

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická
Katedra technologií a měření

Bakalářská práce

Vícekanálové měření teploty pro platformu KETCube

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Jan HANDREJCH
Osobní číslo:	E16B0107P
Studijní program:	B2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	Komerční elektrotechnika
Téma práce:	Vícekanálové měření teploty pro platformu KETCube
Zadávací katedra:	Katedra technologií a měření

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s dokumentací open-hardware projektu KETCube
2. Navrhněte vhodný způsob realizace vícekanálového měření teploty na KETCube
3. Navrhněte rozšiřující desku (DPS) ke KETCube umožňující vícekanálové měření teploty
4. Implementujte softwarový modul KETCube pro zvolené senzory


Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

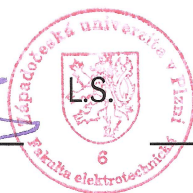
Seznam doporučené literatury:

1. BOSWELL, Dustin; FOUCHER, Trevor: The Art of Readable Code: Simple and Practical Techniques for Writing Better Code. „O’Reilly Media, Inc.“, 2011.
2. ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu. BEN-technická literatura, 2010.
3. Dokumentace projektu KETCube (dostupné online): <https://github.com/SmartCAMPUSZCU/KETCube-docs>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Bělohoubek**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne 18. června 2020

Jan Handrejch

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se ve své úvodní teoretické části krátce zabývá měřenými veličinami (teplota, vlhkost) na což navazuje poměrně rozsáhlý popis využívaných technologií, platformy KETCube a přehled dostupných komponentů pro návrh rozšiřujících desek. V praktické části je popis vytvořených desek plošných spojů s vyznačenými součástkami pro jejich realizaci.

Klíčová slova

KETCube, I2C, RH/T, teplota, teplotní senzor, I2C multiplexor, analogový multiplexor, PTC, digitální převodník pro PTC.

Abstract

The submitted bachelor thesis in its introductory part shortly deals with measured values (temperature, humidity), followed by a relatively extensive description of the used technologies, KETCube platform and an overview of available components for the design and proposal of expansion boards. In the practical part is a description of created PCB with specified electronic components.

Key words

KETCube, I2C, RH/T, temperature, temperature sensor, I2C multiplexor, analog multiplexor, RTD, RTD to digital converter.

Poděkování

Velice rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Janu Bělohoubkovi za všechny poskytnuté konzultace, skvělé vedení práce, velmi přínosné rady a pomoc při jejím vypracování.

Obsah

1	Úvod	10
2	Architektura systému pro vícekanálové měření	12
3	Použité technologie	14
3.1	Platforma KETCube	14
3.1.1	Murata Type ABZ (CMWX1ZZABZ)	14
3.1.2	STM32L082CZ	15
3.1.3	SX1276	15
3.1.4	mikroBUS™	15
3.1.5	A/D převodník	16
3.1.6	D/A převodník	16
3.1.7	I ² C multiplexory	17
3.1.8	Analogové multiplexory	17
3.1.9	Digitální převodník pro PTC	17
3.1.10	Digitální/Integrované RH/T senzory	17
3.1.11	Termistory	18
3.1.12	Měření PTC	18
3.2	Bezdrátové komunikační technologie	20
3.2.1	LoRaWAN	20
3.2.2	Sigfox	21
3.3	Komunikační sběrnice	21
3.3.1	Sériová komunikace	21
3.3.2	Paralelní komunikace	22
3.3.3	I ² C	22
3.3.4	SPI	23
3.3.5	1-Wire™	24
4	Přehled dostupných komponent	26
4.1	I ² C multiplexory	26
4.1.1	PCA/TCA9548A	26
4.1.2	PCA9848	26
4.1.3	MAX7356/MAX7357/MAX7358	27
4.1.4	PI4MSD5V9547	27
4.2	Analogové multiplexory	28
4.2.1	CD74HC4051	28
4.2.2	ADG708BRUZ	28
4.2.3	MAX4638ESE	28
4.2.4	MUX508IPWR	29
4.2.5	MAX4781/MAX4782/MAX4783	29

4.3	Digitální převodník pro PTC	30
4.3.1	MAX31865	30
4.3.2	LTC2986	30
4.4	RH/T senzory	31
4.4.1	HDC1080/2080/1010/2010	31
4.4.2	HTU20/21D	31
4.4.3	HTS221	32
4.4.4	SHT3x	32
4.4.5	Si7013-A20	33
4.5	Termistory	33
4.5.1	Pt1K	33
4.5.2	Pt100, Pt500, Pt1000	34
5	Praktické řešení	35
5.1	Výběr komponent	35
5.1.1	I ² C multiplexor	35
5.1.2	RH/T senzor	36
5.1.3	Digitální převodník pro PTC	37
5.1.4	Analogový multiplexor	37
5.2	Návrh rozšiřující desky	38
5.2.1	DPS pro I ² C MUX a RH/T čidla	38
5.2.2	DPS pro RH/T čidla	39
5.3	Softwarová obsluha	40
6	Závěr	42
	Literatura	43
	Přílohy	51

1 Úvod

Tato bakalářská práce se zaměřuje na využití vývojové platformy KETCube, pro více kanálové měření teploty a relativní vlhkosti. Jelikož se jedná o důležité parametry prostředí, které je možné využít, ať už k zvýšení lidského komfortu v určitém prostředí, ve kterém se člověk či věc nachází anebo k přímému monitorování lidské tělesné teploty a vlhkosti např. ze zdravotních důvodů.

Cílem této bakalářské práce je návrh a realizace rozšiřujících desek pro platformu KETCube, díky kterým dojde k rozšíření vlastností a měřících možností této platformy, kdy po dohodě s vedoucím práce bude toto řešení realizováno pomocí integrovaných RH/T senzorů a PTC.

V první části se práce snaží čtenáři přiblížit základní architekturu celého řešení, na což navazuje partie s podrobnějším popisem hardwarového vybavení platformy, popis vlastností a možností, jimiž disponuje a které budou potřebné pro správné fungování celé soustavy.

Další část je věnována rešerším a výběru vhodných komponentů pro vícekanálové měření. Kdy jsou u vybraných komponentů porovnány parametry a vypíchnuty určité vlastnosti jednotlivých prvků.

Následující partií je samostatná realizace z vybraných elektronických součástek.

Teplota

Teplota je charakteristika tepelného stavu hmoty. V obecném významu je to vlastnost předmětů a okolí, které je člověk schopen vnímat a přiřadit jí pocity studeného či teplého. Fyzikálně teplota je míra tepelné energie (tepla Q) vyjádřená měřitelnou jednotkou uváděnou buďto v Kelvinově stupnici (Termodynamická teplota) nebo ve stupnicích odvozených ($^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{F}$) [1]. V našem případě se může jednat i o měření tělesné teploty, kdy tato teplota je přirozenou pro určitý organismus, která zajišťuje a charakterizuje správné fungování organismu. Díky těmto vlastnostem můžeme monitorovat zdravotní stav jedince a tak případně regulovat či upozornit na zdravotní potíže [2, 3].

