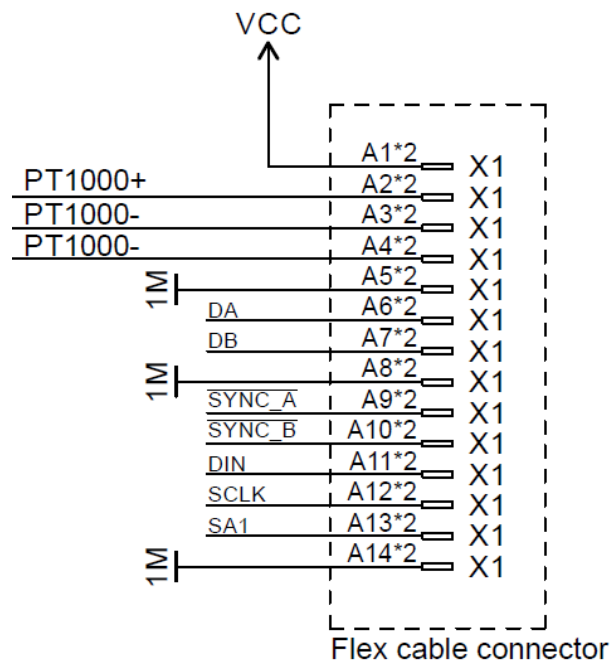
Měděné teplotní senzory použité pro sensorovou matici vyžadují kalibraci, především kvůli relativně velkým rozdílům mezi jednotlivými senzory. Pro kalibraci byl přímo na sensorovou desku umístěn referenční teplotní senzor. Protože jsou použité teplotní senzory založeny na stejném principu jako běžně vyráběné odporové teploměry (RTD), byl jako referenční senzor vybrán právě odporový senzor Pt1000. Výhodou je především to, že se dá použít stejný způsob měření a také stejný ADC. Princip zapojení a měření je v podstatě totožný s měděnými senzory (viz obr. 25). Na desce se senzory se nachází pouze samotný senzor, referenční rezistor je umístěn spolu s AD převodníkem na desce řídicí.



Obr. 25 - Zapojení referenčního senzoru teploty Pt1000

3.2.4. Konektor pro flexibilní kabel

Počet vodičů, které bylo třeba vést mezi sensorovou a řídicí deskou, byl během návrhu sensorové desky několikrát zredukován. Výsledný počet žil pro flexibilní kabel byl stanoven na 14. Celkem se jedná o 3 vodiče exkluzivně pro hlavní měřicí smyčku a 3 vodiče pro smyčku referenční. 4 vodiče slouží pro konfiguraci multiplexorů. Jeden z vodičů slouží k napájení celé sensorové desky (senzorů i multiplexorů). Zbylé tři slouží pro připojení země (1M). Zapojení je znázorněno na obr. 26.

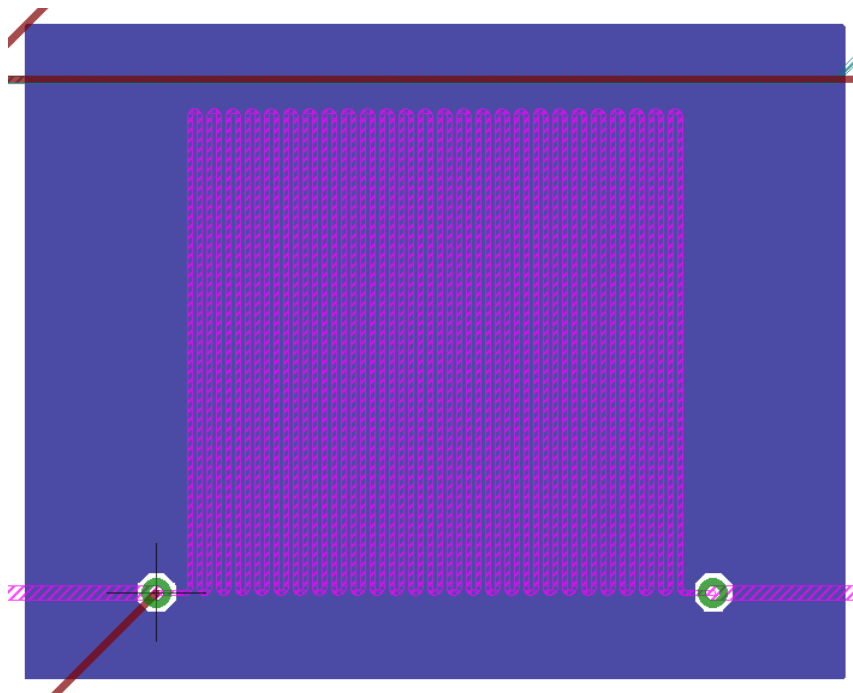


Obr. 26 - Zapojení konektoru pro sensorovou desku

Vodič označený ve schématu jako SA1 slouží k propojení posledního senzoru s referenčním rezistorem. Tento vodič sousedí se čtyřmi vodiči pro konfiguraci multiplexoru. V tomto případě není kombinace analogových a digitálních vodičů nežádoucí. Digitální signál prochází kabelem pouze ve chvíli, kdy probíhá konfigurace. Digitální signál proto nemůže afektovat měření.

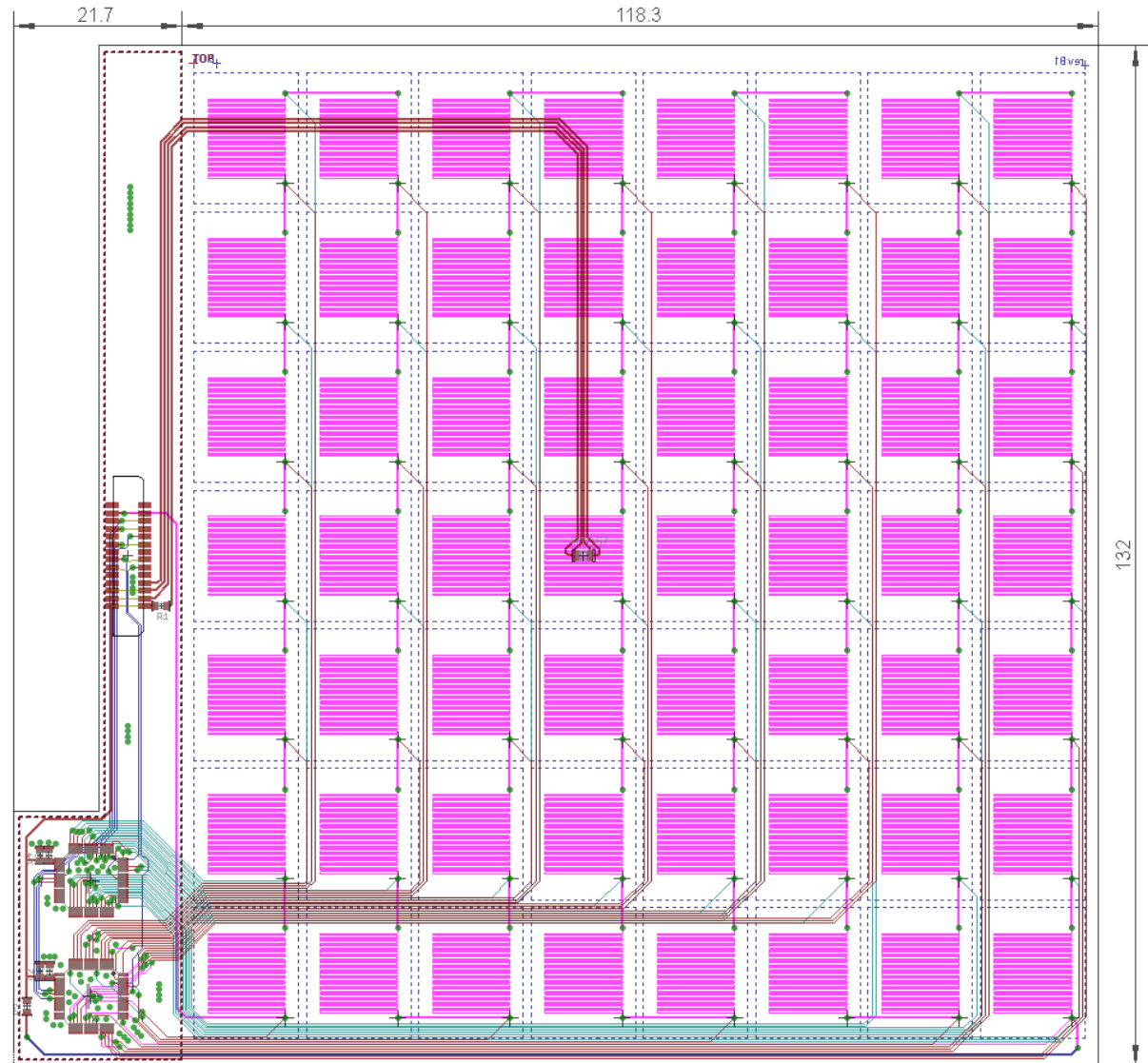
3.2.5. Návrh DPS

Pro návrh sensorové desky bylo velmi zásadní provedení teplotních senzorů a požadavky na podobu sensorové matice. Jako senzory byly vybrány měděné odporové teplotní senzory integrované do vnitřní vrstvy plošného spoje. Základní provedení senzoru zůstalo stejné (viz Obr. 8 - Typy senzorů na zkušební DPS - a) 10 mm x 10 mm (cca 5 Ω), b) dvouvrstvý 10 mm x 10 mm (cca 10 Ω), c) 15 mm x 15 mm (cca 10 Ω) obr. 8), tak jako bylo popsáno v kapitole 2.3, tedy měděný meandr s šířkou cesty a mezerami 0,1 mm a s celkovými rozměry 10×10 mm v jedné vrstvě s reálnou hodnotou odporu kolem 9 Ω při 25 °C. Oproti tomuto základnímu provedení byl každý senzor rozšířen o měděnou plošku v sousední vrstvě, tedy na straně, kde dochází ke kontaktu sensorové desky s EUT. Senzor je tedy umístěn ve vnitřní vrstvě blíže k měřenému zařízení, a to z důvodu lepšího přestupu tepla na senzor. Měděná ploška pod senzorem má rozměry 13,5×17 mm a její hlavní účel je zvýšení teplotní kapacity v oblasti senzoru a zlepšení převodu tepla z boční stěny měřeného zařízení na senzor. V neposlední řadě dochází také k lepšímu definování měřicího bodu, protože díky dobré teplotní vodivosti mědi se dá teplota v rámci této plochy považovat za konstantní, rozložení teploty na senzoru by tedy mělo být homogenní.



Obr. 27 - Provedení teplotního senzoru v matici

Následné rozmístění senzorů na desku bylo provedeno podle jasně definovaných požadavků (viz kapitola 1.2). Matice teplotních senzorů musí pokrývat celou boční stěnu HN i EUT. Tato plocha vyhraničuje obdélník o rozměrech 118,3×132 mm a do této plochy bylo nutné umístit 8×7 senzorů (viz obr. 28).



Obr. 28 - Provedení senzorové DPS

Referenční teplotní senzor Pt1000 byl umístěn nad jeden ze senzorů uprostřed desky na vnitřní stranu (odvrácenou od EUT). Všechny další součástky a konektor pro propojení s řídicí deskou, byly umístěny do části desky, kterou nepokrývají senzory a nachází se mimo plochu samotného modulu a EUT. Cesty z uzlů, kde je měřeno napětí na senzorech, vedoucí do multiplexoru jsou vedeny tak, aby tvořili co nejmenší plochu smyčky. Tato smyčka je vždy uzavřena přes aktuálně zvolený senzor, oba multiplexory a vstup ADC. Pokud by byla smyčka příliš velká, např. by pokrývala téměř celou plochu

desky, mohlo by být měření velmi náchylné na rušení z okolních zařízení. Proto je velmi důležité, aby cesty do jednoho i druhého multiplexoru vedly co nejbližší u sebe, a i multiplexory byly co nejbližší.

Senzorová deska byla vyhotovená jako čtyřvrstvá, v nejvyšší konstrukční třídě jakou výrobce (Gatema PCB) nabízí (konstrukční třída 8). Rozvržení desky umožňuje použití pro levou i pravou stranu naprosto bez úprav.

3.3. Topná deska

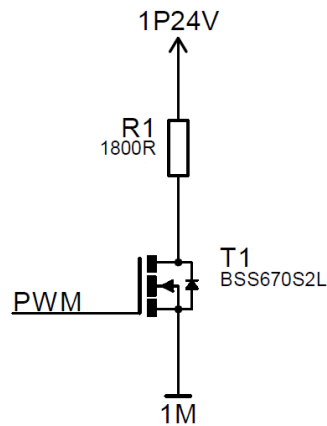
Topná DPS tvoří z hlediska konstrukčního a tepelného ekvivalent k běžné funkční desce z reálného modulu. Její návrh spočíval především v nalezení vhodného počtu elementů a jejich rozmístění na DPS

3.3.1. Topné elementy

Podoba topných elementů byla určena již během vytváření celého konceptu (kapitola 3.3.1). Zbývalo doladit parametry osazených rezistorů, tedy hodnotu odporu a velikost pouzdra. V návrhu byl zahrnut celkový vyzářený výkon v jednotkách wattů (vyplývá z parametrů zařízení z řady S7-1500). Je-li uvažováno použití 52 topných elementů (vysvětleno v následující kapitole 3.3.2) a vyzářený výkon 9 W. Prostým vydělením celkového výkonu počtem elementů, dostáváme přibližnou hodnotu 173 mW na jeden element. Je však nutné počítat s tím, že rozdělení výkonu nebude rovnoměrné, proto bylo potřeba vytvořit určitou rezervu. Odtud lze získat jednoduchým vztahem (3) výsledný odpor 1664,7 Ω . Zvolen byl rezistor s hodnotou 1800 Ω z řady E12. Odpovídající výkon je pak cca 320 mW.

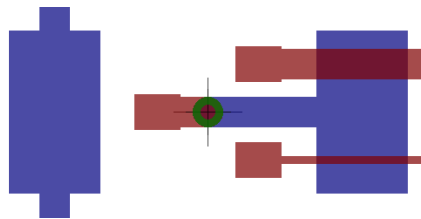
$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{24^2}{0,346} = 1664,7 \Omega \quad (3)$$

Jelikož je maximální příkon pro jeden rezistor relativně velký a na desce je dostatečné množství místa, byly vybrány rezistory ve velkém pouzdře 2512 (6,4×3,2 mm). Takto velké pomůžou i k lepšímu rozložení tepla na desce. Schéma zapojení topného elementu je na obr. 29.



Obr. 29 - Zapojení topného elementu

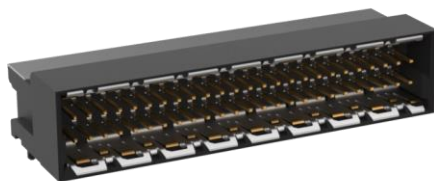
Spínací tranzistor v pouzdře SOT-23 je na každé desce umístěn tak, aby se jeho případná teplotní stopa kryla s tepelným účinkem topného rezistoru. Tranzistor se nachází na druhé straně desky, než topný element a střed jeho pouzdra je přesně v ose s topným rezistorem, viz obr. 30.