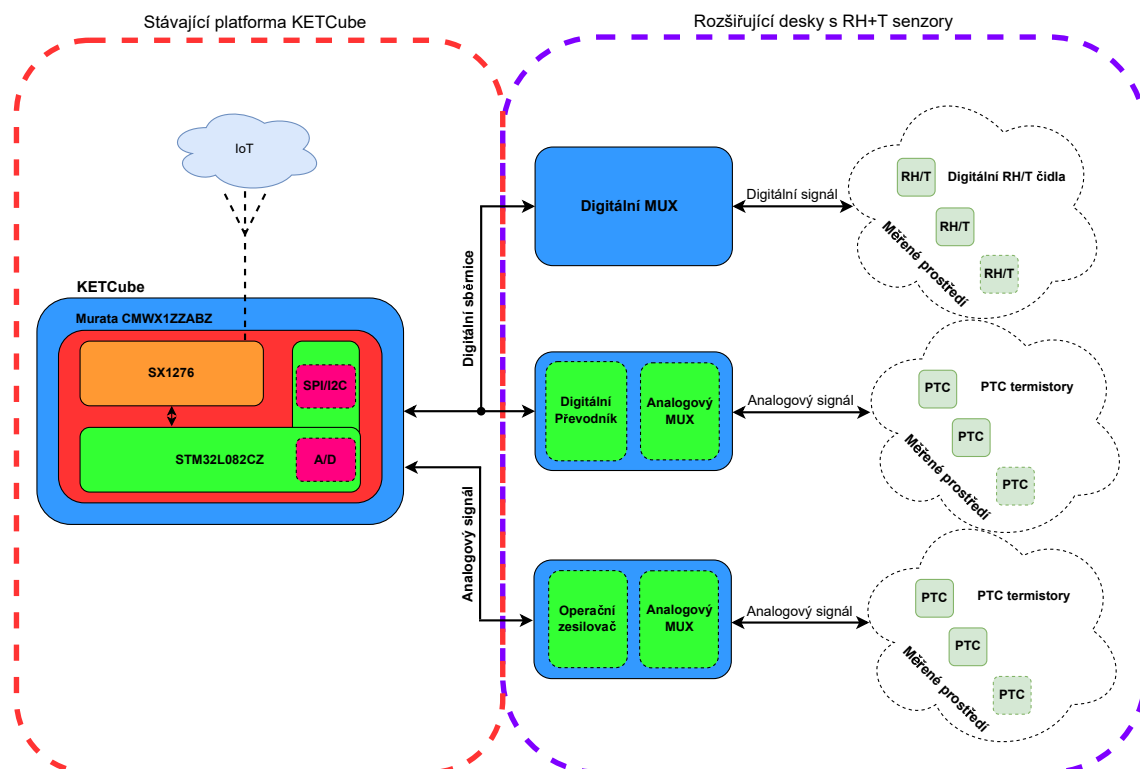
Vlhkost

Vlhkost je základní vlastnost vzduchu udávající množství vodní páry, jež je obsaženo v daném množství vzduchu. V našem případě se bude měřit relativní vlhkost, o které můžeme říci, že jde o základní vlastnost vzduchu udávající poměr mezi okamžitým množstvím vodních par ve vzduchu a množstvím vodních par, které by měl vzduch o stejném tlaku a teplotě při plném nasycení obsahovat. Většinou se udává v procentech (%) [2, 4, 5]. Vlhkost může způsobovat celou řadu problémů, ať už při nízké vlhkosti vzduchu, kdy může vznikat statická elektřina, což může vést k problémům při výrobě nebo také ke zdravotním komplikacím, díky zvýšenému víření prachu a nečistot, nebo naopak, při vysoké vlhkosti vzduchu vzniká šance, že dojde k poškození vybavení míst-

nosti nebo různých přístrojů, kdy může docházet k degradaci určitých materiálů, které podléhají korozi, nahnívají či plesniví. Proto i z hlediska těchto problémů, je dobré vlhkost měřit a sledovat, aby se předešlo případným zdravotním problémům a také materiálními škodám [2, 6].

2 Architektura systému pro vícekanálové měření

Pro naši práci je potřeba si nastínit několik potřebných prvků, které budou nepostradatelné pro realizaci tohoto řešení. Kde bude využito stávající platformy KETCube (levá část Obr. 2.1) a k němu budou vytvořené rozšiřující desky pro multiplexory a senzory (pravá část Obr. 2.1). Pro digitální řešení více RH/T digitálních čidel se jeví vhodné využití digitálního multiplexoru s možností připojit až 8 digitálních čidel. U měření teploty pomocí PTC jsou možnosti dvě. První nabízející se možnost, je použití klasického měření pomocí A/D převodníku popsaného dále v práci, kdy by se jeho vstup rozšířil analogovým multiplexorem a poté se měřený signál z PTC zesílil pomocí operačního zesilovače. Druhá možnost je využít digitálních převodníků pro PTC, které nám umožňují přímo měřit PTC termistor, několika metodami a převést tyto hodnoty do digitální podoby a poté využít jednu z podporovaných digitálních sběrnic pro komunikaci a přenos naměřených dat již v digitální podobě.



Obr. 2.1: Blokové schéma vícekanálového měření RH+T

Nejprve je potřeba si osvojit a popsat platformu KETCube, která bude využita jako základní deska celé této soustavy. Pro správné pochopení a využití je v následujících kapitolách popsán hlavní modul, který se na KETCube platformě nachází, jakými parametry, standardy a vlastnostmi disponuje, a jakou bezdrátovou konektivitu podporuje v oblasti IoT sítí.

U analogového řešení je možné využívat buď analogových pinů hlavního MCU, případě měření pomocí A/D převodníku. Jeho potřeba je při výběru realizace touto možností analogového řešení snímání teploty pomocí PTC termistorů. Analogového multiplexoru je zde potřeba spíše jako přepínače jednotlivých analogových portů z důvodu úspory pinů MCU a operačního zesilovače pro zesílení signálu. Jako jedna z možností u této varianty je ta, umístit operační zesilovač přímo k PTC, ze kterého by vlastně vzniklo samostatné čidlo a zesílený analogový signál by následně byl přiveden k analogovému MUX. Tato možnost se jeví spíše vhodná pro 1-kanálové měření na PTC termistoru s mnoha úskalími při návrhu a měření. Druhá nabízející se možnost je využití digitálního převodníku pro PTC, který je k tomuto účelu již určen a je zde brán zřetel na různá úskalí při tomto druhu měření. Zde by pravděpodobně byl opět využit i analogový multiplexor pro rozšíření měřících vstupů digitálního převodníku z důvodu požadavku na vícekanálové měření. Bylo by ale opět možné umístit tento převodník přímo do měřeného prostředí k PTC a vytvořit opět separátní čidlo, které by poté už digitálně zpracovaný signál posílalo do KETCube.

U digitálního řešení je prvotním problémem, nad kterým je potřeba se zamyslet, neselektivnost adresy I^2C zařízení, konkrétněji digitálních RH/T čidel, kdy jsme v některých případech nuceni používat pouze jedno I^2C čidlo na sběrnici. Tento problém je možné vyřešit přidáním vhodného elektronického prvku, multiplexoru, mezi MCU a čidlo, který nám pomůže tento problém vyřešit. V podstatě nám rozšíří danou sběrnici a nedojde tak ke kolizi adres. Další věcí pro správnou funkci tohoto řešení, kdy je zapotřebí komunikovat mezi digitálními senzory RH/T přes MUX do MCU, se nelze obejít bez využití jedné z mnoha popsanych sběrnic, která bude využívána pro komunikaci mezi základní a rozšiřující deskou.

Bude proto nutné provést průzkum a výběr klíčových prvků, s porovnáním základních parametrů pro 8-kanálové digitální I^2C MUX, analogové MUX a digitální I^2C RH/T senzory. Díky rešerším těchto prvků a zhodnocení jejich vlastností bude usnadněno rozhodování a vybrání jednoho z kandidátů MUX pro analogové a digitální řešení včetně vhodného digitálního RH/T čidla, které budou využity pro realizaci řešení.

3 Použité technologie

Jedná se o podrobnější technologický popis jednotlivých elektronických prvků, které budou využity při praktické realizaci řešení. Od základní platformy KETCube, přes její parametry a bezdrátové komunikační vlastnosti až po využívané sběrnice.

3.1 Platforma KETCube

KETCube je prototypovací a vývojová platforma, a jak už sám název napovídá, je vyvíjena na katedře technologií a měření (KET) Západočeské univerzity v Plzni. Jedná se o modulární platformu, kdy se KETCube skládá z řídicí desky obsahující hlavní modul od společnosti Murata Manufacturing Co., Ltd. a dalších rozšiřujících desek, které je možné připojit tzv. „stackováním“¹ na sebe a tím docílit kompaktnosti, požadovaných měřících a komunikačních vlastností celé soustavy. Deska KETCube má jak svoje vlastní vývody pro připojení vnějších periférií, tak i podporu mikroBUS™ standardu [7].

Jedná se o jednotný a ucelený kus hardwaru. Díky malým rozměrům (32 × 32 mm), nízké energetické náročnosti a poměrně velké škále analogových a digitálních I/O portů s podporou nejpoužívanějších sběrnic (I²C, SPI, UART) pro komunikaci s perifériemi samotných elektronických prvků. Platforma je vhodná jak pro naši aplikaci vícekanálového měření, tak pro další aplikace vyvíjené na fakultě.

Hlavním prvek a srdcem celého KETCube je Murata ABZ (CMWX1ZZABZ) od již zmíněné společnosti Murata Manufacturing Co., Ltd., jež je postavena na procesoru STM32L082CZ od společnosti STMicroelectronics, založeného na architektuře ARM² s jádrem Cortex-M0+ [9].

O bezdrátovou konektivitu se stará zabudovaný modul SX1276, který podporuje bezdrátové technologie používané v IoT³ sítích a tedy LoRa™ a Sigfox [10].

3.1.1 Murata Type ABZ (CMWX1ZZABZ)

Jedná se o kompaktní, nízkonákladový modul s podporou bezdrátových standardů. Výrobci se povedlo skloubit procesor STM32L082CZ s bezdrátovým modulem společnosti Semtech SX1276 pod jedno pouzdro s rozměry (12,5 × 11,6 × 1,76 mm). Zapouzdření je tvořeno vodivým materiálem (plechem), který chrání jeho vnitřní součásti jak proti vnějšímu rušení okolními vlivy, tak je tím snižováno i nežádoucí vyzařování vlastního modulu.

Modul disponuje 18 GPIO⁴ piny a další komunikaci s modulem je možné provádět přes

¹Z anglického slova stack, tedy skládání na sebe.

²ARM je v informatice označení architektury procesorů [8].

³Internet of Things, česky internet věcí.

⁴Je označení pro přístupný elektrický kontakt integrovaného obvodu, kdy jeho využití je poměrně široké v závislosti na elektrických parametrech a je ponecháno na libovůli programátora [11].

různé druhy sběrnic (UART, SPI, I^2C). Na piny je možné připojit široké spektrum senzorů a dalších různých periferních prvků. Napájecí napětí modulu se pohybuje v mezích od 2,2 do 3,6 V. Modul Murata CMWX1ZZABZ má certifikaci pro bezdrátové frekvence 868 a 915 MHz [10].