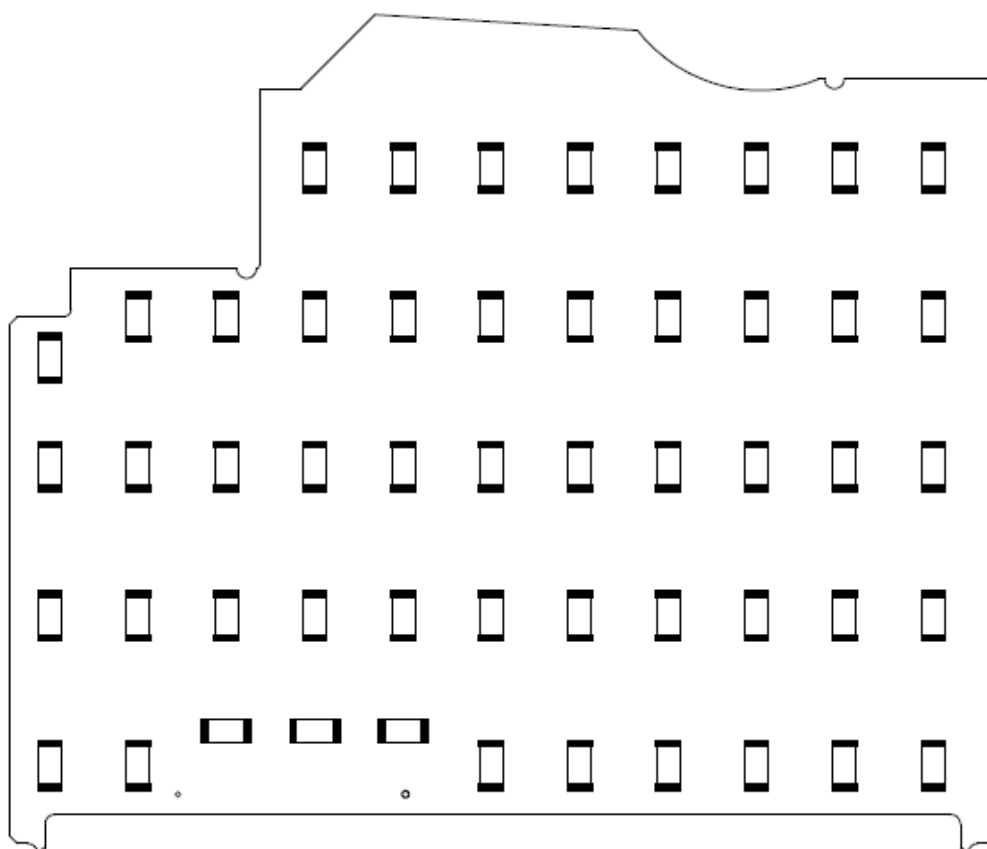
Obr. 30 - Umístění spínacích tranzistorů na DPS

3.3.2. Počet elementů a jejich rozvržení

Cílem tohoto kroku bylo především zaplnění plošného spoje topnými elementy, jako by tomu bylo ve skutečném zařízení. Přesné stanovení požadavků na rozmístění elementů by však vyžadovalo obsáhlou teplotní simulaci, včetně simulace proudění vzduchu. Jelikož se tato možnost nenabízela, byl zvolen experimentální přístup. Zařízení má být schopno replikovat libovolný teplotní profil a není tedy dopředu známo, jak bude tento profil vypadat. Proto bylo aplikováno rovnoměrné rozložení topných elementů. Hustota osazení byla volena tak, aby bylo elementů co nejvíce a zároveň byl počet PWM kanálů pořád jednoduše propojitelný s řídicí deskou. Výsledný počet je 52 kanálů, na tento počet měl vliv i konektor 56pinový Erni MicroSpeed (obr. 31), který byl v té době k dispozici. Rozvržení topných elementů je na obr. 32.



Obr. 31 - Erni MicroSpeed [19]



Obr. 32 - Rozvržení topných elementů

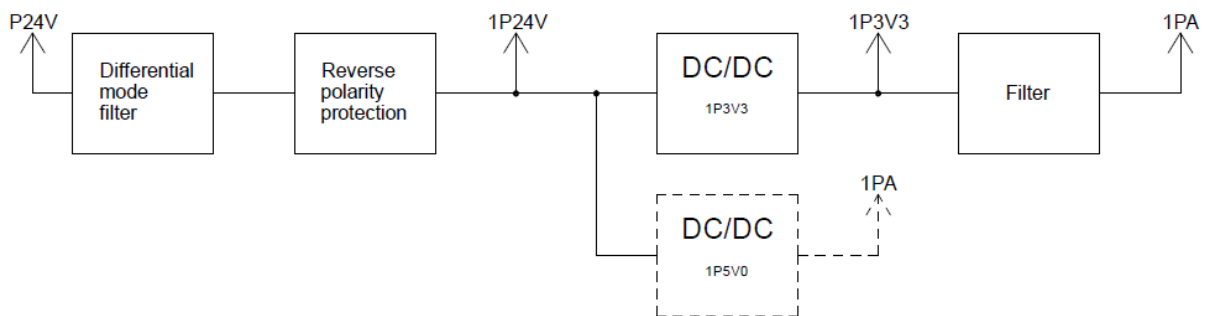
Vybrání ve spodní části desky slouží k umístění zmíněného konektoru, pomocí kterého je deska propojena (skrže spojovací desku, viz obr. 21) s řídicí deskou. Jelikož musí být topné elementy obráceny vždy směrem ven z modulu (a problém by byl rovněž s konektorem), bylo nutné udělat návrh desky dvakrát pro oba moduly zvlášť, nicméně šlo pouze o zrcadlové otočení.

3.4. Řídící deska

Poslední zbývající částí návrhu prototypu je návrh řídicí desky. Protože je řídicí deska provázána prakticky se všemi ostatními částmi, byla její podoba z převážné většiny načrtnuta a ovlivněna předchozími částmi návrhu.

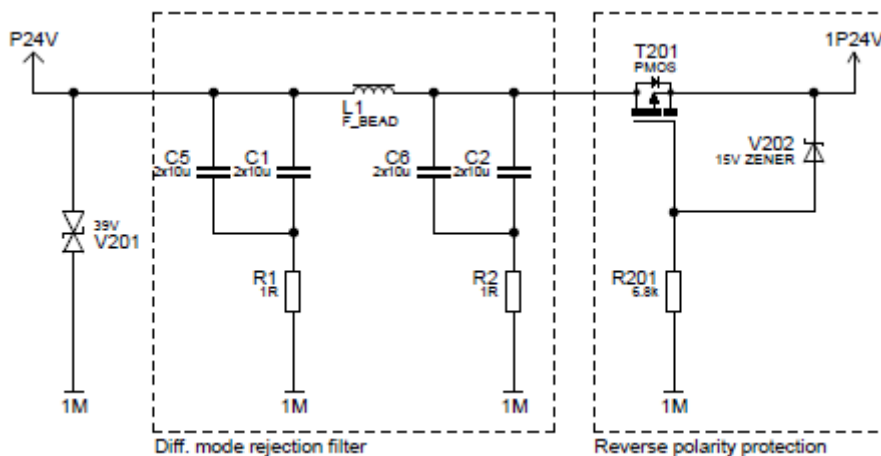
3.4.1. Struktura napájení

Řídící deska, i díky osazení systémovým konektorem, má rovněž za úkol distribuci napájení pro do všech částí modulu. Při návrhu se bylo nutné potýkat především s tím, že se jedná o desku, která kombinuje precizní analogové měření a celou řadu digitálních signálů, včetně PWM. Napájecí řetězec byl navržen podle blokového schématu na obr. 33.



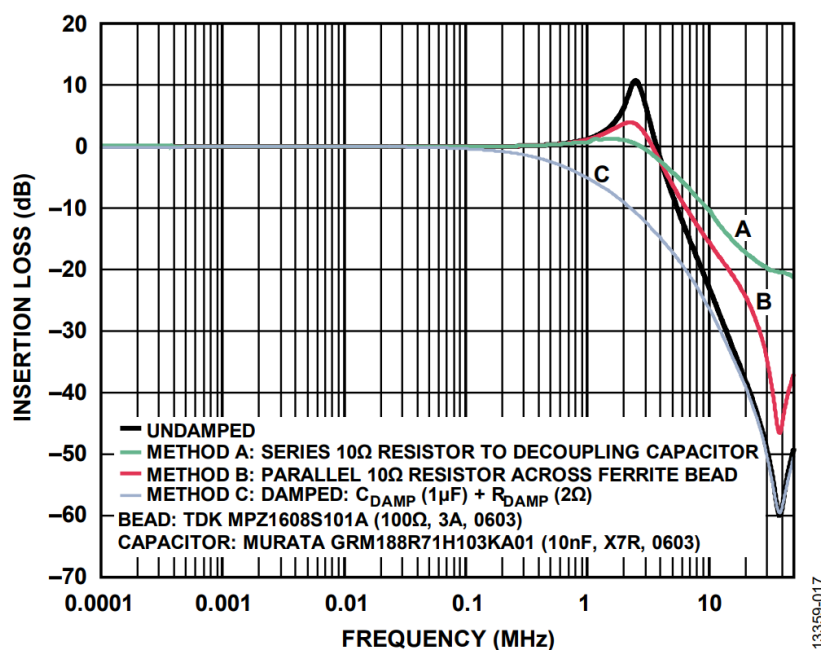
Obr. 33 - Blokové schéma napájecího řetězce

Větev P24 představuje vstupní napájecí napětí s nominální hodnotou 24 V ($\pm 20\%$), které tvoří hlavní a jediný zdroj energie pro napájení celého modulu. Toto napětí je dále vedeno přes vstupní ochrany a filtr. Zapojení vstupu napájení je znázorněno na schématu na obr. 34.



Obr. 34 - Vstupní obvody napájecího napětí

Vstupní obvody zahrnují transil proti napěťovým špičkám, který je následován EMI filtrem proti rozdílovému rušení. Tento filtr slouží proti zarušení od ostatních zařízení na stejné napájecí větvi a zároveň brání šíření vysokofrekvenčního rušení ven z modulu. Jedná se o LC filtr tvořený ferritovou perlou L1 a kondenzátory C1, C2, C5 a C6. Rezistory R1 a R2, jsou v obvodu použity, k navýšení sériového odporu použitých keramických kondenzátorů. Použití kondenzátorů s příliš malým sériovým odporem má za následek překmit v přenosové frekvenční charakteristice filtru, kdy místo očekávaného poklesu přenosu přichází nejdříve špičkový nárůst a až poté přenos pozvolna klesá, viz obr. 35. Černý průběh ukazuje filtr bez tohoto sériového odporu. Problematiku detailně popisuje článek [20].



Obr. 35 - Přenosová frekvenční charakteristika dolní propusti [20]

Filtr proti souhlasnému rušení v tomto případě není třeba, protože modul není v žádném bodě galvanicky spojený se zemí (např. přes lištu racku) a to ani přes definovanou kapacitu. Uvažovat lze maximálně velmi slabou kapacitní vazbu (přes parazitní kapacity), tento vliv byl však zanedbán. Na tento filtr navazuje ochrana proti přepólování tvořená tranzistorem MOSFET typu P. Princip této ochrany spočívá vtom, že při opačné polaritě je na gate tranzistoru přivedeno kladné napětí, tranzistor zůstane zavřený a napětí není distribuováno dále do obvodu. Zenerova dioda V202 je v obvodu z důvodu ochrany tranzistoru, před překročením maximálního napětí mezi gate a source. Odtud teprve je napětí rozvedeno do zbytku modulu už jako větev 1P24V. Napájecí větev 1P24V je dále přímo použita pro napájení topných elementů. Pro potřeby dalších obvodů je větev 1P24V použita také na vytvoření napájecího napětí 3,3 V (3V3 větev), které slouží především pro napájení všech digitálních obvodů včetně MCU. Napájecí větev byla dále použita i pro napájení analogové části, ovšem napájení pro tyto účely odrušeno LC filtrem s ferritovou perlou (stejný princip jako na obr. 34). Na blokovém schématu

je patrné (obr. 33), že byl pro napájení analogové části uvažován též samostatný měnič s výstupním napětím 5 V. Tato varianta však nebyla ve skutečném zařízení použita. [20][21]

3.4.2. Návrh zdroje pro 3V3 větev

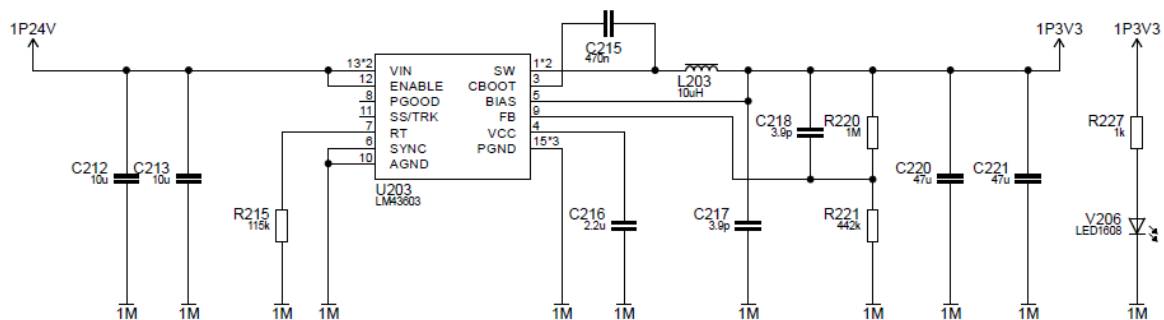
Napájecí napětí 3.3 V tvoří významnou část napájecího řetězce navrhovaných modulů. Slouží k napájení celé digitální části a v současné konfiguraci také pro napájení analogové části včetně teplotních senzorů. Pro návrh byl zvolen nástroj WEBENCH® Power Designer [22] od společnosti Texas Instruments. Jde o nástroj na návrh spínaných zdrojů s obchody od TI. V rámci webové aplikace tak můžeme snadno podle zadaných parametrů vygenerovat možná zapojení, ze kterých lze vybrat to nejvhodnější. Aplikace generuje zapojení se všemi parametry použitých součástek, včetně katalogových čísel výrobce. Při návrhu je tyto součástky nahradit a sledovat změnu parametrů zdroje. To je dobré například v situaci, kdy není možné navrhované součástky sehnat, nespĺňují požadované rozměry nebo chceme zkusit zlepšit parametry zdroje. Možné je provádět i jednoduché simulace.

The screenshot displays the WEBENCH® POWER DESIGNER interface. At the top, there is a red header with the logo and 'MY DESIGNS' button. The main content area is divided into sections: 'Input' with 'Supply type is' set to 'DC', 'Vin Min' at 19.2 V, and 'Vin Max' at 28.8 V; 'Advanced' with 'Vin Nominal' at 24 V and an 'Add an Input EMI Filter' toggle; 'Output' with 'Vout' at 3.3 V, 'Iout Max' at 0.2 A, and an 'Isolated Output' toggle; and 'Design Consideration' with 'I want my design to be' set to 'High Efficiency'.

Obr. 36 - Ukázka formuláře v aplikaci WEBENCH®

Do vstupních parametrů byl zadán především požadovaný rozsah vstupního napětí (v tomto případě 19,2 až 28,8 V), výstupní napětí 3,3 V a maximální výstupní proud, který byl odhadnut na 200 mA.