3.1.2 STM32L082CZ

V modulu Murata je použit mikrokontrolér od společnosti STMicroelectronics. Jedná se o jednoho z největších, evropských výrobců křemíkových čipů. Použitý mikrokontrolér je 32bitový procesor, postavený na architektuře ARM Cortex-M0+. Jádro procesoru pracuje na vnitřní frekvenci 32 MHz a dále procesor disponuje 192 kB flash paměti, 6 kB EEPROM a 20 kB RAM. Procesor má 40 GPIO a dále obsahuje několik hardwarových prvků, jako jsou: jeden 12bitový A/D převodník, dva D/A převodníky, dva komparátory, podporu hardwarového AES⁵ šifrování, 16bitové čítače/časovače, jeden vnitřní RTC⁶. Dále podporuje několik sběrnic. $3 \times I^2C$, $2 \times SPI$, $4 \times UART$ a $1 \times USB$. Další výhodou procesoru je 19 vstupů umožňujících použití kapacitních senzorů pro dotykové ovládání. Napájení je v rozsahu 1,65 V až 3,6 V.

Díky svým rozměrům, nízké energetické náročnosti, široké škále funkcí GPIO a hardwarové výbavě, má procesor široké spektrum využití [12].

3.1.3 SX1276

Jde o jednokanálový bezdrátový modul, z rodiny SX12xx, vyvinutý společností Semtech, který umožňuje obousměrnou half-duplex⁷ bezdrátovou komunikaci s širokou škálou podporovaných modulací: FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRaTM a OOK, velký rozsah vysílacích frekvencí od 137 MHz do 1020 MHz, kdy v našem případě, je vhodné využití frekvencí 433 MHz nebo 868 MHz. Tyto frekvence spadají do ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) pásma a jsou určeny pro IoT aplikace. Rychlost přenosu, která může dosahovat až 300 kbps, nastavitelná šířka pásma 7,8 kHz – 500 kHz, vysoká citlivost, až -148 dBm, nastavitelný vysílací výkon a další parametry, které umožnil výrobce uživateli nakonfigurovat v registrech pro pokročilejší práci a potřeby s modulem [14]. Další výhodou modulu je nízký odběr při bezdrátové komunikaci v řádech jednotek mA. V neposlední řadě je samostatný modul osazen teplotním senzorem a snímačem napájecího napětí, což už jen doplňuje tak pokročilý modul [15].

3.1.4 mikroBUSTM

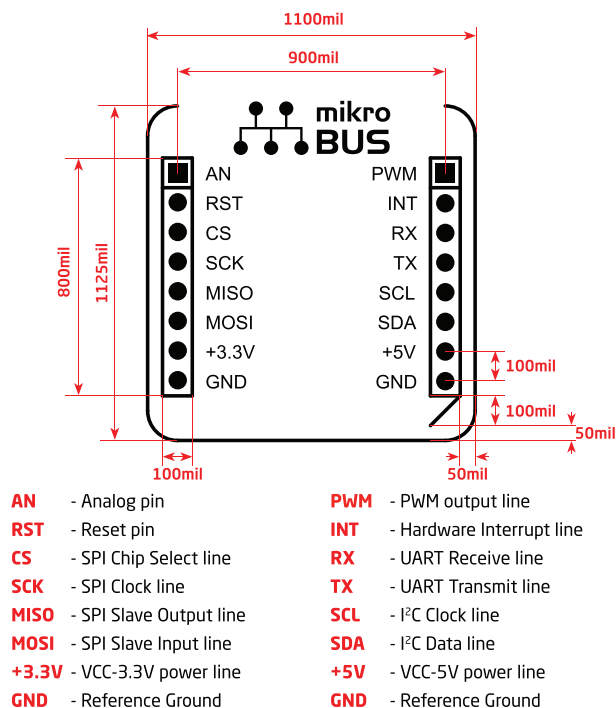
Jedná se o „open standard“ od srbské společnosti MikroElektronika. Ve své podstatě jde o fyzické rozmístění vývodů (2×8 pinů) na desce plošných spojů s danými rozměry, vyobrazeno na Obr. 3.1. Je zde dáno, kde se mají nacházet napájecí piny, UART porty, SPI a I^2C sběrnice, analogové a digitální porty [16, 17]. Při dodržení tohoto standardu je zaručena správná konektivita s velkým množstvím senzorů, rozšiřujících desek, jako

⁵Advanced Encryption Standard

⁶Real Time Clock, český hodiny reálného času, které udržují údaj o aktuálním čase.

⁷Je režim střídavé obousměrné komunikace [13].

jsou motorové drivery, bezdrátové moduly, enkodéry a mnoho dalších elektronických prvků. Jedni z největších výrobců elektroniky podporující a využívající tento standard jsou společnosti NXP Semiconductors N.V. a Microchip Technology Inc. [16].



Obr. 3.1: Rozměry a rozložení vývodů mikroBUSTM (převzato z [17])

3.1.5 A/D převodník

Analogově digitální převodník [18] je elektronická součástka nebo vnitřní součást procesoru, která nám zajišťuje převod spojitého analogového signálu na vstupu do digitálního, tedy diskrétního signálu na výstupu. Tento digitální signál je pak zpracovatelný ve výpočetních systémech. Jako každá součástka má i tento charakteristické vlastnosti. Může se jednat o rychlost převodu, přesnost, citlivost vstupů, chybovost a další parametry, které volíme podle potřeby dané aplikace nebo převodník, který nám poskytuje daný procesor. Převodníků je několik druhů: Komparační, Kompenzační, Integrovní, s dvojitou integrací a Sigma-delta převodníky [19].

3.1.6 D/A převodník

Digitálně analogový převodník [20] se opět může používat jako separátní elektronická součástka, či může být integrována uvnitř procesoru. Ve své podstatě se jedná o inverzní funkci k A/D převodníku. Slouží tedy k převodu hodnoty v binární soustavě do analogové podoby, kdy se může jednat o datové slovo (číslo), které je pomocí tohoto převodníku převedeno na proudovou nebo napěťovou úroveň. Jeden z příkladů uplatnění může být v audio zařízeních, kdy je zvukový soubor převáděn zpět na analogový signál. Využití je též v mobilních telefonech, či jiných zařízeních, kde je potřeba tohoto převodu [19].

3.1.7 I²C multiplexory

Jde o elektronickou součástku fungující na principu přepínače, kdy pomocí řídicích signálů vybíráme požadovaný vstup, který má být připojen na výstupní porty multiplexoru. Díky I²C multiplexorům můžeme rozšířit a zvýšit počet stejných I²C zařízení připojitelných k platformě KETCube, které nedisponují selektivní adresou a zabránit tak vzniku kolizí na sběrnici.

3.1.8 Analogové multiplexory

Jak už název napovídá, jedná se o obdobné elektronické součástky jako jsou I²C multiplexory s tím rozdílem, že tyto pracují s analogovými signály. Většina těchto MUX/přepínačů neslouží jen jako multiplexory, tedy rozšíření jednoho kanálu na větší počet, ale fungují těž na opačný způsob jako demultiplexory. V této aplikaci budou sloužit k rozšíření analogových pinů KETCube, čímž poslouží k možnosti připojit až 8 termistorů, resp. prvků, poskytující analogovou formu signálu.

3.1.9 Digitální převodník pro PTC

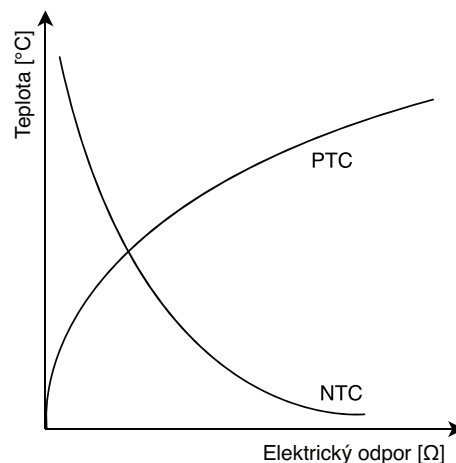
Jedná se o integrované obvody, které nám dovolují měřit teplotu pomocí různých druhů termistorů (Pt1K, PT100, PT1000, atd.). Mají analogový vstup s přesným proudovým zdrojem podporující 2-, 3-, 4-vodičové připojení termistorů. Každé zapojení má svoje výhody, vlastnosti a je popsáno dále v práci. Naměřené hodnoty jsou následně pomocí, většinou Sigma-delta A/D převodníků, převedeny do digitální podoby. Digitální *frontend* zajišťuje měření, převod, detekci chyb, konfiguraci a vnější komunikaci. Některé převodníky dovolují i detekci chyby měření či odpojení, přerušení termistoru a při 3, 4 vodičích je možné i eliminovat odpor přívodních vodičů. Komunikace u těchto obvodů je řešena spíše přes sběrnici SPI. Jedná se o řešení měření, kdy jeden integrovaný obvod obsahuje vše potřebné, pro přesné měření PTC termistorů.

3.1.10 Digitální/Integrované RH/T senzory

Jedná se o typy senzorů umožňující měřit relativní vlhkost a teplotu prostředí. Díky dnešním technologiím je možné umístit tyto senzory do miniaturních pouzder (v jednotkách milimetrů), což dovoluje jednodušší integraci do zařízení. Pouzdra obsahují jak samotný měřicí prvek, který obsahuje buďto určitý typ termistoru (PTC, NTC), či jiný polovodičový prvek snímající tyto veličiny, resp. jejich kombinaci, tak digitální *frontend*, který se stará o řízení měření, převod hodnot a dále o konfiguraci, kalibraci a v neposlední řadě také o vnější komunikaci přes sběrnici. Většina těchto senzorů je dostupná na našem trhu v nepřeberném množství od renomovaných výrobců, kdy se liší: typem snímacího prvku, přesností snímaných veličin, velikostí pouzdra, typem použité sběrnice pro komunikaci, napájecím napětím a dalšími vlastnostmi. U těchto senzorů, je při jejich vývoji přihlíženo zejména na energetickou nenáročnost a miniaturizaci, při zachování již zmíněných měřících vlastností a parametrů.

3.1.11 Termistory

Jedná se o polovodičovou součástku, jejíž elektrický odpor je závislý na teplotě. Rozděluje se na dvě základní skupiny: NTC a PTC. Rozdíl charakteristik je vidět na Obr.3.2, kdy první z nich, tedy NTC (*Negative Thermal Coefficient* - negativní teplotní koeficient), který je charakterizován tak, že při zvyšující se teplotě elektrický odpor termistoru klesá. S opačnou charakteristikou je PTC (*Positive Thermal Coefficient* - pozitivní teplotní koeficient), jehož elektrický odpor s teplotou roste. Přesné PTC, jejichž meandr je většinou z platiny nebo niklu a substrát je keramický nebo skleněný, jsou určeny pro přesné měření teploty a to díky jejich závislostní křivce, která je velmi lineární [21].



Obr. 3.2: Teplotní závislost PTC a NTC (překresleno z [22])

3.1.12 Měření PTC

PTC jsou termistory, většinou používané pro přesné měření teploty, s přesností řádově v desetinách °C a ve velkém teplotním rozsahu, obvykle od -200 °C do +800 °C, ale záleží na daném typu termistoru.

Závislost mezi odporem platinového PTC a teplotou je popsán Callendar-Van Dusen rovnicí, která slouží k vyjádření a výpočtu teploty. Rovnice 3.1 platí měření $T < 0^\circ\text{C}$ a rovnice 3.2 pro teploty $T > 0^\circ\text{C}$ [23, 24].

$$R_{PTC}(T) = R_0 \cdot \left\{ 1 + (A \cdot T) + (B \cdot T^2) + [(C \cdot T^3) \cdot (T - 100)] \right\} \quad (3.1)$$

$$R_{PTC}(T) = R_0 \cdot [1 + (A \cdot T) + (B \cdot T^2)] \quad (3.2)$$

T : Teplota ve °C

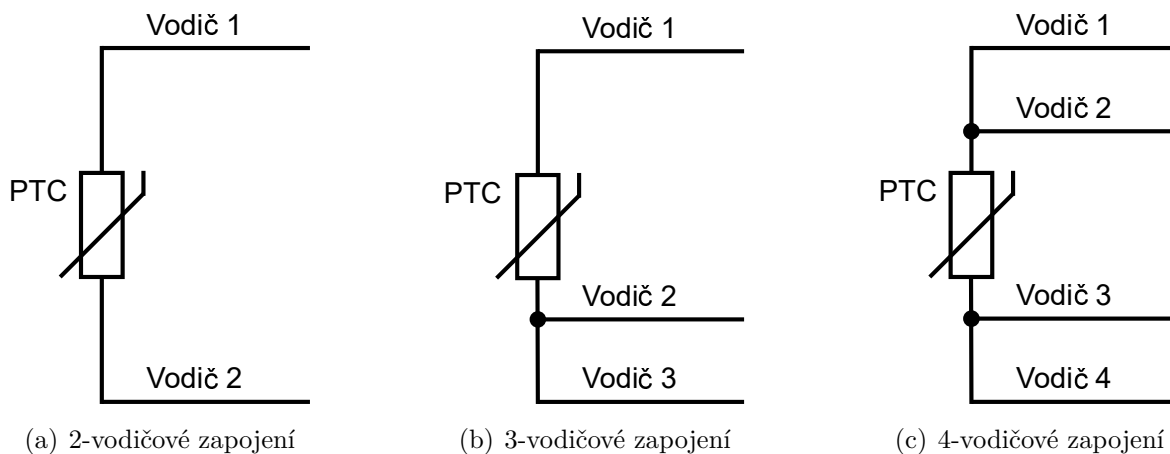
R_{PTC} : Odpor PTC při teplotě T

R_0 : Odpor při teplotě 0 °C

Příklady koeficientů A , B , C (převzaty z [25]):

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}; B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ [}^\circ\text{C}^{-2}\text{]}; C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ [}^\circ\text{C}^{-4}\text{]}$$

Pro měření PTC termistoru se používá několik druhů zapojení, které je znázorněno na Obr. 3.3. Kdy každé má svoje výhody i nevýhody.



Obr. 3.3: Zapojení PTC pro měření (překresleno z [24])

2-vodičové

Při této konfiguraci je PTC připojeno dvěma vodiči, které jsou znázorněny na Obr. 3.3(a). Jednou z nevýhod tohoto připojení je nemožnost kompenzace odporu vodičů, kdy se tento odpor přičítá k samotnému odporu termistoru a tím dochází k výchylce od skutečné hodnoty. V tomto případě ale záleží na délce a kvalitě přívodních vodičů. Z těchto třech zapojení se jedná o „nejméně“ přesné měření. Jedinou výhodou, kterou toto zapojení má, je jeho jednoduchost a ekonomická stránka z důvodu dvou vodičů [24, 26].

3-vodičové

Tato konfigurace měření je zobrazena na Obr. 3.3(b), kdy se jedná o kompromis mezi dvěma a čtyřmi vodiči, kdy jeden vodič je připojen na jednu stranu PTC a dva na druhou. Díky tomuto zapojení je možné efektivně eliminovat odpor přívodních vodičů a redukovat tak měřicí chybu na termistoru. Počítá se zde ale s tím, že vodiče mají stejný odpor [24, 26].

4-vodičové

Toto zapojení je znázorněno na Obr. 3.3(c). Jedná se o zapojení, které je „nejpřesnější“ ze všech zmíněných, ale zároveň ekonomicky nejnáročnější. Je designováno pro největší přesnost měření termistoru s úplnou eliminací odporů přívodních vodičů a ostatních nežádoucích vlivů na přesnost měření, podle [26] může být odpor přívodních vodičů, které je možné tímhle zapojením eliminovat, až 15Ω [24].

3.2 Bezdrátové komunikační technologie

Jak už název napovídá, jedná se o technologie „bez drátů“, při kterém využíváme jako nosný prvek elektromagnetické záření ve vzduchu. Tato vlastnost nám umožňuje přenášet různorodá data na vzdálenosti od jednotek metrů až po tisíce kilometrů. Může se jednat např. o zvukový signál pro rádia pracující na frekvenční modulaci v desítkách MHz, obrazový signál pro pozemní televizní vysílání, mobilní sítě, bezdrátový Internet anebo v dnešní době různá data z IoT zařízení.

Jako jedny z nejpoužívanějších v oblasti IoT jsou technologie LoRaTM [27] od francouzské společnosti Semtech a Sigfox [28], díky jimž jsme schopni za vcelku nízké náklady, se slušným a rychlým přenosem dat, tvořit energeticky nenáročná zařízení s dosahem několika kilometrů.

3.2.1 LoRaWAN

Jde o rozvíjející se standard, v oblasti IoT sítí, díky kterému je možné řešit bezdrátový přenos dat na střední vzdálenosti. LoRaWAN využívá bezlicenční pásma ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) s frekvencemi: pro Evropu 433 MHz, 868 MHz, a pro Severní Ameriku 915 MHz [27]. Hlavním cílem je co nejnižší spotřeba elektrické energie s co největším počtem přenositelných dat, ale v rámci možností této technologie, na vzdálenost jednotek km. Umožňuje nám pracovat se signály na prahu šumu. S maximálním povoleným vysílacím výkonem 25 mW. LoRaTM je patentovaná technologie modulace. Tuto modulaci původně vyvinula francouzská společnost Cycleo, kterou poté odkoupila firma Semtech, která v dnešní době stojí za touto technologií [29].