Zároveň byl vybrán požadavek na vysokou účinnost navrženého zapojení. Na základě zadaných parametrů byl z nabídky aplikace vybrán snižující měnič LM43603. Jehož zapojení je na obr. 37.



Obr. 37 – Zapojení snižujícího měniče pro napájecí větev 3V3

Výsledný zdroj by měl mít při použití navrhovaných součástek výstupní napětí 3,3 V ($\pm 0,1$ %, při použití zpětnovazebních rezistorů s tolerancí 1 %) a účinnost necelých 90 %. Tato účinnost je pro zadaný rozdíl vstupního a výstupního napětí velmi příznivá.

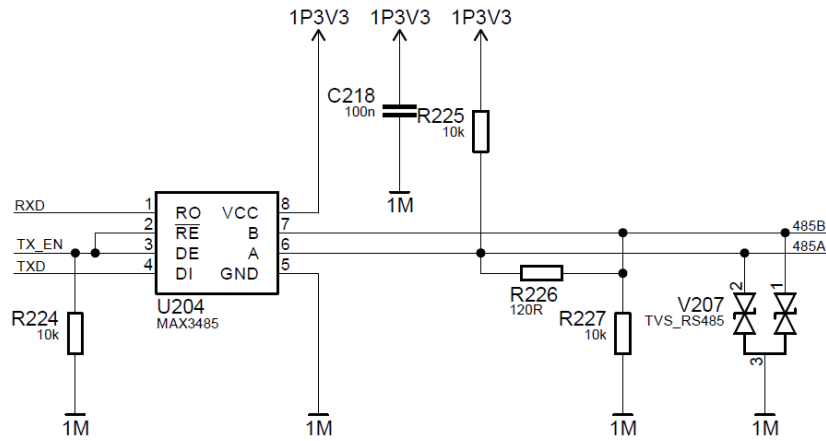
3.4.3. Komunikace

V rámci požadavků na jednoduchost a robustnost spojení modulů s PC nebo řídicím master modulem bylo již od prvotních úvah zamýšleno využití standardu RS485, který slouží jako základ pro některé průmyslové sběrnice (např. Profibus). Jedná se o diferenciální polo-duplexní sběrnici, splňující nároky na robustnost (diferenciální sběrnice, spojení kroucenou dvojlínkou) a jednoduchost spojení (dva vodiče).

Pro komunikaci řídicího mikrokontroléru po sběrnici se využívají speciální obvody označované jako transceivery nebo drivery, v principu jde o převodníky úrovní mezi sériovým rozhraním MCU (v tomto případě asynchronní rozhraní UART) a zvolenou sběrnici. Příkladem takového obvodu je například MAX485 od firmy Maxim, ten je však jako většina ostatních obvodů navržen pro 5V napájení a logiku. Řídicí deska je ovšem koncipována primárně pro pracovní napětí 3,3 V, minimálně pro digitální část. Řešením bylo využití obvodu MAX3485, ten je navržen pro napájecí napětí 3,3 V.

Použité zapojení transceiveru je znázorněno na obr. 38. Obvod má celkem 8 vývodů, přičemž dva z nich (VCC a GND) slouží pro připojení napájecího napětí, GND zároveň tvoří společnou signálovou zem. Sériové rozhraní MCU je připojeno na piny RO (receiver output, RxD pin procesoru) a DI (driver input, TxD pin procesoru). Pin DE (driver output enable) a invertovaný pin RE (Receiver output enable) slouží k aktivaci přijímací a vysílací části. U polo-duplexní komunikace jimi řídíme směr toku dat a díky invertované polaritě jednoho z nich můžeme oba piny spojit. Rezistor R224 slouží jako pull-down a zajišťuje a definuje klidový stav na log. 0, tedy aktivaci přijímací části. Piny A a B tvoří

diferenciální vstup a výstup signálu pro připojení ke sběrnici RS485. Rezistor R226 slouží jako volitelný terminátor a rovněž volitelné odpory R225 a R227 slouží k definování klidového stavu na sběrnici u koncových zařízení. Mezi vodiči A a B je ještě zapojen dvojitý transil (TVS dioda) jako elementární EMC ochrana.



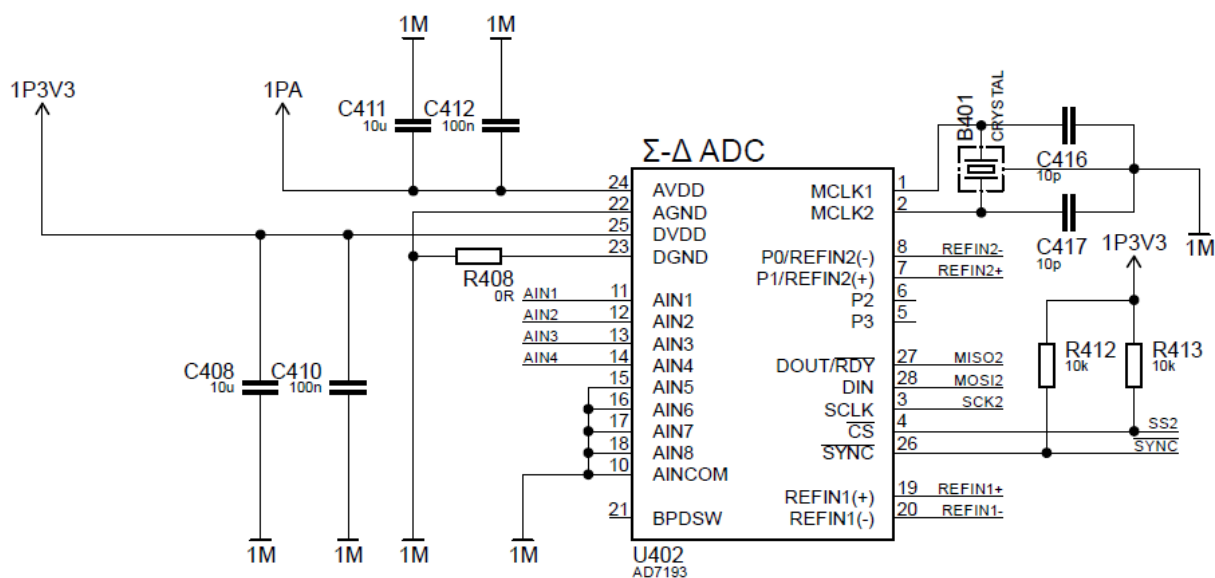
Obr. 38 - schéma komunikační části

3.4.4. Analogová část

AD převodník je klíčový prvek analogové části řídicí desky, zodpovědný za měření elektrického odporu senzorů, a tedy i teplot v sensorové matici. Vhodný kandidát byl naznačen již v kapitole 2.5.2. Skupina převodníků od společnosti Analog Devices označených jako AD719x, nabízí 24bitové AD převodníky s minimálně dvěma kanály a s možností připojení druhého referenčního napětí. Může se zdát, vzhledem k požadavku na minimálně 12 efektivních bitů, že je AD převodník s dvojnásobným rozlišením předimenzovaný. Toto rozlišení je však pouze teoretické maximum. Skutečné efektivní rozlišení (bez šumu) závisí na řadě parametrů. Klíčovou vlastností vybraného typu převodníku je právě potlačení nízkofrekvenčního šumu (viz 2.5.2), Úroveň potlačení šumu závisí především na úrovni oversamplingu, nastavení digitálního filtru a nepřímo také na požadované době převodu. Při požadavku na plné rozlišení převodníku, lze očekávat i dobu převodu dosahující na vyšší stovky milisekund. To by u 56 senzorů znamenalo celkovou dobu měření dosahující na desítky sekund, např. pro měření teploty při kalibraci by tento časový úsek mohl představovat velkou chybu v měření. Možnosti konfigurace takového převodníku jsou velmi široké. Sigma-Delta ADC s vysokým rozlišením tedy nemusí být díky dalším vlastnostem předimenzovaný.

Konkrétně byl vybrán převodník AD7193. Tento 24bitový převodník je vybaven čtyřmi diferenčními analogovými vstupy, precizním zesilovačem s nastavitelným ziskem 1 až 128 (teplotní drift zisku pouze 1 ppm/°C) a integrovaným chop modem. Chopper představuje technologii pro potlačení vstupního offsetu, např. pomocí střídavého invertování vstupního signálu [23]. Mezi další

vlastnosti patří integrovaný buffer, který je možné aktivovat pro každý analogový vstup. Buffer je obvod s jednotkovým napěťovým zesílením. Slouží především k úpravě vstupní impedance na vysokou hodnotu, tak aby např. senzor nebyl zatěžován vstupními obvody převodníku. Důvodem ke zvolení převodníku se čtyřmi kanály oproti verzím se dvěma kanály (např. AD7192), bylo pouze příznivější rozložení pinů. Na obr. 39 je vyobrazeno schéma zapojení převodníku AD7193.



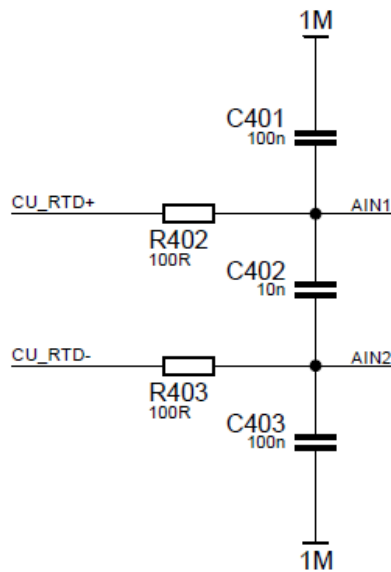
Obr. 39 - Zapojení AD převodníku AD7193

Další předností převodníku je externě oddělené napájení pro digitální a analogové obvody, což umožňuje lépe kontrolovat kvalitu napětí pro analogovou část převodníku. V tomto případě je napájecí napětí pro analogovou část řídicí desky odvozeno od napájecí větve 3V3, viz 3.4.1. Baterie kondenzátorů je použita dle vzorové aplikace, viz [24].

Komunikace s MCU probíhá pomocí sériového rozhraní SPI. Rezistor R413 slouží k definování klidového stavu invertovaného pinu chip select CS. V klidovém stavu je komunikace deaktivována. Stejný účel má rezistor R412 pro invertovaný pin SYNC. Tento pin slouží pro synchronizaci převodu ADC. Tento signál má význam například ve chvíli, kdy je využíváno více převodníků najednou, v tomto případě není využitý a je trvale deaktivován. Mezi piny MCLK1 a MCLK2 se ve schématu nachází připojený krystal, obvod má však interní oscilátor 4,92 MHz, krystal proto není na skutečné desce osazen, jedná se pouze o volitelnou možnost.

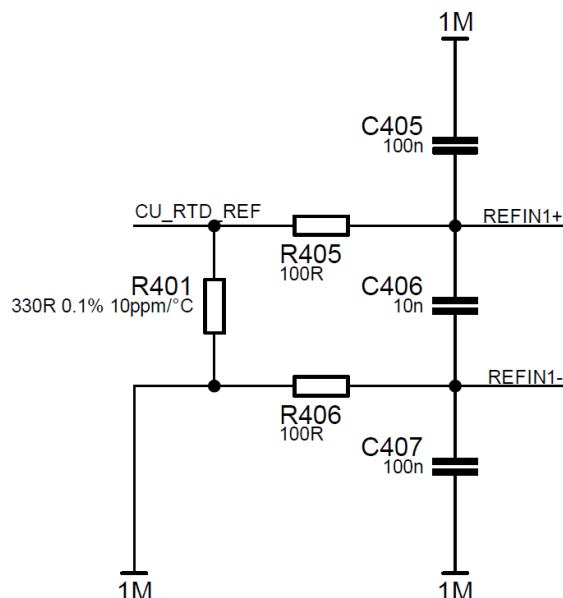
Zbývajícími částmi schématu jsou analogové vstupy přímo související s měřením. Dvojice vstupů na schématu označených jako AIN1 a AIN2 tvoří diferenční vstup pro měření napětí na měděných senzorech. Každý analogový vstup je vybavený RC dolní propustí (viz obr. 40). Tento filtr slouží k potlačení rušení na vzorkovací frekvenci modulátoru. Použity jsou doporučené hodnoty, viz datasheet obvodu [16]. Vstupy pro měření referenčního senzoru Pt1000 (AIN3 a AIN4) jsou rovněž vybaveny identickým RC filtrem. Vstupní svorky RC filtrů jsou připojeny ke konektoru pro flexibilní

kabel a jsou tedy přímo spojeny s multiplexerem (v případě AIN1 a AIN2) nebo se senzorem Pt1000 (v případě AIN3 a AIN4).



Obr. 40 – RC dolní propust pro analogové vstupy ADC

Mírně odlišná je situace u vstupů pro referenční napětí. Použitý byl opět identický RC filtr, ovšem měřený objekt, tedy referenční rezistor, je umístěný přímo na řídicí desce. Schéma, shodné pro oba vstupy reference (kromě hodnoty referenčního rezistoru), je znázorněné na obr. 41.



Obr. 41 - RC dolní propust pro vstup reference s referenčním rezistorem

Pro výpočet hodnoty referenčního rezistorů bylo dodržet určité požadavky. První požadavek byl na minimální hodnotu rozdílového referenčního napětí 1 V [16]. Jinými slovy bylo nutné

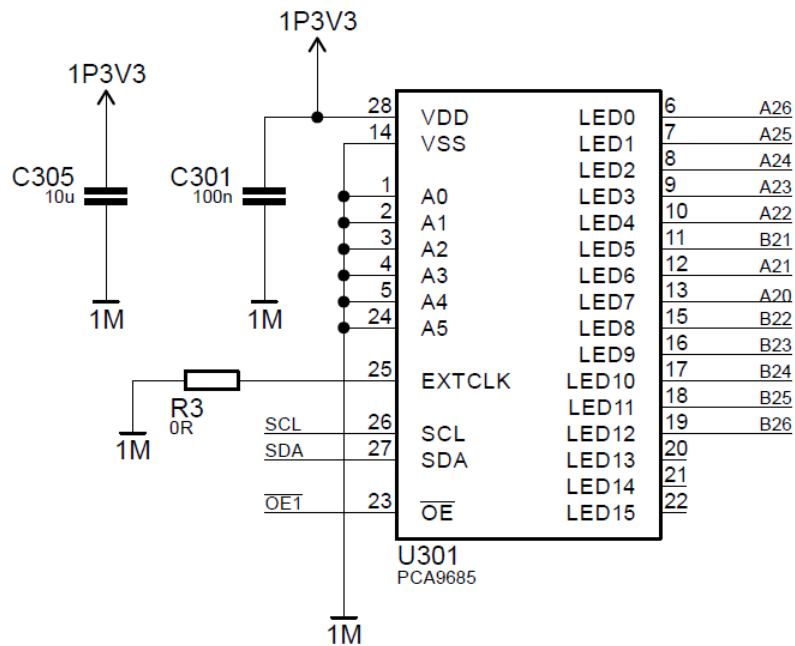
zabezpečit, aby napětí na referenčním rezistoru za žádných okolností nekleslo pod 1 V. Druhým důležitým požadavkem bylo zajistit, aby napětí mezi zemí a analogovým vstupem bylo o 250 mV nižší, než napájecí napětí analogové části [16]. To je zabezpečeno volbou srážecích rezistorů, které jsou umístěny na sensorové desce. Důležitým parametrem je také požadavek na maximální proud senzory. Výpočet je triviální, jedná se o dělič napětí, sestávající se ze třech prvků., tedy srážecího rezistoru, odporu všech senzorů nebo senzoru (v případě referenčního senzoru) při maximální teplotním rozsahu a referenčního rezistoru. Na základě těchto výpočtů byly zvoleny referenční rezistory s hodnotou 330 Ω (100 Ω srážecí rezistor) pro smyčku s měděnými senzory a 12 kΩ (10 kΩ srážecí rezistor) pro kalibrační smyčku s Pt1000. Proud měděnými senzory byl nastaven na přibližně 3 mA pro měděné senzory a přibližně 140 μA. Výrazně vyšší proud měděnými senzory je volen hlavně z důvodu násobně nižšího odporu a výrazně větší plochy senzoru. Měděný senzor má přibližně 40× větší plochu než Pt1000 v pouzdře 0805. Proto není třeba očekávat významné parazitní zahřívání senzoru.