Díky tomu vzniká síť LoRaWAN. Jedná se o síť pracující na této technologii, jež je veřejně dostupná a definuje protokol přístupové vrstvy pro řízení komunikace mezi bránami LPWAN a koncovými zařízeními. Pokud bude tedy uživatel chtít tuto komunikaci využívat či provozovat, je nutná koupě modulů od společnosti Semtech, podporující technologii LoRa, kdy do pořizovacích nákladů je zahrnut patent této technologie. Síť poté může provozovat jen na svoje náklady jako ostrovní systém nebo využívat různých provozovatelů LoRaWAN bran. Zařízení v síti jsou většinou asynchronní, ale třída B umožňuje i synchronizaci. Vysílat data je možné, jakmile jsou k dispozici nebo uplyne stanovený interval. Počet vyslaných zpráv není nijak omezen, ale je zde omezení časovým intervalem vysílání na 36 sekund z každé hodiny. Data vyslána koncovými zařízeními mohou být přijímána jednou nebo více bránami, které je poté předávají do centrálního serveru k dalšímu zpracování, za předpokladu, že se nejedná o jednoduchou uživatelskou aplikaci, kdy uživatel může využívat pouze technologii pro přenos. Oproti Sigfoxu nemá síť LoRaWAN ambice stát se globálním operátorem pro IoT, ale jde pouze o zpřístupnění technologie jiným firmám či jedincům, se kterou si vybudují vlastní IoT síť. Ovšem je možné využít i síť budovanou CRA⁸, kde se pohybuje pokrytí kolem 90 % území České Republiky [30, 31].

⁸České Radiokomunikace a.s

3.2.2 Sigfox

Jedná se o francouzskou společnost, která se zabývá vývojem bezdrátového přenosu dat z pohledu IoT operátora. Jeden z největších rozdílů, který uživatel pocítí oproti LoRaWAN, je zpoplatněné připojení do sítě, která je globální, ale její nespornou výhodou je vyšší pokrytí signálem po ČR, přibližně asi 94 % území. Využívá ovšem stejná bezlicenční pásma ISM jako předchozí technologie, tedy 868 MHz pro Evropu a 906 MHz pro Severní Ameriku s omezeným vysílacím výkonem na 25 mW. Je nutné se opět řídit nařízením ČTÚ [32] pro danou frekvenci.

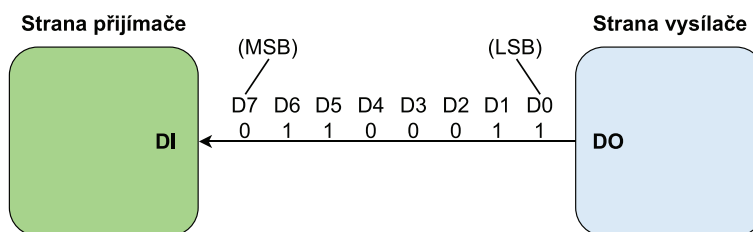
Sigfox je síť obecně prezentována jako globální operátor pro IoT, kdy data ze zařízení, komunikující na této technologii, procházejí přes servery této společnosti. Protokol je konstruovaný pro méně zpráv za den, kdy je tento počet omezený pro *uplink* na 140 zpráv a pro *downlink* na 4 zprávy za den [33]. Tím pádem je i méně náročnější na energii. Komunikace tedy vypadá tak, že koncové zařízení vyšle data k nejbližší přijímací stanici, která jsou ve spolupráci s mobilními operátory. Tato skutečnost ovšem platí pouze v ČR. Obecně se může jednat o separátní síť. Odtud jsou data pomocí zabezpečeného spojení přeposlána do Sigfox cloudu. Uživatel poté dostane přístup k těmto serverům, kde si může data ze zařízení dále zpracovávat a pro jejich vizualizaci využít dostupné nástroje a rozhraní [28, 34, 35].

3.3 Komunikační sběrnice

Tímto pojmem se obecně označuje soubor vodičů libovolného počtu, které slouží k přenosu dat a řídicích instrukcí mezi různými částmi elektroniky nebo zprostředkovávají komunikaci uvnitř procesoru. Tyto vodiče můžeme rozdělit do tří skupin: adresové, datové a vodiče pro řídicí signály. Po adresových vodičích probíhá adresace zařízení, tedy v podstatě, které zařízení má poslat či přijmout data. Datové, jak sám název naznačuje, zajišťují přenos dat. Přenos dat na sběrnici se řídí stanoveným protokolem určeného a podporovaného zařízení. Komunikaci na sběrnici můžeme rozdělit na sériovou a paralelní [36].

3.3.1 Sériová komunikace

Tato komunikace přenáší data sériově, tedy postupným přenosem „datových rámců“ za sebou. Jedná se o nejběžnější komunikační formu s digitálním slovem. Sériová komunikace se snaží pro přenos dat využívat pouze jeden řádek, z čehož vyplývají nízké nároky na komunikační linku a potřebný datový prostor. Bity jdou za sebou, jak je vyobrazeno na Obr. 3.4 [37, 38].

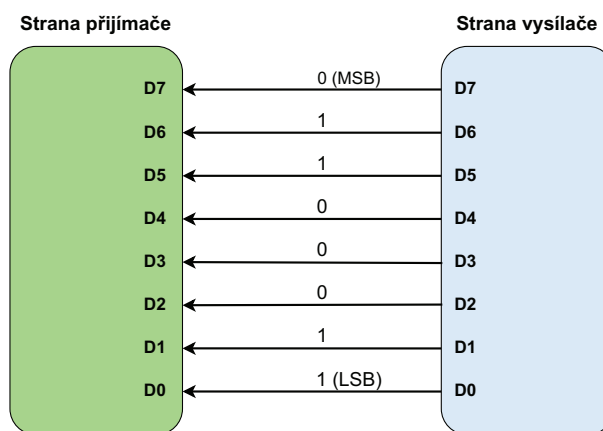


Obr. 3.4: Sériová komunikace (MSB první) (překresleno z [37])

MSB, *Most Significant Bit*, nejvýznamnější bit a LSB z angličtiny *Least Significant Bit*, tedy nejméně významný bit [37].

3.3.2 Paralelní komunikace

U tohoto typu komunikace se přenos bitů provádí současně paralelně, kdy není brán ohled ani tak na potřebný datový prostor jako na rychlost přenosu dat po lince. Přenos bitů je zobrazen na Obr. 3.5, kdy jsou bity přenášeny současně. Díky této komunikaci, je možné dosáhnout vysoké rychlosti přenosu, je ale nutné mít synchronizované linky [37, 38].



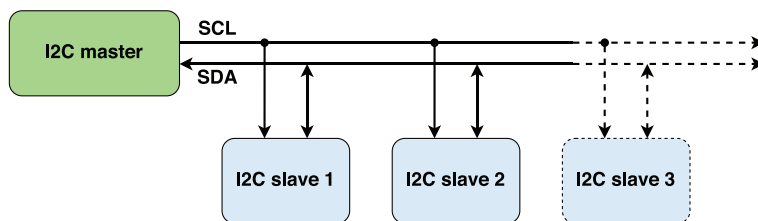
Obr. 3.5: Paralelní komunikace (překresleno z [37])

3.3.3 I²C

Jedná se o dvou vodičovou, nízkorychlostní, synchronní sériovou sběrnici, vyvinutou společností Philips, pracující standardně v rozmezí od 100 do 400 kHz. Používání těchto frekvencí je udáváno jako postačující, nikoliv nutné. Pokud to zařízení dovolují může sběrnice pracovat jak na nižších, tak na vyšších frekvencích. Hlavním řídicím prvkem na sběrnici je procesor, označovaný jako *master* a ostatní zařízení jako čidla a další periférie jsou tudíž v pozici *slave*. Sběrnice I²C používá pro komunikaci dva vodiče: SCL, který slouží k přenosu hodinového signálu, a SDA, jenž má funkci datového vodiče, po kterém si zařízení *master* a *slave* obousměrně vyměňují svá data. Komunikace s

vodiči je přibližena na Obr. 3.6. Každé zařízení na sběrnici má vlastní, většinou 7bitovou unikátní adresu. V některých případech se může jednat o speciální kódovanou 10bitovou adresu. Pro řízení komunikace je zde využívána metoda detekce kolize [39].

V literatuře je možné se také setkat s názvem TWI. Jedná se o stejný typ sběrnice dříve využívaný společností Atmel, dnes už spadající pod Microchip, a dalšími výrobci z důvodu autorských práv.

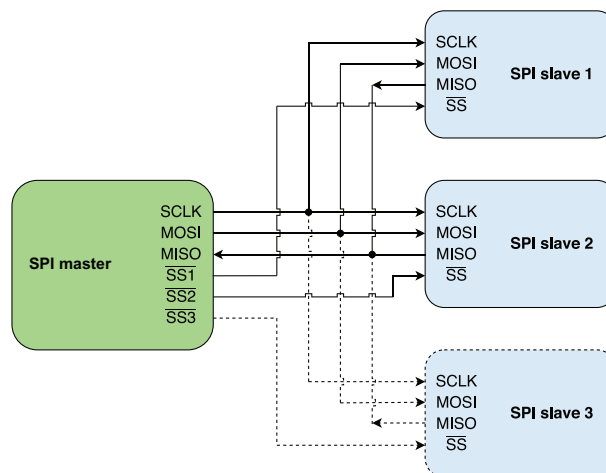


Obr. 3.6: Sběrnice I²C (překresleno z [39])

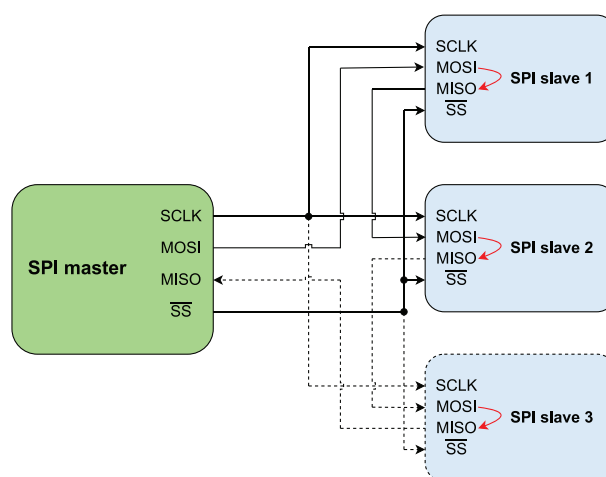
3.3.4 SPI

Jde o sériovou synchronní sběrnici používanou ke komunikaci mezi různými druhy zařízení. Může se jednat o různé druhy senzorů, textové a grafické LCD panely a mnoho dalších zařízení podporující tento typ sběrnice.

Jedno zařízení na sběrnici vystupuje jako řadič sběrnice, jinak také označované jako *master* a ostatní zařízení na sběrnici jsou v pozicích *slave*. Zařízení, které pracuje ve sběrnici jako *master* je většinou mikroprocesor, který je zde zároveň zdrojem hodinového signálu. Ten je dále rozveden pomocí sběrnice do všech ostatních připojených zařízení, čímž umožňuje zcela synchronní, obousměrný přenos dat. Komunikace se zařízeními a konfigurace signálových vodičů je zřetelná z Obr. 3.7. Hodinový signál je rozváděn pomocí vodiče označovaného ve sběrnici jako SCLK či SCK. Hodinový signál se obvykle pohybuje ve frekvenčním rozsahu od 1 MHz až do 10 MHz. Další vodiče, které jsou potřeba pro správnou funkci komunikace se označují MISO (*Master In, Slave Out*) a MOSI (*Master Out, Slave In*), které zajišťují obousměrný (full-duplex) přenos dat. Posledním signálem, který tato sběrnice využívá je označován jako SS nebo SSEL (*Slave Select*) a jak je z názvu poznat, jde o signál, který slouží k výběru *slave* zařízení na sběrnici. Všechny signální vodiče vyžadují, nebo spíše jim postačují, pro správnou funkci pouze jednosměrné porty. Příkladem této komunikace je zapojení SPI v konfiguraci *Daisy-Chain*, zobrazené na Obr. 3.8, kdy si zařízení data předávají. Tato metoda je náročnější na softwarovou obsluhu, ale šetří piny pro CS. Díky těmto vlastnostem jde o poměrně levnou a jednoduchou sběrnici vhodnou pro implementaci do různých zařízeních [40, 41].



Obr. 3.7: Sběrnice SPI v zapojení s Chip select (překresleno z [40])



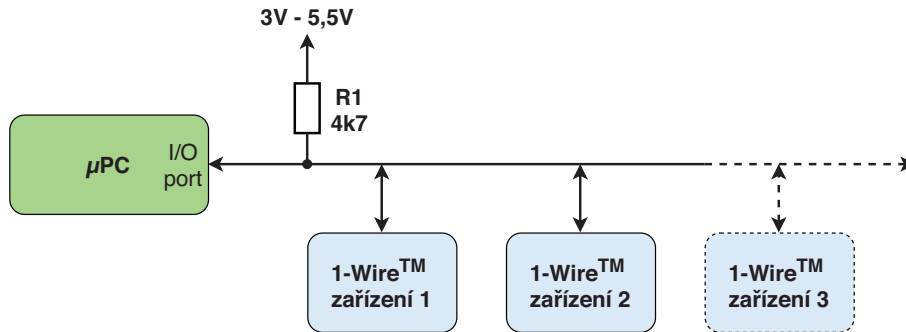
Obr. 3.8: Sběrnice SPI v zapojení Daisy-Chain (překresleno z [40])

3.3.5 1-Wire™

Digitální technologie přenosu dat navržená společností Dallas Semiconductor Corp, dnes už spadající pod společnost Maxim Integrated™. Základem této technologie je sériová *half-duplex* obousměrná komunikace, pracující pouze se dvěma vodiči.

Slave zařízení na této sběrnici mají unikátní, neměnitelné, výrobně naprogramované 64bitové identifikační číslo, které zároveň slouží pro identifikaci zařízení na sběrnici. Většina zařízení a senzorů, pracujících na této sběrnici, nedisponuje ani napájecími piny, jelikož je zde využito tzv. parazitního napájení. To je pomocí datového vodiče, který je využíván jak pro přenos dat, tak pro napájení a druhý vodičem, je vodič zemnicí, neboli GND. Při připojení zařízení na sběrnici dojde k signalizaci jeho přítomnosti. Pokud se zařízení odpojí od sběrnice a dojde ke ztrátě napětí, zařízení se přepne do předdefinovaného resetovacího stavu. Oproti jiným sériovým sběrnicím je 1-Wire™ navržena pro použití v prostředích s okamžitým kontaktem, např. iButton [42], kdy není potřeba navazovat složitější komunikaci s potřebou více vodičů, přenášející hodinový signál a data separátně.

Součástíka, využívající také tento druh komunikace, je známý teplotní senzor s programovatelnou přesností snímání, DS18B20 [43]. Při použití sběrnice, je zde i zaručena vysoká ESD⁹ odolnost. Jedná se o jedno z nejjednodušších řešení sběrnice z pohledu hardwaru a ekonomické náročnosti [44, 45].



Obr. 3.9: Sběrnice 1-Wire™ (překresleno z [45])

⁹ElectroStatic Discharge neboli elektrostatický výboj

4 Přehled dostupných komponent

Tato kapitola se zabývá vlastním výběrem potřebného hardwaru k realizaci řešení. Od podrobného popsání a porovnání jednotlivých elektronických součástek, konkrétněji tedy I^2C MUX, analogové MUX, digitálních převodníků pro PTC, RH/T senzory a PTC termistory.

4.1 I^2C multiplexory

4.1.1 PCA/TCA9548A

PCA/TCA9548A je 8-kanálový obousměrný přepínač MUX pro I^2C sběrnici s funkcí resetu. Výrobci uvedeného přepínače jsou dva, a sice společnost NXP Semiconductors pro PCA a Texas Instruments pro TCA.

Pomocí adresacích, vstupních pinů A0, A1, A2 je možné vhodnou kombinací 1 a 0 na těchto pinech nadefinovat uživatelsky použitelnou I^2C *slave* adresu tohoto zařízení. Pro připojení koncových/periferních I^2C zařízení je zde 8 I/O portů, které je možno ovládat pomocí registru, kdy po konfiguraci kontrolního registru a aktivaci námi potřebných portů jsou data z připojených zařízení na těchto portech, směrována ke komunikačním portům I^2C sběrnice mezi MUX a MCU. MUX obsahuje pin RESET, což umožňuje vyresetování MUX a kontrolního registru, při chybě některého z portů nebo při špatné konfiguraci. Všechny piny jsou přizpůsobeny na napájecí napětí MUX, tedy až do napětí 6 V. Ovšem je zde i možnost, aby na každé části sběrnice, resp. vstupních pinech (SD0, SC0, ..., SD7, SC7) bylo použito jiné napětí, tedy: 1,8 V; 2,5 V; 3,3 V, které je poté bez jakékoliv potřeby ochrany či převodu napěťových úrovní možné zpracovat [46, 47]. Jelikož v naší aplikaci se bude pracovat především s napěťovou úrovní 3,3 V k R/HT čidlům, je potřeba kvůli *open-drain* funkci spínacích MOS tranzistorů přidat *pull-up* rezistory na toto pracovní napětí. Přepínač se vyrábí ve třech pouzdrech pro SMT montáž na DPS: SO24, TSSOP24 a HVQFN24 [46].

4.1.2 PCA9848

Je 8-kanálový obousměrný I^2C MUX, opět od společnosti NXP Semiconductors, který disponuje podobnými parametry a vlastnostmi jako předchozí typ. Změna je v konfiguračních pinech, které jsou pouze dva (A0, A1), ale díky rozšířené vnitřní konstrukci je zde větší selektivita z 16 I^2C *slave* adres. Dále došlo k rozšíření úrovní napětí vstupních datových pinů pro I^2C zařízení, kdy je zde opět možnost různých napěťových úrovní na jednotlivých portech, ale spodní hranice použitelné úrovně se posunula až na hodnotu 0,8 V oproti předchozímu typu, který byl schopný pracovat pouze s nejnižší hodnotou 1,8 V. Došlo zde i ke zvýšení frekvence I^2C sběrnice až 1 MHz, oproti klasickým 400 kHz, jenž je výrobcem označena jako Fm+. Vyrábí se ve dvou pouzdrech pro SMT montáž: TSSOP24 a HVQFN24 [48].