3.4.5. PWM signál

Analýza provedená v kapitole 2.6.2, stanovila celkem jasný směr pro výběr PWM řadiče. Z vícekanálových PWM řadičů, které se podařilo na trhu dohledat, měl pouze zlomek čistě napěťový výstup. Tyto řadiče nabízí společnost Nexperia, konkrétně jde například o obvody PCA9634, PCA9635 nebo PCA9685. Obvod PCA9634 nabízí pouze 8 kanálů. Topná deska byla navržena pro celkem 52 kanálů, to by znamenalo osadit na řídicí desku celkem 7 těchto obvodů. O něco vhodnější se zdál obvod PCA9635, který už má celkem 16 nezávislých PWM kanálů. Rozlišení PWM obou obvodů je však pouze 8bitové (tedy 256 kroků). Z těchto tří obvodů byl nakonec vybrán obvod PCA9685. Na rozdíl od předchozího řadiče nabízí 16 nezávislých PWM kanálů s rozlišením 12 bitů. Při zvoleném topném rezistoru s hodnotou 1,8 kΩ, lze topný výkon na topném rezistoru podle výpočtu (4) nastavit s krokem přibližně 0,078 mW. Tento krok je patrně příliš jemný, skutečný požadavek na rozlišení však není možné jednoduše vyčíslit, proto byl pro prototyp preferován spíše obvod s lepším rozlišením.

$$\Delta P = \frac{P_{MAX}}{2^{12}} = \frac{R_{PWM}}{2^{12}} = \frac{24^2}{2^{12}} = 0,078 \text{ mW} \quad (4)$$

PWM kanály řadiče fungují v režimu push-pull, a jejich s výstupní proud je až 25 mA. V tomto případě však budou sloužit pouze ke spínání externího tranzistoru, nepoteče zde tedy téměř žádný proud. Obvod komunikuje po I²C sběrnici. Značnou výhodou je hardwarově definovaná I²C adresa. K tomu slouží piny označené jako A0 až A5 (viz obr. 42). Řídicí deska je osazena celkem čtyřmi řadiči, proto je nastavení rozdílných adres nezbytné. V opačném případě by bylo nutné doplnit zapojení například o přepínač hodinového signálu.



Obr. 42 - Zapojení PWM řadiče PCA9685

Vstup řadiče pro externí hodinový signál není využit, obvod má vestavěný 25MHz oscilátor. Vstup pro hodinový signál je dle instrukcí v datasheetu [25] připojen na zem. Nulový rezistor je na desce umístěn za účelem případných budoucích úprav prototypu. Řadič dále disponuje na negovaným vstupem OE (output enable), který slouží k aktivaci výstupů. V neaktivním stavu jsou výstupy ve stavu vysoké impedance. Pokud jsou výstupy aktivovány, je výchozí stav výstupů po zapnutí obvodu log. 0.

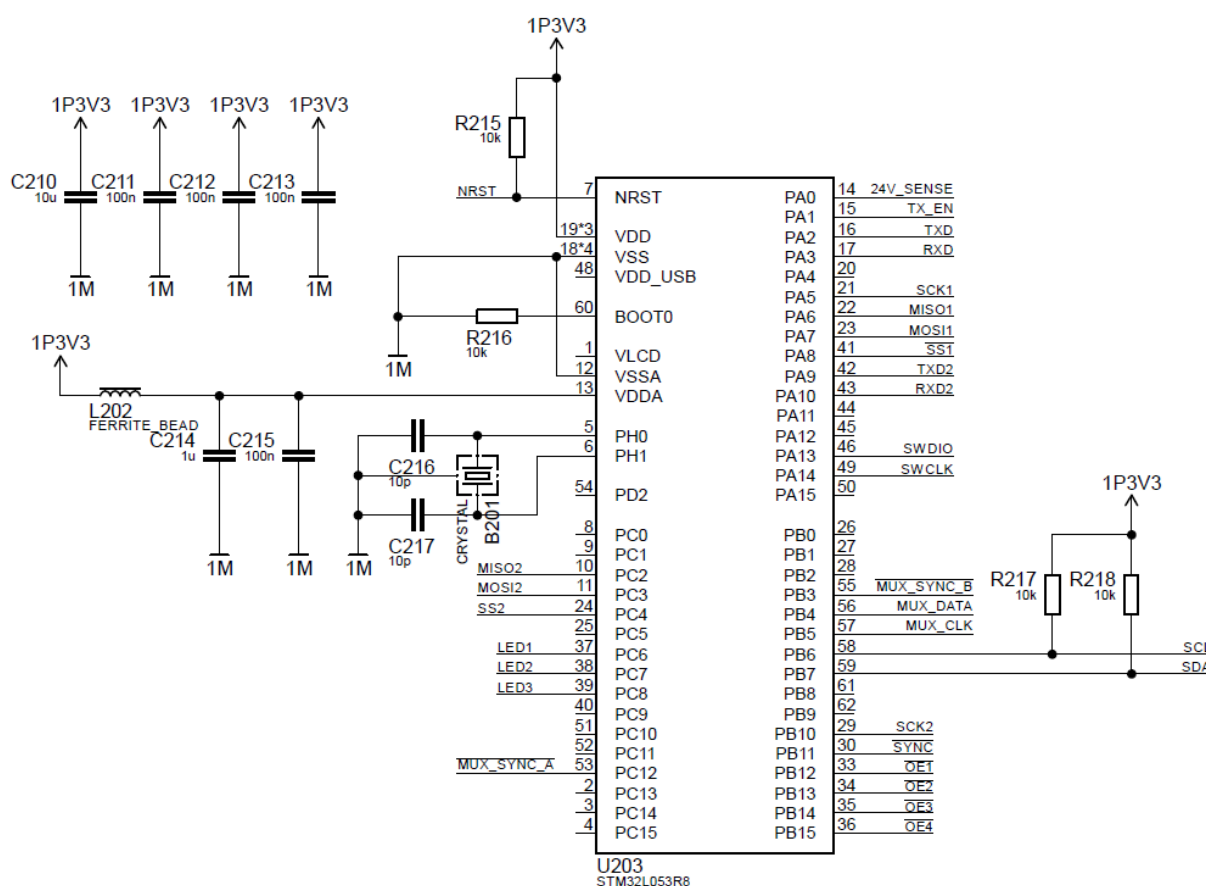
3.4.6. Mikrokontrolér

Pro výpočetní část desky, byl zvolen MCU STM32 (viz 2.1.2). Pro výběr konkrétního modelu MCU, bylo nutné zhodnotit požadavky na interní periferie a počet univerzální vstupů a výstupů (GPIO). Do těchto požadavků se promítají například zvolené externí periferie, jejich komunikační rozhraní a další vstupy nebo výstupy. Seznam těchto rozhraní je uveden v tab. 5.

Tab. 5 - Seznam požadavků na výběr MCU

Typ periferie	Počet	Komentář
UART	2	RS485, druhý UART pro ladění firmware a pomocné výstupy
RS485 flow pin	1	MCU s možností automatické aktivace RS485 transmitteru
SPI	2	ADC, externí paměť
I2C	1	PWM řadič
Externí krystal	1	Vstup pro externí krystal
ADC	1	Interní ADC pro měření napájecího napětí modulu
GPIO	11	3× LED, 4× konfigurace multiplexorů, 4× PWM output enable

Dle požadavků kapitoly 2.1.2 a tab. 5, byl jako vyhovující zvolen mikrokontrolér STM32L452RET6, jehož zapojení je znázorněno na obr. 43.

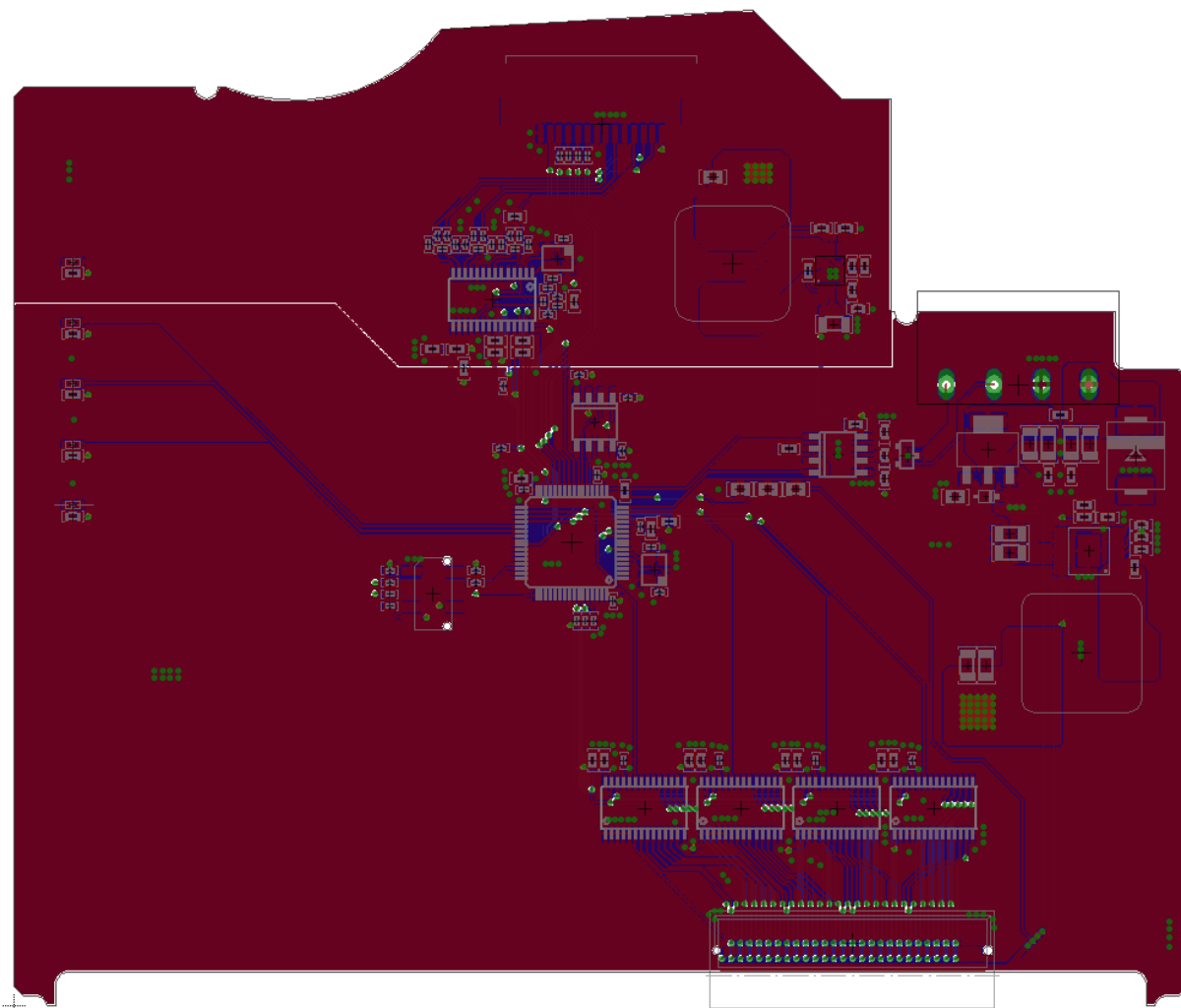


Obr. 43 - Zapojení MCU

Programování a ladění MCU bude probíhat pomocí rozhraní SWD. Cílem byla kompatibilita s debuggerem ST-Link, umístěným na vývojovém kitu Nucleo. Pro zajištění kompatibility bylo potřeba tří vodičů. Datového vodiče SWDIO, hodinového signálu SWCLK a negovaného resetu NRST. [26]

3.4.7. Specifika návrhu DPS

Stejně jako v případě topné DPS, je i řídicí deska zrcadlově otočená pro levý a pravý modul. Bylo tedy opět nutné připravit dva unikátní návrhy. Nejzásadnějším krokem při návrhu řídicí desky bylo rozmístění analogové a digitální skupiny součástek. Nevhodné rozmístění by mohlo způsobovat rušení přesného měření teploty. Tomu má předejít především jednoznačné oddělení analogové a digitální části (např. vhodným umístěním) a poté jasné definování toku digitálních signálů a napájecích proudů digitálních periférií. V tomto případě šlo především o signál PWM, který na rozdíl od komunikace SPI AD převodníku a konfigurace multiplexoru, běží i během prováděného měření. Celá deska byla rozdělena na dvě poloviny z hlediska analogu a digitálu. Analogová část byla umístěna v horní části desky, přičemž samotné oddělení je provedeno pomocí rozlitych vrstev země a napájecího napětí, viz obr. 44.



Obr. 44 - Řídicí DPS

V pravé části DPS (ve složeném stavu půjde o spodní stranu modulu), se nachází čtyřpinový konektor pro systémovou svorkovnici. Pod tímto konektorem se nachází snižující měnič pro větev 3V3, 4 PWM řadiče se nachází ve spodní části DPS, spolu s konektorem, který slouží pro propojení řídicí a topné desky. Pulzní proudy, způsobené PWM signálem, budou tedy orientovány především v levé spodní čtvrtině DPS. Především z tohoto důvodu je výhodné umístění AD převodníku v horní části DPS.

4. Oživení prototypu a příprava měření

Kapitola popisuje kompletní postup po dokončení prvního prototypu. V této fázi bylo nutné postupně oživit jednotlivé části modulů, připravit návrhy kalibrací a metodiky měření a také připravit firmware pro účely testování funkčnosti a základní ověření prezentovaných ideí.

4.1. Oživení prototypu

Oživením prototypu je v tomto případě myšleno naprogramování řídicího MCU. Ačkoli je předmětem této práce primárně návrh hardware, pro otestování funkčnosti bylo třeba připravit několik variant testovacího firmware. Tato kapitola popisuje některé důležité části přípravy.

4.1.1. Vývojové prostředí

Společnost STMicroelectronics nabízí ke svým MCU STM32 velmi kvalitní vývojové prostředí STM32cubeIDE, které je k dispozici zdarma. Toto prostředí kombinuje známé vývojové prostředí Atollic TrueSTUDIO (Eclipse) a konfigurační nástroj CubeMX. Nástroj CubeMX umožňuje jednoduchou konfiguraci všech integrovaných periférií MCU pouhým klikáním. Po dokončení konfigurace je možné vygenerovat kód v jazyce C/C++, kde už uživatel píše jen svůj vlastní program. Nástroj CubeMX pracuje s vysokoúrovňovými knihovnami HAL (High Abstraction Layer), které umožňují snadnou obsluhu vestavěných periférií.

4.1.2. Konfigurace ADC AD7193

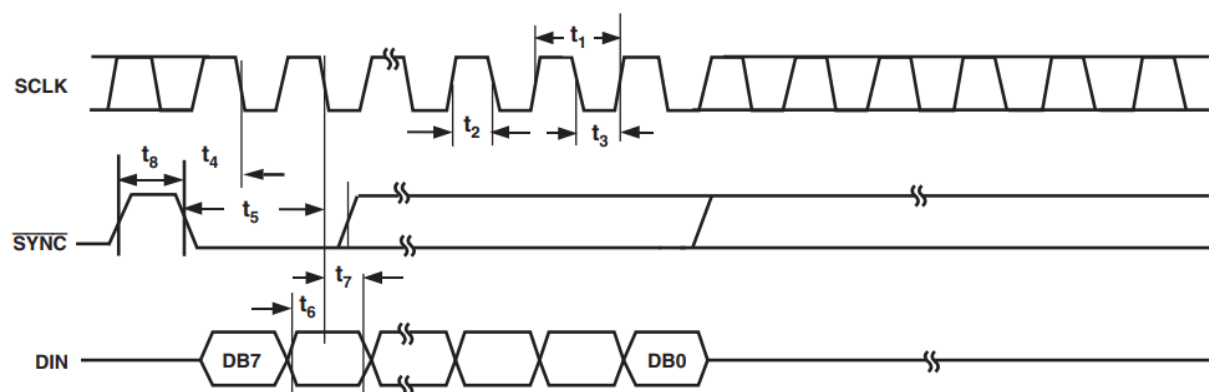
AD převodník AD7193 je spojen s MCU přes rozhraní SPI. Jakákoliv komunikace s tímto ADC začíná zápisem 8 bitů do komunikačního registru (Communications register). Zápisem do tohoto registru se konfiguruje, jestli další krok bude čtení nebo zápis a pro jaký registr bude tato operace provedena. Bez zápisu do komunikačního registru, nemůže probíhat další komunikace. K tomu je využito knihovny HAL SPI. Seznam těchto registrů je v tab. 6 [16].

Tab. 6 - tabulka interních registrů ADC AD7193

Název registru	Čtení/zápis (R/W)	Počet bitů	Popis
Communications	W	8	Po zápisu do tohoto registru, probíhá další komunikace
Status	R	8	Stavový registr, indikace probíhajícího měření nebo chyb
Mode	R/W	24	Registr pro nastavení módu měření
Configuration	R/W	24	Volba vstupu, reference, konfigurace vstupu (polarita, buffer atd.)
Data	R	24	Registr obsahující aktuální hodnotu převodu
ID	R	8	Identifikační číslo převodníku AD7193
GPOCON	R/W	8	Konfigurace GPIO pinů
Offset	R/W	24	Zde je uložena kalibrační konstanta offsetu
Full Scale	R/W	24	Zde je uložena kalibrační full-scale kalibrační konstanta

4.1.3. Konfigurace multiplexorů ADG731

Multiplexory ADG731 jsou vybaveny konfiguračním posuvným registrem, který je kompatibilní s rozhraním SPI. Při návrhu zařízení ovšem nedošlo k připojení konfiguračních vodičů fyzickému rozhraní SPI MCU. Komunikace je proto provedena softwarově, za pomoci časovače, přerušení a GPIO pinů. V praxi to probíhá tak, že v každém přerušení je nutné přepnout hodnotu pinu, který slouží jako hodinový signál. S nastavenou kladnou hodnotou hodin jsou zároveň nastavena i data (obvod čte hodnotu při sestupné hraně). Je nutné dodržovat schéma časování, viz obr. 45.

**Obr. 45 - Diagram časování průběhů pro multiplexor ADG731 [18]**

4.1.4. PWM řadiče PCA9685

Konfigurace PWM řadičů probíhá pomocí volně dostupné knihovny pro mikrokontroléry STM32 s využitím knihoven HAL. Tato knihovna je ve formě projektu pro vývojové prostředí STM32CubeIDE (nebo kompatibilní) dostupná na portálu GitHub [27]. Řadič PCA9685 komunikuje s MCU pomocí sběrnice I²C, zde je využito funkcí z knihovny HAL I²C. Knihovna nabízí například funkci pro jednoduchou konfiguraci střídavy pro jednotlivé kanály nebo funkci pro změnu frekvence PWM (PCA9685 umožňuje nastavení výstupní frekvence v rozsahu 24 až 1526 Hz) [25]. Autor knihovny však pravděpodobně počítal s použitím pouze jediného obvodu PCA9685, proto je v knihovně integrována pouze pevná I2C adresa pro všechny operace. Knihovnu bylo nutné upravit tak, aby bylo možné v hlavičkách funkcí zadávat adresu cílového řadiče. Příklady dvou nejdůležitějších částí knihovny, viz (5).

PCA9685_SetPwmFrequency (uint8_t Address, uint16_t Frequency)

Address – 8bit adresa I²C zařízení

Frequency – požadovaná výstupní frekvence v Hz

PCA9685_SetPin (uint8_t Address, uint8_t Channel, uint16_t Value, (5)

uint8_t Invert)

Address – 8bit adresa I²C zařízení

Channel – číslo konfigurovaného kanálu (0 až 15)

Value – hodnota střídavy (0 až 4095)

Invert – inverze výstupních hodnot (0 nebo 1)

4.1.5. Regulace topných elementů

Pro regulaci výkonu topných elementů byla vybrána triviální implementace PI regulátoru (viz [28]). PI regulátor se skládá ze dvou částí. Výstup proporcionální části regulátoru je roven regulační odchylce $e(t)$ vynásobené konstantou zesílení proporcionální části K_P . Výstup integrační části je roven integrálu regulační odchylky, který je vynásoben konstantou zesílení integrační části K_I . Matematické vyjádření viz (6). Diskrétní implementaci do jazyka C popisuje rovnice (7).

$$x(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt \quad (6)$$

$e = \text{požadovaná hodnota} - \text{aktuální hodnota}$

$$\text{output} = K_P \times \text{ERROR} + K_I \times \left(\sum \text{ERROR} \right)_n$$

$$\text{ERROR} = \text{setpoint} - \text{input} \quad (7)$$

$$\left(\sum \text{ERROR} \right)_n = \left(\sum \text{ERROR} \right)_{n-1} + (\text{ERROR} \times \Delta t)$$

Za setpoint (požadovanou hodnotu) je považována v tomto případě požadovaná odchylka teploty, která by měla být v nejlepším případě nulová. Vstupní hodnotě (input) odpovídá aktuálně změřená odchylka teploty od teploty ve zdrojovém profilu. Output (akční veličina) je hodnota střídý PWM signálu. Δt představuje čas od minulého výpočtu výstupní hodnoty.

4.1.6. Zpracování dat

Práce se vstupními a výstupními daty byla pro účely testování velmi zjednodušena, a to především kvůli snazší implementaci jednotlivých testů. Odesílání naměřených dat z HN probíhá napřímo do PC přes UART nebo RS485 (a odpovídající převodníky). V PC jsou data zaznamenána přes sériový terminál. Aby bylo možný data za běhu testu kontrolovat, je třeba aby byly v čitelném formátu (například odpor nebo teplota). Pokud jsou tyto hodnoty oddělené například středníkem a na konci řádku je zakončovací znak (CR, LF), je možné tyto data jednoduše nahrát do excelu a dále s nimi pracovat. Některé složitější operace zpracování dat jsou pro zjednodušení prováděny ručně v programu Excel (například kalibrace teplotních senzorů) a do modulů jsou pak nahrány do paměti MCU jako součást firmware. Například teplotní profil pro kalibraci výkonu topných elementů je do součástí zdrojového kódu jako pole integer hodnot (hodnota teploty zaokrouhlená na jedno desetinné místo vynásobená 10), viz (8).

```
uint16_t calTemp[] = {294, 306, 320, 328, 331, 331, 329, 353, 356, 354, 350,
                     341, 322, 304, 314, 336, 355, 365, 370, 372, 372, 382,
                     383, 378, 372, 362, 344, 323, 331, 351, 365, 376, 383,
                     388, 387, 390, 390, 384, 376, 364, 351, 331, 328, 345,
                     357, 369, 380, 387, 390, 384, 382, 371, 358, 342, 335,
                     323};
```

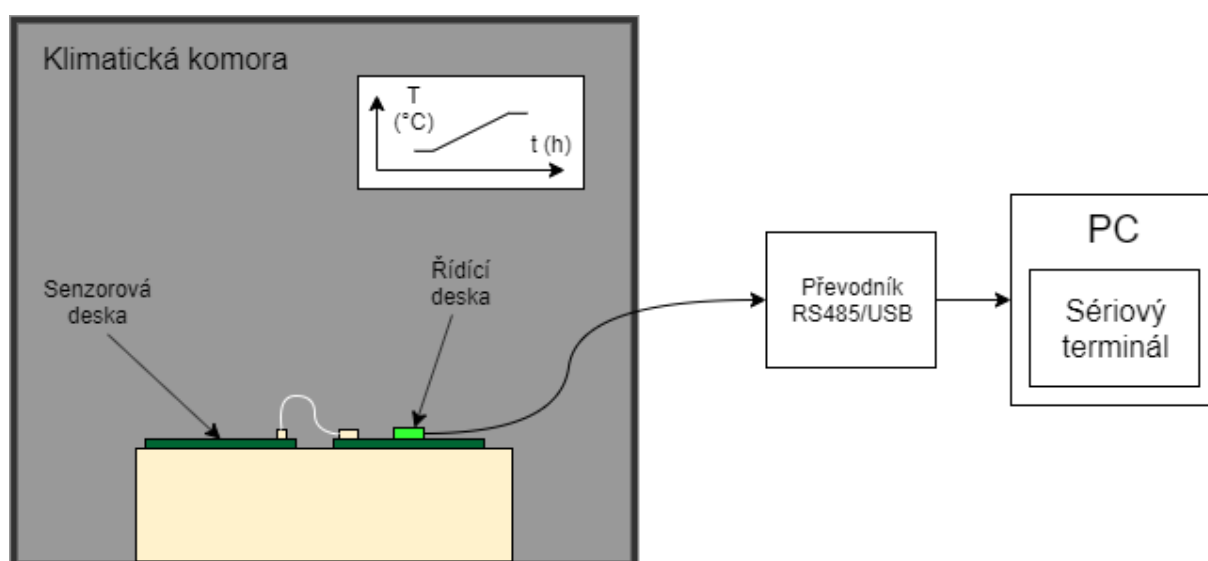
(8)

4.2. Kalibrace a testy

Tato kapitola popisuje cíle a průběh naplánovaných přípravných měření a testů. Cílem je ověření funkčnosti navrženého referenčního systému a také celého konceptu.

4.2.1. Kalibrace sensorové matice

Jak již bylo několikrát zmíněno, měděné senzory teploty používané v měřicí matici vyžadují kalibraci. Proces kalibrace je shodný s procesem, který byl použit pro desku se zkušebními senzory (viz 2.3). Testovací sestavu zobrazuje obr. 46.



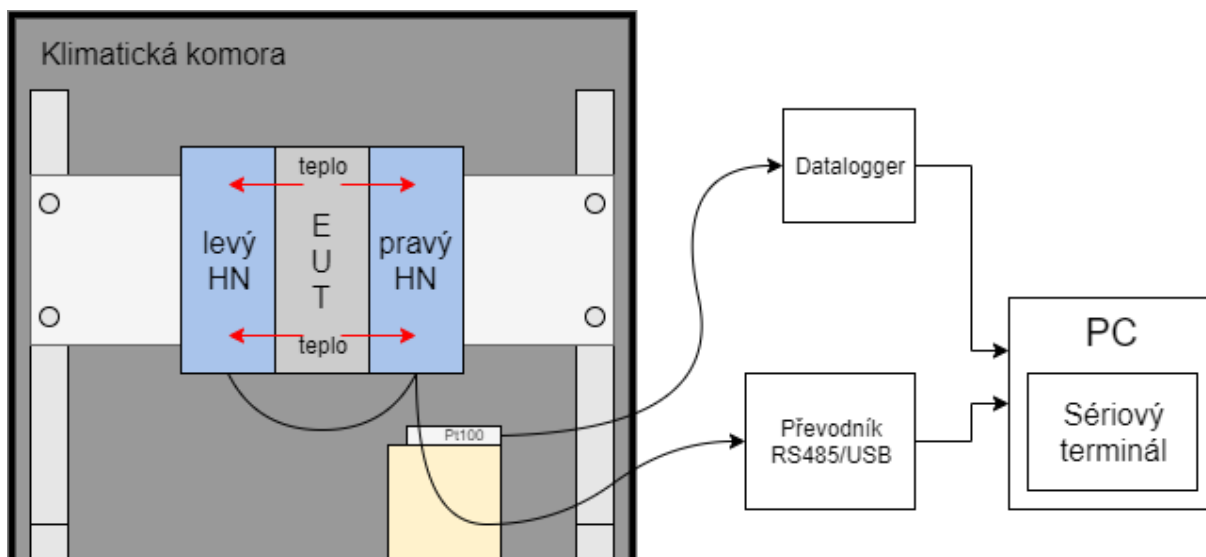
Obr. 46 - Kalibrace matice teplotních senzorů

Pro kalibraci je třeba pouze sensorové a řídicí desky bez plastového krytu modulu. Modul je nakonfigurován pro periodické odesílání hodnot změřeného odporu ze sensorové matice i referenčního senzoru Pt1000 v požadovaných intervalech na sériový terminál v PC. Hodnoty jsou odesílány po sběrnici RS485 vzájemně oddělené středníkem. Z naměřených hodnot je provedena kalibrace (proložení závislosti odporu na teplotě přímkou) podle postupu uvedeném v kapitole 2.3.4. Výstupem kalibrace jsou kalibrační konstanty přímek pro jednotlivé senzory, které slouží přepočtu naměřeného odporu na teplotu.

4.2.2. Měření teplotního profilu

Cílem testu je změření teplotních profilů na bočních stěnách EUT. EUT je v tomto testu zařízení, jehož teplotní profil chceme ověřit nebo jehož profil má být použit pro replikaci. Při návrhu této procedury se vycházelo z předpokladu, že by tento test měl probíhat za podmínek, při kterých bude probíhat skutečný test EUT. Skutečným testem je v tomto případě myšlen teplotní test PLC modulu podle interní normy.

Základní požadavek je průběh testu v klimatické komoře. Teplota v komoře by měla odpovídat maximální teplotě pro vybrané EUT a jeho polohu (moduly S7-1500 lze provozovat nejen horizontálně umístěné liště, ale také vertikálně, při dodržení nižšího teplotního limitu). Zařízení typu heating neighbour jsou umístěna na stejnou lištu z obou stran EUT v co nejtěsnějším kontaktu, pro zvýšení kvality přenosu tepla a kvality samotného měření. EUT musí být zároveň plně zátěži. Návrh testovací sestavy zobrazuje obr. 47.