4.1.3 MAX7356/MAX7357/MAX7358

Trojice 8-kanálových multiplexorů od společnosti Maxim Integrated™, jenž mají obdobné parametry jako jejich konkurenční výše zmíněné MUX. Umožňují nám připojit až 8 I^2C zařízení. MAX7357/7358 navíc disponují pinem RST/INT, kdy je zde opět funkce vyresetování MUX, ale i upozornění na případný neodpovídající pin. To je zajištěno vnitřním časovačem, který sleduje datový provoz na lince a pokud je linka v úrovni logické nuly více jak 25 ms upozorní na to uživatele a port zamkne. Jako u předchozích typů je zde možnost mít na každé lince různé napěťové úrovně. Adresace je prováděna stejně, a to přes tři adresачní piny. Podpora sběrnice I^2C je zde řešena pro obvyklé frekvence do 400 kHz. Všechny tyto tři MUX jsou dostupné ve dvou pouzdrech: TSSOP24 a TGFN24 pro SMT montáž [49].

4.1.4 PI4MSD5V9547

Jde o obdobu výše zmíněných 8-kanálových multiplexoru od společnosti Pericom Semiconductor Corporation. Kdy MUX disponuje opět 8 I/O porty pro I^2C sběrnici. Výběr I^2C slave adresy je prováděn přes 3 adresачní porty A0, A1, A2. MUX disponuje také pinem pro reset, kdy při nízké logické úrovni napětí na tomto pinu dojde k celkovému vyresetování portů MUX. Díky vnitřní konfiguraci, je zde možnost používat různé napěťové úrovně na jednotlivých portech, které se pohybují v rozmezí od 1,2 V do 5 V. Obvyklá podpora frekvence pro I^2C do 400 kHz. Výrobce ho na trh dodává ve dvou pouzdrech pro SMT montáž, TSSOP24 a TQFN24 [50].

4.2 Analogové multiplexory

4.2.1 CD74HC4051

Jedná se o celou řadu 8-kanálových, analogových multiplexorů/demultiplexorů od společnosti Texas Instruments. Jsou to digitálně řízené analogové MUX, které jsou založeny na CMOS¹ technologii, díky níž dosahují převodních rychlostí jako s technologií LSTTL², ale s nižší energetickou náročností a úbytky. Výrobce ale zaručuje jak podporu TTL³ tak CMOS logiky. Jde o obousměrné MUX, to znamená, že piny (A0-A7) mohou být použity zároveň jako výstupní i vstupní. Elektrický odpor dosahuje v zapnutém stavu hodnot okolo 40-70 Ω a nízkých ztrát na přechodech ve vypnutém stavu. Dovolují jak napájení nesymetrické, přes piny V_{CC} a GND nebo symetrické napájení, kdy záporné napájení jde přes pin V_{EE} . Vstupní analogové napětí, signál, může být na vstupech různý. Napájecí napětí od 2 do 5,5 V a spínací od 0-10 V. V případě symetrického napájení ± 5 V. Výběr kanálu se realizuje pomocí třech pinů, S0, S1, S2, kdy kombinací logických úrovní na těchto pinech, vybíráme daný kanál. MUX také disponují pinem E tedy „enable“, který nám umožňuje vypnout piny. Vyrábí se v několika provedeních pro SMT montáž od nejmenších pouzder typu TSSOP až po montáž typu THT s pouzdry PDIP/CDIP [51].

4.2.2 ADG708BRUZ

Jde o 8-kanálový multiplexer od společnosti Analog Devices, jež je založený na CMOS technologii. Tento typ je obousměrný, takže může fungovat i jako demultiplexor. Díky této vlastnosti je možné využít 8 pinů, které jsou reprezentovány piny S1 až S8, do kterých vstupuje/vystupuje signál a je směřován na jeden výstupně/vstupní pin označený D. Pomocí pinů A0, A1, A2 vybíráme daný kanál pro vstup, kombinací logických napětí na těchto pinech. Typický odpor vstupů v zapnutém stavu je 3 Ω . Úrovně napájení jsou od 1,8 V do 5,5 V při nesymetrickém napájení pro piny V_{DD} a GND. Jedná se o úrovně vhodné pro napájení z baterie, při kterých je multiplexer schopen fungovat. V případě symetrického napájení je hodnota $\pm 2,5$ V, pro zápornou hodnotu napětí je nutné využít ještě pin V_{SS} . MUX disponuje pinem EN, kterým lze vstupy multiplexoru deaktivovat. Díky použité výrobní technologii výrobcem je zde zaručena nízká energetická náročnost MUX, vysoká spínací rychlost mezi vstupy s velmi nízkou rezistivitou a latencí, pohybující se v řádech jednotek ns. Je zde i kompatibilita s TTL logikou. Vyrábí se v pouzdech TSSOP-16 pro SMT montáž [52].

4.2.3 MAX4638ESE

Analogový multiplexer/demultiplexer, založený na technologii CMOS od společnosti Maxim IntegratedTM. Piny multiplexoru, podporující jak TTL tak CMOS logiku, označeny N01-N08. Tyto I/O piny jsou směřovány na jeden výstupně vstupní pin, označený

¹Complementary Metal–Oxide–Semiconductor

²Low-Power Schottky Transistor-Transistor Logic

³Tranzistorově-Tranzistorová Logika

jako COM. Výběr kanálu je řízen přes kombinaci logických úrovní napětí na pinech A0, A1, A2. Napájecí napětí je možné opět řešit nesymetricky od 1,8 V do 5 V nebo symetricky $\pm 2,5$ V. Nízký spínací odpor je, při napájecím napětí +5 V nebo $\pm 2,5$ V je do $3,5 \Omega$, se spínacími časy v řádech jednotek ns. Díky výrobní technologii, je zde zaručen malý přeslech mezi kanály a tím i ovlivnění jednotlivých signálů na pinech. Nachází se zde opět pin EN, pro deaktivaci MUX. MAX4638 je dostupný v pouzdrech pro SMT montáž: TQFN-16, TSSOP-16 a TQFN-20 [53].

4.2.4 MUX508IPWR

Analogový 8-kanálový multiplexor od společnosti Texas Instruments je vhodný pro vyšší napětí až do 36 V. 8 I/O pinů označených S1-S8 je směřováno na společný pin označený D. Je zde opět použito stejného výběru kanálů pomocí třech adresačních, ovládacích pinů, označených jako A0, A1, A2. Podporuje symetrické napájení ve dvou úrovních. Při použití nesymetrického napájení je rozsah 10-36 V a v případě symetrického napájení je úroveň napětí ± 5 V nebo ± 18 V. Pokud to aplikace vyžaduje, či je potřeba, MUX podporuje i symetrické napájení, s různou úrovní na kladné a záporné větvi, pro příklad $V_{DD} = 12$ V a $V_{SS} = -5$ V. Nízký odpor při sepnutém stavu do 125Ω s převodními časy v řádech desítek ns. Je zde i zaručena nízká parazitní kapacita kanálů do 9,4 pF. Díky vnitřní konstrukci je možné MUX využívat jak pro TTL tak CMOS logiku. Dostupný v pouzdrech TSSOP-16 a SOIC-16 [54].

4.2.5 MAX4781/MAX4782/MAX4783

Jedná se o analogové CMOS multiplexory/přepínače od výrobce Maxim IntegratedTM. MAX4781 je 8-kanálový multiplexor, MAX4782 dvojitý 4-kanálový multiplexor a MAX4783 SPDT přepínač. Rozložení PINů je kompatibilní s řadou 74HC405x a MAX461x. Napájecí napětí se pohybuje od 1,6 V do 3,6 V, kdy spínací odpor přechodu, při 3 V je $0,7 \Omega$. Podporují jak CMOS tak TTL logiku. Výběr kanálu je prováděn obdobně jako u předchozích typů multiplexorů a to přes tři adresační piny, označené A, B, C. Obvody disponují i pinem ENABLE, který je určen pro vypnutí a zapnutí vstupů multiplexoru. Díky nízkým pracovním napětím a odporem vstupů, je dosaženo spínacích časů v jednotkách ns. Jsou vyráběny v pouzdrech TSSOP-16 a QFN-16 [55].