Obr. 47 - Měření teplotního profilu

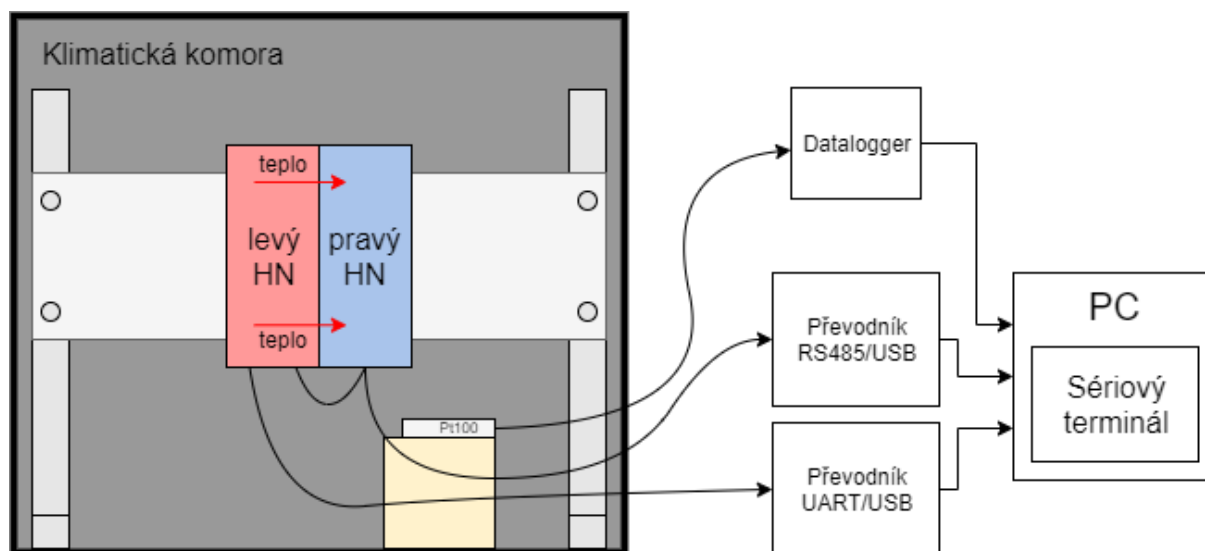
Oba testovací moduly (HN), jsou pro tento test pouze v měřicím režimu, s automatickým odesíláním dat, stejně jako v případě kalibrace teplotních senzorů. Toto měření je možné provádět i pro jednu stranu EUT, pouze s jedním HN. Pokud je měření prováděno s oběma HN, je nutné zajistit, aby HN neposílali naměřené hodnoty současně. To lze zařídit například postupným zapínáním těchto modulů (zapnout nejdřív jeden a pak druhý modul) nebo zakomponováním zpoždění začátku měření do jednoho nich. Toto je nutností z důvodu absence řízení komunikace na sběrnici RS485. Pro ověření funkčnosti konceptu byl komunikační řetězec zjednodušen pouze na HN moduly a sériový terminál v PC. Během testu je třeba provádět i kontrolní měření ambientní teploty. K tomu slouží trubičkový senzor Pt100, umístěný ve vzdálenosti přibližně 5 cm od vdechu ventilace EUT ve svislém směru a

vedle něj ve směru horizontálním. Toto umístění není v souladu s normou [5] pro moduly s ventilačními otvory, ovšem pro tento test je spíše důležité, aby se poloha senzoru pro další testy neměnila.

Výstupem jsou hodnoty odporu sensorové matice oddělené středníkem, které je možné vyčíst v terminálu. Za výsledek jsou považovány pouze hodnoty po ustálení všech teplot. Z předchozích zkušeností lze odvodit, že tento stav nenastane dříve než za 2 až 3 hodiny od spuštění testu.

4.2.3. Kalibrace topných elementů

Na měření teplotního profilu přímo navazuje kalibrace topných elementů. Změřený teplotní profil je použit jako vstupní data pro tento test. Cílem je za pomoci regulace výkonu topných elementů co nejpřesněji tento teplotní profil napodobit. Podmínky v klimatické komoře zůstávají shodné, zejména pak teplota, poloha montážní lišty a umístění ambientního senzoru. Testovací sestava je zobrazena na obr. 48.



Obr. 48 - Kalibrace topných elementů

V komoře se pro tento test nachází jen moduly HN, umístěny co nejtěsněji k sobě. Jeden z modulů (na schématu označený jako modrý) je pro tento test nakonfigurován pouze pro měření teploty. Druhý modul (červený) funguje v režimu regulátoru. Pokud je kalibrován profil pro druhý modul, funkce obou modulů se prohodí. Proces probíhá tak, že spolu oba moduly mezi sebou komunikují. Z červeného modulu je vyslán signál do modrého modulu. Poté probíhá měření teploty v modrém modulu. Změřené hodnoty jsou poslány zpět do červeného zařízení, kde slouží jako vstupní hodnoty do regulátorů typu PI (popsáno v kapitole 4.1.5). Výstupem PI regulátorů jsou číselné hodnoty (0 až 4095) pro PWM řadiče. Tento proces se opakuje v nekonečné smyčce. Regulátory se snaží dosáhnout nulové odchylky v teplotním profilu.

Výsledkem tohoto testu jsou konstanty pro jednotlivé kanály (nebo jejich skupiny) PWM řadičů pro daný (vstupní) teplotní profil. Získané konstanty PWM řadičů slouží k replikování tohoto teplotního profilu. Za výsledek je opět považován ustálený stav celé sestavy, v tomto případě však lze očekávat výrazně pomalejší ustálení. Výstupní hodnoty jsou v tomto testu posílány přes UART červeného modulu. Zde se opět jedná o pracovní řešení z důvodu absence třetího modulu, který by řídil komunikaci.

4.2.4. Ověření replikovaného teplotního profilu

Tento test představuje nejen verifikaci výsledků předchozího testu (viz 4.2.3), ale jde také o ověření funkčnosti tohoto konceptu měření a následné replikace teplotního profilu. Pro tento test je použita totožná sestava jako v předchozím případě (viz obr. 48). Rozdíl spočívá v konfiguraci červeného modulu. Odstaven je PI regulátor a výkon topných elementů je nastaven na pevnou hodnotu zjištěnými kalibračními konstantami. Výsledkem testu jsou odchylky od zdrojového teplotního profilu po ustálení teplot celé soustavy.

5. Zhodnocení výsledků měření

Tato kapitola se věnuje zpracování a zhodnocení výsledků navrženého systému. Důležitým krokem je zhodnocení nedostatků a návrh jejich řešení, to je prospěšné především pro budoucí práci na tomto tématu.

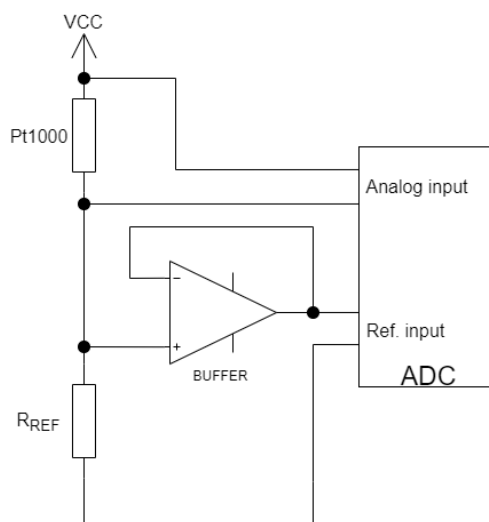
5.1. Kalibrace a měření teploty

Měření teploty patří mezi dvě hlavní funkce HN modulů. Hodnocení výsledků má proto zásadní vliv na hodnocení celého systému.

5.1.1. Chyba při výběru AD převodníku

Během ožívání a prvních pokusu s AD převodníkem AD7193 se vyskytly výrazné problémy s přesností měření odporu referenčního teplotního senzoru. Tato chyba byla tak výrazná, že šla odhalit pouhým úsudkem. Naměřený odpor odpovídal teplotě o desítky procent rozdílné od skutečné teploty v místnosti. Chyba nebyla v nastavení převodníku, což se podařilo ověřit několika pokusy. Bylo zjištěno, že velikost chyby asi nejvíce závisí na velikosti referenčního rezistoru a na poměru odporů senzoru a reference. Postupně se ukázalo, že došlo k nepochopení vnitřní struktury ADC. AD převodník AD7193 obsahuje integrovaný buffer pouze pro analogové vstupy, vstupy pro referenci integrovaný buffer nemají. Při použití referenčního rezistoru (navíc v kombinaci s RC dolní propustí) jako zdroje referenčního napětí dochází k zatížení měřicí smyčky, tedy odporového děliče a tím i k chybám měření. Ačkoliv se tedy zdál AD7193 jako vhodný AD převodník pro tuto aplikaci, jeho použití nakonec ukázalo jako nevhodné.

Pokud je preferováno zachování stejné metody měření, nabízí se dva způsoby řešení. První způsob je doplnění stávající desky o buffer s operačním zesilovačem. Toto řešení je preferované v rámci ladění prototypu pro svou jednoduchost a časovou nenáročnost. Zapojení realizované na současném prototypu znázorňuje obr. 49.



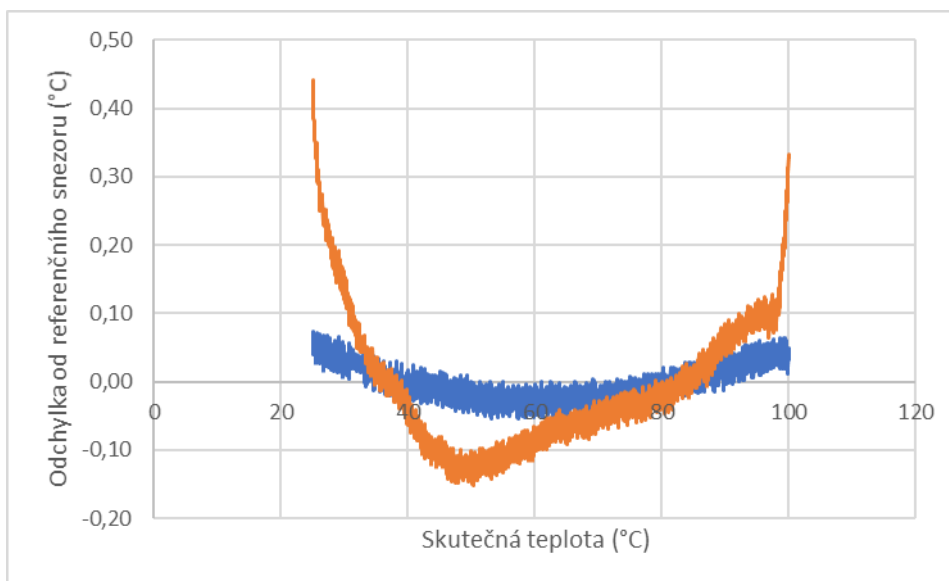
Obr. 49 - Zapojení bufferu před referenční vstup ADC

Zapojení je pouze provizorní. Přináší sice kýžený výsledek v podobě vysoké vstupní impedance, nicméně měření referenčního napětí neprobíhá diferenčně, ale pouze proti zemi.

Druhý způsob je preferovaným řešením pro následující revize řídicí desky. Toto řešení spočívá ve výběru vhodnějšího sigma-delta ADC, který má integrovaný buffer i pro referenční vstupy. Takovým AD převodníkem je například AD7124-4, rovněž od společnosti Analog Devices. Převodník disponuje kromě integrovaného bufferu na analogových i referenčních vstupech také programovatelnými zdroji proudu, které lze využít pro napájení měřicí smyčky. Lze tak dosáhnout ještě lepší úrovně potlačení šumu. Výrobce tento AD převodník přímo doporučuje na tento typ aplikace [29].

5.1.2. Kalibrace teplotních senzorů

Kalibrace teplotních senzorů měla probíhat podle postupu, který byl navržen v kapitole 2.3. Harmonogram klimatické komory Weiss WK3, která jako jediná z dostupných klimatických komor umožňovala tento způsob měření, byl v té době velmi naplněný. Proto bylo třeba přizpůsobit některé testy vymezenému času. Čas kalibrace byl proto zkrácen z 24 na pouhých 10 hodin, aby bylo možné celou kalibraci provést přes noc. Zkrácen byl rovněž inicializační interval konstantní teploty 25 °C, který slouží k ustálení teploty v komoře před začátkem měření. Při vyhodnocování výsledků kalibrace se však ukázalo, že při takto zkrácené délce testu, nebyla rampa nárůstu teploty dostatečně pomalá, aby se stačila teplota rovnoměrně rozložit po celé ploše sensorové matice, to vedlo k tomu, že teplota některých elementů byla značně odlišná od teploty referenčního senzoru. Proložení takto změřených závislostí odporu na teplotě přímku samozřejmě muselo vést k obrovským odchylkám při dopočítání teplot jednotlivých senzorů. Rozdíl v kalibrační odchylce senzoru, který ležel přesně pod referenčním senzorem Pt1000 (modrý průběh) a senzorem na kraji desky (oranžový průběh s větší odchylkou), zobrazuje obr. 50.



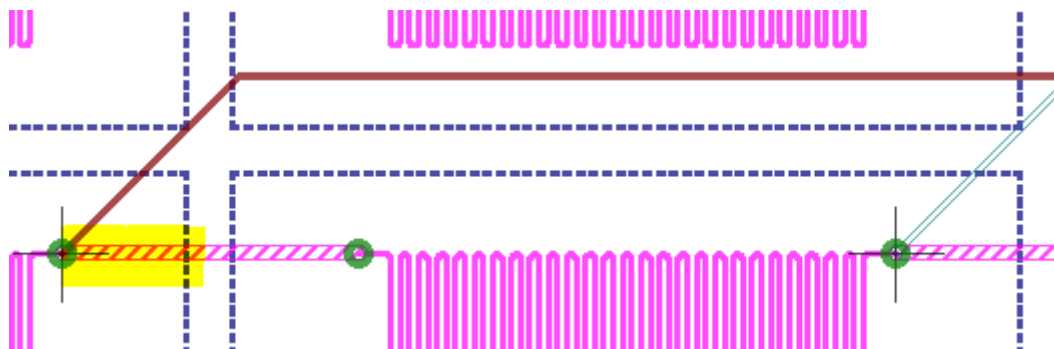
Obr. 50 - Příklad kalibračních odchylek při nesprávně provedené kalibraci.

Z grafu je možné pozorovat výrazně nelineární odchylku od referenční teploty u senzoru, který se nacházel na ohraji desky (oranžový průběh), daleko od referenčního senzoru. Měděný senzor umístěný v plošném spoji nestačí reagovat na změnu teploty v klimatické komoře, průběh teploty na senzoru má exponenciální tvar. U senzoru Pt1000, který je umístěn na povrchu DPS, dojde k ustálení mnohem rychleji. Oproti tomu senzor, který přímo pod referenčním senzorem Pt1000, vykazuje po kalibraci mnohem nižší odchylku, tato hodnota se více blíží skutečnému potenciálu měděných senzorů, který byl zjištěn v kapitole 2.3.

Výsledek této kalibrace zpochybnil vhodnost tohoto postupu. Pro budoucí kalibraci by měl být využitý způsob, který zajistí, aby byla teplota na referenčním senzoru i kalibrovaném senzoru opravdu totožná. Vhodnější by byla například kalibrace v několika bodech, ve kterých by bylo provedeno měření ustálených hodnot.

5.1.3. Nevhodné zvolení měřicího bodu

Pro měření odporu senzorů byla zvolena metoda, při které je kromě odporu senzoru měřena i část měděné cesty, která senzory propojuje. Toto by nebyl problém, pokud by byl měřicí bod volen pouze v prostoru mezi senzory a byl by měřený pouze odpor cesty, která vede přes plochu měřeného senzoru (definováno měděnou plochou ve spodní vrstvě DPS, viz 3.2.5). V rámci kalibrace by byl odpor této části započítaný do celkového odporu senzoru při dané teplotě. V návrhu DPS však došlo k chybě, kdy byl pro měřicí bod byl vybrán vždy prokov umístěný na jednom z konců senzoru (viz obr. 51).



Obr. 51 - Chyba měření způsobená nevhodným zvolením měřicího bodu

To vede k situaci, kdy část odporu cesty, který měříme společně s odporem senzoru, zasahuje do plochy vyhrazené pro sousední sensor (na obr. 51 vyznačeno žlutě). Pokud je teplota sousedního senzoru odlišná, vzniká při měření teploty určitá chyba, kterou bylo nutné vypočítat.

Nejdříve bylo nutné vyčíslit velikost změny v odporu senzoru podle (9). Pro výpočet byla použita situace, kdy je rozdíl v teplotě sousedních senzorů 5 °C (25 a 30 °C). Vskutečnosti lze předpokládat rozdíl sousedních teplot ještě nižší. Délka chybové cesty činí 3,2 mm a její šířka je 0,3 mm. Tloušťka měděné folie je 18 μm.

$$\Delta R = \rho \frac{l}{t \cdot w} \{ [1 + \alpha(t_2 - 20)] - [(1 + \alpha(t_1 - 20))] \}$$

$$\Delta R = 0,018 \cdot 10^{-6} \frac{3,2 \times 10^{-3}}{18 \times 10^{-6} \times 0,3 \times 10^{-3}} \{ [1 + 3,92 \times 10^{-3}(30 - 20)] - [(1 + 3,92 \times 10^{-3}(25 - 20))] \} \quad (9)$$

$$\Delta R = 0,00021 \Omega$$

Pro výpočet je možné použít legendu pro vzorec (1)[12]. Z výpočtu je patrné, že pro rozdíl sousedních 5 °C, lze očekávat chybu v odporu senzoru přibližně +0,00021 Ω. Tento rozdíl bylo ještě nutné přepočítat na ekvivalentní chybu v měření teploty:

$$\Delta t = \frac{\frac{R}{R_0} - 1}{\alpha}$$

$$\Delta t = \frac{\frac{9,00021}{9} - 1}{3,92 \cdot 10^{-3}} \quad (10)$$

$$\Delta t = +0,006 \text{ °C}$$

Výpočtem bylo ověřeno, že reálný vliv této návrhové chyby není příliš velký, ale je třeba s ním počítat. V příští verzi sensorové desky by bylo určitě korektnější přemístit měřicí body do prostoru mezi plochy sensorů, aby mohl být tento negativní jev potlačen kalibrací sensorů.

5.1.4. Odhad chyby měření

Jedním z požadavků na měřicí systém bylo měření teploty s chybou maximálně ± 1 °C. Této přesnosti by mělo být dosaženo hlavně pomocí kalibrace přesným teplotním senzorem Pt1000. Je třeba nejprve vypočítat přesnost měření teploty tímto senzorem. Na absolutní chybu měření teploty mají vliv dva hlavní aspekty. Prvním aspektem je tolerance samotného senzoru. Druhým aspektem je přesnost systému.

Měření teploty odporovým senzorem patří do kategorie nepřímých měření. Kdy je výsledná veličina získána pomocí známe závislosti na dalších veličinách. Výpočet maximální možná chyby výsledku nepřímého měření je dána vztahem (11) [32]. Jedná se sumu parciálních derivací vzorce pro výpočet této veličiny (podle jednotlivých chybových veličin), vynásobených příslušnou odchylkou.

$$\sigma_{T,MAX} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \sigma_i \quad (11)$$

Teplota měřená odporovým senzorem je vypočítána z odporu senzoru. Odpor senzoru je vypočítán změřené AD převodníkem, což je poměr odporu senzoru a hodnoty referenčního rezistoru. Hodnota odporu senzoru je vypočítána ze vzorce (12).

$$R = \frac{Code \cdot R_{REF}}{Fullscale \cdot Gain} \quad (12)$$

Veličinou s pravděpodobně nejvyšším vlivem na přesnost měření [30] je hodnota referenčního rezistoru. U rezistoru je třeba počítat se dvěma hlavními vlivy na jeho skutečnou hodnotu. Prvním a nejčastěji zmiňovaným parametrem rezistoru je jeho výrobní tolerance udaná v procentech. Použitý referenční rezistor je vyrobený s tolerancí 0.1 %. Při hodnotě odporu 12 k Ω to znamená toleranci ± 12 Ω . Druhým parametrem je teplotní drift, tedy závislost hodnoty odporu na teplotě. Použitý rezistor má závislost ± 10 ppm/°C, což odpovídá odchylce ± 9 Ω při 100 °C, celkem tedy odchylka $\sigma_{Ref} = 21$ Ω . Svůj vliv má samozřejmě i použitý AD převodník. Projevit se může například chyba zisku (Gain). AD převodník AD7124-4 (náhrada za AD7193) má udanou chybu zisku po interní kalibraci pouze $\pm 0,016$ %. Pro použitý zisk 8 je to pouze $\pm 0,000128$. Výpočet odchylka měřeného odporu senzoru se vyjádří pomocí (13). Proměnná Code představuje hodnotu na výstupu ADC při teplotě 100 °C (teplota 100 °C je volena z důvodu, že představuje nejvyšší odchylku v intervalu 25 až 100 °C). Fullscale je maximální výstupní hodnota převodníku.

$$\sigma_{R,MAX} = \left| \frac{Code}{Fullscale \cdot Gain} \right| \sigma_{Rref} + \left| \frac{Code \cdot R_{REF}}{Fullscale \cdot Gain^2} \right| \sigma_{Gain}$$

$$\sigma_{R,MAX} = \left| \frac{15491578}{2^{24} \cdot 8} \right| 21 + \left| \frac{15491578 \cdot 12000}{2^{24} \cdot 8^2} \right| 0,000128 \quad (13)$$

$$\sigma_{R,MAX} = 2,424 + 0,022$$

$$\sigma_{R,MAX} = 2,45 \Omega$$

Tento výsledek nám však moc o vlivu na výslednou teplotu neprozradí. Teplota senzoru Pt1000 se vypočítá vztahem (14), který platí pro teploty větší než 0°C. A a B jsou koeficienty kvadratické aproximace závislosti odporu na teplotě. Z tohoto vztahu je možné za použití principu ze vzorce (11)[31] odvodit vztah pro celkovou maximální odchylku měření teploty (15)

$$t = \frac{-R_0 \cdot A + \sqrt{R_0^2 \cdot A^2 - 4 \cdot R_0 \cdot B \cdot (R_0 - R_t)}}{2 \cdot R_0 \cdot B} \quad (14)$$

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3}$$

$$B = -5,775 \cdot 10^{-7}$$

$$\sigma_{Tmeas} = \left| \frac{dt}{dR_t} \right| \sigma_R$$

$$\sigma_{Tmeas} = \frac{\sigma_R}{\sqrt{R_0^2 \cdot a^2 - 4 \cdot R_0 \cdot B \cdot (R_0 - R_t)}} \quad (15)$$

$$\sigma_{Tmeas}$$

$$= \frac{2,25}{\sqrt{1000^2 \cdot (3,9083 \cdot 10^{-3})^2 - 4 \cdot 1000 \cdot (-5,775 \cdot 10^{-7}) \cdot (1000 - 1385,1)}}$$

$$= 0,64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Z výpočtu je vidět, jak moc výsledek závisí na tolerancích referenčního rezistoru. Hodnota $\pm 0,64 \text{ } ^\circ\text{C}$ už je relativně vysoká. S referenčním rezistorem s těmito parametry by se dosáhlo celkové odchylky do $\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ jen velmi těžko, proto bude pravděpodobně potřeba použít preciznější rezistor. Pokud by byl rezistor s tolerancí 0,01 % a teplotním driftem 2 ppm/°C, dostali bychom pro 100 °C odchylku pouhých $\pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$. K této hodnotě je dále nutné přičíst výrobní toleranci senzoru. Pro senzor třídy 1/3 B je maximální odchylka $\pm 0,27 \text{ } ^\circ\text{C}$ při 100 °C. Pro senzor třídy A je při stejné teplotě odchylka $\pm 0,35 \text{ } ^\circ\text{C}$. Se senzorem třídy 1/3 B a přesnější variantou rezistoru (0,01 % a 2 ppm/°C) by tak celková odchylka odpovídala hodnotě $\pm 0,37 \text{ } ^\circ\text{C}$ při 100 °C. Systém však nevyužívá k měření teploty Pt1000, ale měděné odporové senzory a Pt1000 slouží pouze ke kalibraci. Celkový odhad maximální odchylky měření teploty tohoto

systemu je dán součtem odchylky měření teploty referenčním senzorem a kalibrační odchylky (16). Dle výsledků z kapitol 2.3 a 5.1.2 byla reálná kalibrační odchylka odhadnuta na hodnotu maximálně (při korektně provedené kalibraci) $\pm 0,1$ °C.

$$\sigma_{T,MAX} = \sigma_{T,Pt1000} + \sigma_{T,RTD} \quad (16)$$

$$\sigma_{T,MAX} = 0,37 + 0,1 = \pm 0,47 \text{ °C}$$

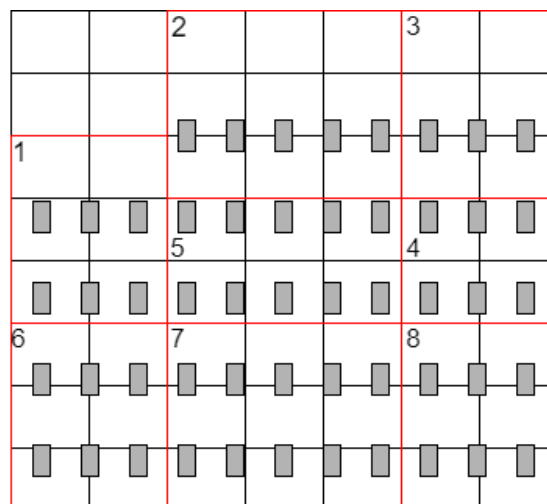
Realisticky lze tedy prohlásit, že nejlepší možná odchylka měření teploty tohoto systému se po úpravě designu s novým ADC, může pohybovat někde kolem $\pm 0,5$ °C. Požadovanou absolutní chybu měření teploty do ± 1 °C bude systém schopný plnit rezervou.

5.2. Replikace teplotního profilu

V této kapitole jsou rozebrány výsledky ověření funkčnosti druhé důležité funkce systému (a celého konceptu), kterou je replikace změřeného teplotního profilu.

5.2.1. Příprava kalibrace topných elementů

Před začátkem kalibrace topných elementů bylo vytvořeno schéma překryvu senzorové i topné matice. Cílem této analýzy bylo utvoření představy o vztazích mezi topnými elementy a body na měřicí matici. Z obr. 52 je patrné, že jeden topný element (šedé obdélníky) neovlivňuje právě jeden bod měřicí matice (bílé obdélníky) a některé body matice se zdají být zcela mimo přímý vliv topných elementů.



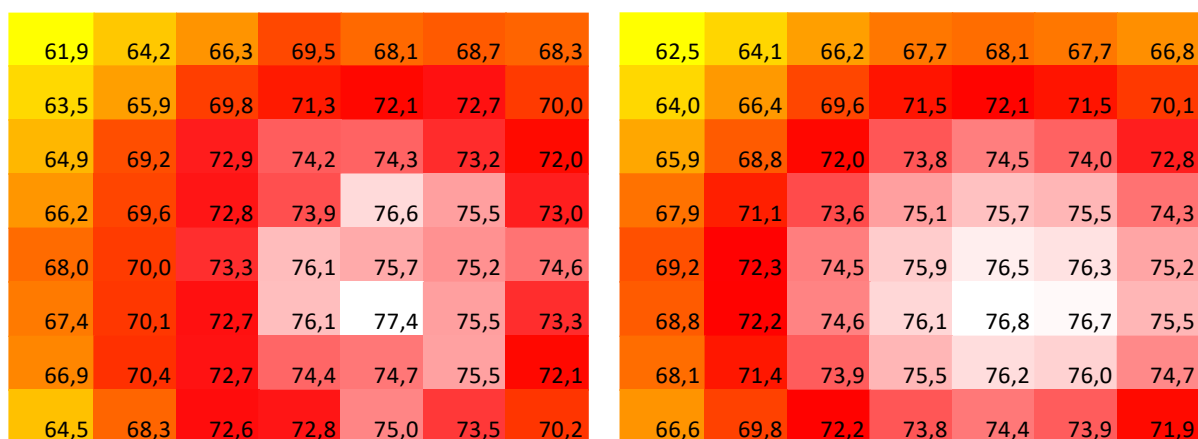
Obr. 52 - Rozvržení regulačních skupin

Pro snazší analýzu chování systému, bylo toto schéma zjednodušeno na celkem 8 skupin, přičemž každá skupina zahrnuje určitý počet topných elementů a určitý počet teplotních senzorů. Na schématu jsou tyto skupiny označeny červenou konturou. Skupiny tak tvoří 8 regulačních smyček PI regulátorů (popsáno v 4.1.5).

5.2.2. Výsledky replikace teplotního profilu

Schopnost replikace byla testována celkem pro dvě zdrojová zařízení ve vertikální i horizontální poloze, vždy pro levý HN (pravý sloužil jako měřicí). Šlo tedy celkem o 4 vzorky teplotního profilu. Test probíhal podle postupů uvedených v kapitolách 4.2.2, 4.2.3 a 4.2.4.

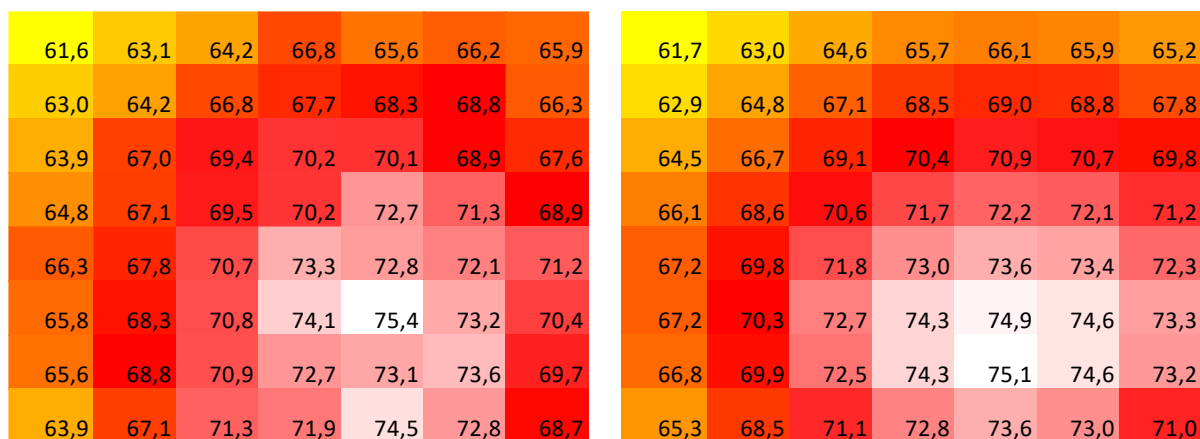
V první fázi testu probíhalo měření obou vzorku s horizontální, tedy standardní polohou lišty. Při této poloze je maximální ambientní teplota zařízení z řady S7-1500 60°C. Vizualizaci tohoto pokusu představují obr. 53 a obr. 54. Výsledky odchylek jsou v tabulkách



Obr. 53 – Vzorek 1, horizontální pozice, 60 °C (zdroj vlevo, výsledek vpravo)

Tab. 7 - Vzorek 1, horizontální pozice, 60 °C

Maximální odchylka (%)	3,6/-2,5
Průměrná odchylka (%)	0,8
Průměr absolutních hodnot (%)	1,3
Kalibrační konstanty PWM	1381, 599, 810, 666, 1958, 1581, 974, 1129

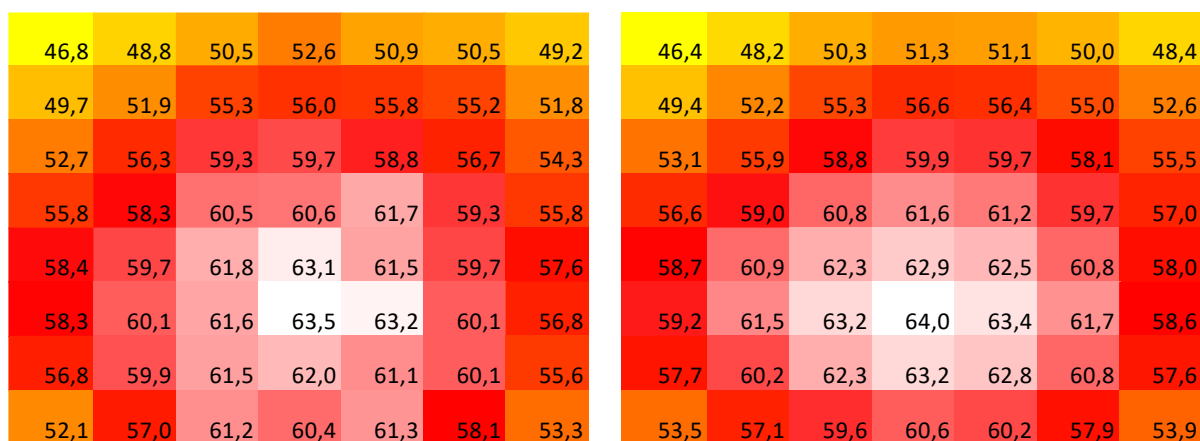


Obr. 54 – Vzorek 2, horizontální pozice, 60 °C (zdroj vlevo, výsledek vpravo)

Tab. 8 - Vzorek 2, horizontální pozice, 60 °C

Maximální odchylka (%)	5,09/-1,61
Průměrná odchylka (%)	1,3
Průměr absolutních hodnot (%)	1,5
Kalibrační konstanty PWM	763, 684, 406, 339, 1260, 1217, 1321, 981

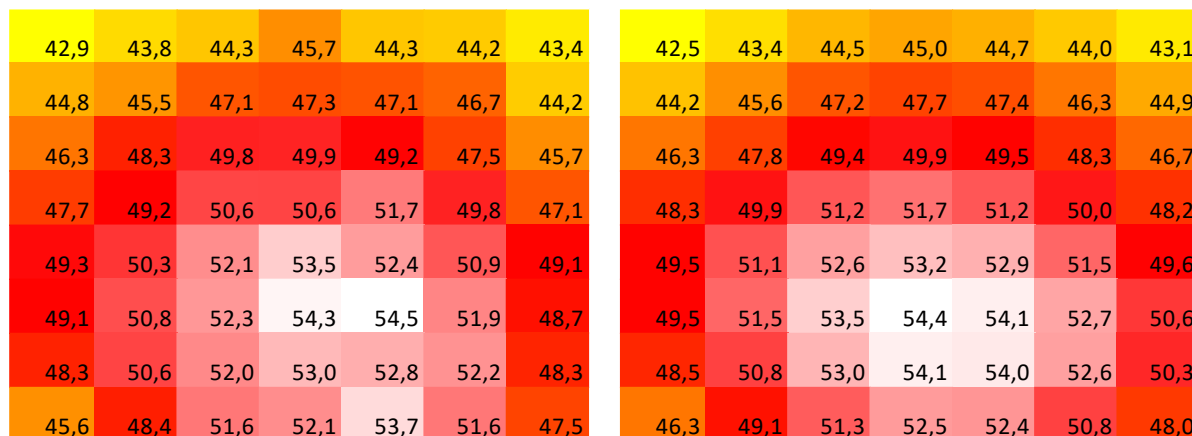
V druhé fázi byla testována vertikální pozice montážní lišty. Moduly S7-1500 jsou vybaveny ventilačními otvory, které slouží k přirozenému proudění vzduchu modulem, což přispívá k jeho chlazení. Ve vertikální poloze, je toto proudění značně omezeno, proto je maximální ambientní teplota při této konfiguraci pouze 40 °C. Vizuelní zobrazení výsledků ukazují obr. 55 a obr. 56. Celkové výsledky jsou potom v tab. 9 a tab. 10.



Obr. 55 - Vzorek 1, vertikální pozice, 40 °C (zdroj vlevo, výsledek vpravo)

Tab. 9 - Vzorek 1, vertikální pozice, 40 °C

Maximální odchylka (%)	3,5/-2,6
Průměrná odchylka (%)	0,7
Průměr absolutních hodnot (%)	1,3
Kalibrační konstanty PWM	1688, 1598, 714, 599, 1226, 1361, 1505, 1410

**Obr. 56 - Vzorek 2, vertikální pozice, 40 °C (zdroj vlevo, výsledek vpravo)****Tab. 10 - Vzorek 2, vertikální pozice, 40 °C**

Maximální odchylka (%)	4,2/-2,5
Průměrná odchylka (%)	0,6
Průměr absolutních hodnot (%)	1,2
Kalibrační konstanty PWM	564, 205, 294, 429, 627, 395, 1217, 939

U teplotních profilů změřených u zařízení umístěných na horizontální liště lze pozorovat, že u výdechu zařízení jsou teploty o několik °C vyšší, než je tomu u vdechu chlazení. Naopak u vertikálně umístěných zařízení je rozložení teplot rovnoměrnější a nejteplejší místo se nachází přibližně uprostřed zařízení. To poukazuje právě na lepší proudění vzduchu u vertikálně umístěného zařízení. Z porovnání výsledků replikace je patrné, že tento jev se uplatňuje i u replikovaného profilu, který vytváří testovaný (levý) HN. Rozložení teplot replikovaného profilu je velmi podobné originálu, nicméně je zřetelné, že replikovaný profil vykazuje mnohem rovnoměrnější rozložení teplot směrem od nejteplejšího bodu v matici. To je pravděpodobně způsobené rovnoměrným rozmístěním elementů a také jejich sdružením do skupin. Pokud by bylo regulačních smyček, lze očekávat i lepší výsledek v detailu.

Číselně se zdají být výsledky velmi příznivé, hlavně s přihlédnutím k faktu, že testování probíhalo pouze s redukováným počtem nezávislých PWM kanálů, kdy bylo celkem 52 kanálů seskupeno do pouhých osmi. Průměrná odchylka replikovaného profilu od zdrojového se u těchto testů pohybovala v rozmezí 0,6 až 1,3 %. Což je možné i vzhledem k vizuálnímu porovnání profilů považovat

za úspěšný výsledek. Průměrná hodnota absolutních hodnot odchylek se pohybuje v intervalu 1,2 až 1,5 %. Tato hodnota by měla lépe vyjádřit průměrný rozptyl hodnot replikovaného profilu od svého vzoru. Maximální odchylku se téměř ve všech případech podařilo udržet pod ± 5 %. Bohužel v případě 2. vzorku (horizontální pozice, 60 °C), došlo u jednoho prvku teplotní matice k překročení této hranice o 0,09 %. Pokud však tento na teplotní profil hodnocen jen jako na celek, jedná se stále o velmi dobrý výsledek. Je velmi pravděpodobné, že navýšením počtu nezávislých kanálů by bylo dosaženo přesnějších výsledků.

Závěr

Hlavním cílem práce bylo navrhnout nový koncept a referenční design systému pro teplotní testy PLC Siemens Simatic. V rámci práce byl analyzován stávající systém teplotních modulů pro PLC S7-1500, který sloužil jako vzor pro návrh referenčního prototypu, aby bylo možné zachovat všechny klíčové vlastnosti. Na základě této analýzy a požadavků na vylepšení byly vytvořeny nové moduly, které vylepšují stávající funkcionality měření teploty a vytápění.

Moduly disponují automatickým měřením teploty teplotní matice na bočních stěnách testovaného zařízení. Měření teploty je prováděno vlastním designem měděných teplotních senzorů, realizovaných přímo v plošném spoji. Chyba měření se po volbě vhodnějšího AD převodníku (5.1.1) s rezervou vejde do odchylky ± 1 °C, a to s vyhodnocením přímo uvnitř modulu (5.1.4). Moduly jsou dále vybaveny funkcí replikace libovolného změřeného nebo vloženého profilu s integrovanou regulací výkonu topných elementů podle teploty na povrchu modulu (4.1.5, 4.2.3 a 5.2).

Celkově se podařilo na vyvinutých modulech ověřit funkčnost celého konceptu, je ho tedy možné použít pro návrh testovacích modulů i pro PLC z jiných řad rodiny Simatic. Pro další práci na tomto projektu by však bylo vhodné zpracovat připomínky a opravy chyb zmíněné v kapitole 5.

Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] *Co se skrývá pod označením PLC?* [online]
Dostupný z WWW: <https://automatizace.hw.cz/co-se-skrывa-pod-oznaceni-m-plc>
- [2] *CO JE PLC NEBOLI PROGRAMOVATELNÝ LOGICKÝ AUTOMAT* [online]
Dostupný z WWW: <https://dreamland-plc.cz/plc-programovateln-y-logicky-automat/>
- [3] Siemens, *Řídící systémy SIMATIC* [online]
Dostupný z WWW:
<https://new.siemens.com/cz/cs/products/automation/systems/industrial/plc.html>
- [4] Siemens, *Industry Mall* [online]
Dostupný z WWW: <https://mall.industry.siemens.com/>
- [5] *Norma IEC 61131-2:2017-08 - Industrial-process measurement and control – Programmable controllers – Part 2: Equipment requirements and tests*
- [6] *Norma IEC 60068-2-2:2007-07 - Environmental testing – Part 2-2: Tests – Test B: Dry heat*
- [7] *RTD Sensors including Pt100 and Pt1000 Elements* [online]
Dostupný z WWW: <https://www.sterlingsensors.co.uk/rtds>
- [8] *Basic principles of RTD technology* [online]
Dostupný z WWW:
<https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/el32xx/1495734667.html&id=>
- [9] *Temperature probes* [online]
Dostupný z WWW: <https://www.omega.co.uk/temperature/z/thermocouple-rtd.html#learn>
- [10] *THERMISTOR VS RTD TEMPERATURE MEASUREMENT ACCURACY* [online]
Dostupný z WWW: https://www.bapihvac.com/application_note/thermistor-vs-rtd-temperature-measurement-accuracy-application-note/
- [11] ScienceDirect, *Thermistors* [online]
Dostupný z WWW: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/thermistors>
- [12] Časopis ELEKTRO, *Teplotní závislost odporu kovových vodičů* [online]
Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36489.pdf>
- [13] *Měření elektrického odporu* [online]
Dostupný z WWW: http://www.vosvdf.cz/cmsb/data/prilohy/141030-EU_penize_do_skol_EL/VY_32_INOVACE_0210_PIETSCHMANN_0315.pdf
- [14] TI, *How delta-sigma ADCs work, Part 1* [online]
Dostupný z WWW:
https://www.ti.com/lit/an/slyt423a/slyt423a.pdf?ts=1595790481259&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

- [15] Analog Devices, *Fundamental Principles Behind the Sigma-Delta ADC Topology: Part 1* [online]
Dostupný z WWW: <https://www.analog.com/en/technical-articles/behind-the-sigma-delta-adc-topology.html>
- [16] Analog Devices, *AD7193* [online]
Dostupný z WWW: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7193.pdf>
- [17] *Pulzně šířková modulace* [online]
Dostupný z WWW: <http://www.dhservis.cz/psm.htm>
- [18] Analog Devices, *ADG731* [online]
Dostupný z WWW: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG725_731.pdf
- [19] Erni, *MicroSpeed connectors* [online]
Dostupný z WWW: <https://www.erni.com/en/products-and-solutions/electronic-connectors/microspeed-connectors/>
- [20] Analog Devices, *Ferrite Bead Demystified* [online]
Dostupný z WWW: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1368.pdf>
- [21] TechWeb, *Differential (Normal) Mode Noise and Common Mode Noise* [online]
Dostupný z WWW: <https://techweb.rohm.com/knowledge/emc/s-emc/01-s-emc/6899>
- [22] TI, *WEBENCH® Power Designer* [online]
Dostupný z WWW: <https://webench.ti.com/>
- [23] Analog devices, *Chopping on sigma-delta ADCs* [online]
Dostupný z WWW: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-609.pdf>
- [24] Analog devices, *AD7193 Evaluation board ADCs* [online]
Dostupný z WWW: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/UG-223.pdf>
- [25] NXP, *PCA9685* [online]
Dostupný z WWW: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9685.pdf>
- [26] STM, *STM32L452RE* [online]
Dostupný z WWW: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l452re.pdf>
- [27] GitHub, *PCA9685_Servo_STM32_HAL* [online]
Dostupný z WWW: https://github.com/lamik/PCA9685_Servo_STM32_HAL
- [28] *Improving the Beginner's PID* [online]
Dostupný z WWW: <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-introduction/>

- [29] Analog devices, *AD7124-4* [online]
Dostupný z WWW: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7124-4.pdf>
- [30] TI, *A Basic Guide to RTD Measurements* [online]
Dostupný z WWW: <https://www.ti.com/lit/an/sbaa275/sbaa275.pdf>
- [31] *Accurate calculation of PT100/PT1000 temperature from resistance* [online]
Dostupný z WWW: <https://techoverflow.net/2016/01/02/accurate-calculation-of-pt100pt1000-temperature-from-resistance/>
- [32] *Základy teorie chyb a zpracování fyzikálních měření* [online]
Dostupný z WWW: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/teoriechyb.pdf>

Všechny zdroje citovány k 14. 8. 2020