4.3 Digitální převodník pro PTC

4.3.1 MAX31865

Jde o převodník od výrobce Maxim Integrated™ určený pro platinové PTC termistory s nominální hodnotou od 100 Ω (Pt100) až do 1 k Ω (Pt1000, Pt1K), při teplotě 0 °C. Pracovní napájecí napětí je od 3 V do 3,6 V s odběrem při měření okolo 2 mA. Převodník podporuje 2-, 3-, 4-vodičovou topologií připojení termistoru. A/D převodník typu Σ - Δ disponuje 15bitovým rozlišením, což dává teoretickou přesnost 0,03125 °C, ale záleží na linearitě daného PTC. Obecně se přesnost, se všemi ovlivňujícími faktory, pohybuje okolo 0,5 °C. Měření probíhá proti referenčnímu, přesnému rezistoru (R_{REF}) s 1% nebo vyšší přesností, kterým je určena i senzitivita, pro 100 Ω je doporučená hodnota 400 Ω , pro 1 k Ω tedy 4 k Ω , při hodnotě termistoru v 0 °C. Měřicí vstupy převodníku jsou opatřeny ochranou proti přepětí až do ± 45 V. Při zapojení 3, 4 vodičů, je možná detekce přerušeno, vyzkratovaného nebo jinak poškozeného PTC. Při těchto konfiguracích převodník umožňuje i eliminace odporu přívodních vodičů až do 50 Ω , aby nedocházelo ke zkreslení naměřené hodnoty. Jako mezi periferní komunikace je použita SPI sběrnice. Převodník je dostupný ve dvou pouzdrech pro SMT montáž: TQFN-20 a SSOP-20 [56].

4.3.2 LTC2986

Jedná se o velmi pokročilý převodník od společnosti Linear Technology, který podporuje jak měření pomocí PTC termistorů, ve 2-, 3-, 4-vodičovém zapojení, tak měření celé škály termočlánků či měřících teplotních diod. Napájecí napětí se pohybuje v rozmezí od 2,85 V do 5,25 V. Analogové piny, určené pro měření, lze programově nastavit na diferenční nebo radiometrické měření. Převodník umožňuje připojit klasické termistory (Pt100, Pt1000, Pt1K, atd.), ale je možné si nadefinovat i vlastní specifický PTC, se kterým bude prováděno měření. Tento převodník disponuje 10 kanály pro snímání, kdy je možné 2-vodičově připojit až 8 PTC pro měření teploty. V případě potřeby vyššího počtu měřících elementů, je výrobcem doporučen obdobný typ převodníku: LTC2983/LTC2984, který obsahuje 20 měřících vstupů.

Je zde umožněno eliminovat odpor přívodních vodičů k PTC, ale jen v případě 3, 4 vodičů, připojených k PTC. V obvodu jsou obsaženy A/D převodníky s 24bitovým rozlišením, typu Σ - Δ . Díky tomu je možné dosahovat přesnosti 0,1 °C s rozlišením 0,001 °C. Je zde nutné připojit (R_{SENSE}), který určuje měřicí proud senzory. Opět je nutné volit přesné rezistory, jelikož od něj se poté odvíjí i přesnost a senzitivita měření. Jeho hodnota záleží na dané kombinaci měřících prvků připojených k převodníku. Dále se zde nachází přesná napěťová reference s teplotní závislostí 15 ppm/°C. Přepětová ochrana, kdy může dojít zejména u termočlánků k možnému výskytu vyššího napětí na senzoru, není v tomto integrovaném obvodu nijak řešena. Výrobcem je tedy doporučeno přidat omezující odpory pro ochranu vstupů, kdy protékající proud nesmí při přepětí přesáhnout ± 15 mA. Pro vnější komunikaci podporuje převodník SPI sběrnici.

LTC2986-1, je stejný převodník, ale obsahuje navíc oproti standardnímu modelu EEPROM. Je dodáván v pouzdru LQFP-48 pro SMT montáž [57].

4.4 RH/T senzory

4.4.1 HDC1080/2080/1010/2010

HDC1080

Jedná se o kombinovaný digitální senzor od společnosti Texas Instruments pro snímání teploty a relativní vlhkosti. Jednou z klíčových vlastností tohoto senzoru je jeho malá energetická náročnost s odběrem okolo 100 nA. Výhodou takovýchto malých proudů je i to, že nedochází k samovolnému ohřevu a zkreslení hodnot. Snímací prvek je umístěn na vrchní straně senzoru. Přesnost hodnot je závislá na měřícím čase, kdy se rozlišení pohybuje podle požadavku od 8 do 14 bitů pro vlhkost a od 11 do 14 bitů pro teplotu. Udávaná relativní přesnost měření vlhkosti je $\pm 2\%$ v rozmezí od 20 do 60 % a teploty je $\pm 0,2\%$ v rozsahu 5 do 60 °C. Komunikace probíhá po sběrnici I^2C . Senzor disponuje jednou nastavenou I^2C adresou. Napájecí napětí se pohybuje v rozmezí od 2,7 V do 5,5 V. Velmi nízká energetická náročnost pohybující se v řádech μA až nA, při 11bitovém měření s jedním vzorkem za sekundu. HDC1080 disponuje dvěma módy: Sleep mode (tedy „spánek“) a Measurement mode (mód ve kterém měří). Velmi malé rozměry pouzdra PWSN (6pin) tedy 3×3 mm [58].

HDC2080

Jde o novější ekvivalent HDC1080. Tento typ má skoro ve všem totožné parametry, od měřících vlastností až po pouzdro, ve kterém je senzor umístěn. Změna je v napájecím napětí, které je v rozsahu od 1,6 V do 3,6 V a je zde výrobcem zaručena nižší spotřeba energie oproti předchozímu modelu. Menší změna byla provedena i v konfiguraci registrů. Dále je zde možný výběr dvou I^2C adres, oproti jedné u HDC1080 [59, 60].

HDC1010

Jedná se o senzor pro snímání teploty a vlhkosti od stejné společnosti. Snímací prvek je oproti HDC1080 umístěn uvnitř a není tedy viditelný zvenčí. Napájecí napětí od 2,7 V do 5,5 V. Rozlišení a přesnost snímaných veličin je shodná s předchozími typy. Toto čidlo je vybaveno navíc piny pro selekci I^2C adresy a pinem DRDY na kterém se signalizuje logickou 0/1, že jsou data připravena k odeslání přes sběrnici pro MCU. Je zde oproti HDC1080 změna také v pouzdře, které je DSBGA ($2,04 \times 1,59$ mm), kdy se jedná o menší pouzdro. Toto pouzdro oproti HDC1080 disponuje 8 vývody [61]. Novějším ekvivalentem z této rodiny je HDC2010. Disponuje opět stejnými parametry, až na napájecí napětí, které je v rozsahu od 1,6 V do 3,6 V [60, 62].

4.4.2 HTU20/21D

Jedná se o digitální senzor od společnosti Measurement Specialties™ či od společnosti TE connectivity pro snímání teploty a relativní vlhkosti. Senzor je vložen do pouzdra DFN s rozměry $3 \times 3 \times 0,9$ mm. Senzor poskytuje naměřené hodnoty v digitální podobě po sběrnici I^2C . Senzory jsou energeticky nenáročné, designované pro použití v

malých zařízeních s přesnou interpretací naměřených veličin. Rozlišení měřených veličin, je možné uživatelsky zvolit v konfiguračním registru. A to tedy 8 bitů pro relativní vlhkost a 12 bitů pro teplotu nebo až 12 bitů pro RH a 14 bitů pro teplotu. Měřicí přesnost závisí na nastaveném čase měření a teplotě. Měřené teploty se mohou pohybovat v rozmezí od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až po $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkost od 0-100 %.

Senzor obsahuje na snímacím prvku PTFE membránu, která zabraňuje zanesení vlhkostního čidla prachem a vodou, kdy by díky tomuto znečištění docházelo ke zkreslení naměřených hodnot. Membrána poskytuje krytí IP67. Napájecí napětí se zde pohybuje od 1,5 V do maximálního, které je 3,6 V. Kdy je ale výrobcem doporučována hodnota napájecího napětí kolem 3 V. Spotřeba čidla je v setinách μA , když se čidlo nachází ve *sleep modu* a při měřicí sekvenci se pohybuje spotřeba okolo 300-500 μA . Tento senzor jako předchozí typy obsahuje také vyhřívací člen, konfigurovatelný v registru senzoru. Každý senzor je individuálně kalibrován a testován výrobcem. Má vypálené vlastní identifikační číslo v hexadecimální podobě [63–65].

4.4.3 HTS221

Jde o ultra kompaktní digitální senzor pro snímání teploty a relativní vlhkosti od společnosti STMicroelectronics. Senzor se nachází v pouzdře HLGA-6L ($2 \times 2 \times 0,9\text{ mm}$). Již z výroby je kalibrován. Snímací element relativní vlhkosti je na bázi planárního kapacitoru. Senzor podporuje jak I^2C sběrnici tak SPI. Naměřené hodnoty poskytuje s rozlišením až 16 bitů. HLGA pouzdro obsahuje integrovaný obvod obsahující snímací prvky (teplota, vlhkost), převodní ADC a pak kontrolní jednotku zpracovávající data pro použitou sběrnici I^2C /SPI. Měření vlhkosti probíhá pomocí kapacitního elementu, který je spojen s nízko-šumovým zesilovačem. Tento zesilovač poskytuje v analogové podobě zesílené napěťové úrovně signálu. Ty jsou dále pomocí AD převodníku převedeny do digitální podoby. Senzor nabízí možnosti použít obě sběrnice I^2C /SPI. Při použití sběrnice I^2C je potřeba pin CS buď připojit na napájecí napětí, nebo jej nepřipojovat, kdy se v senzoru uplatní vnitřní *pull-up*. Pro použití SPI je potřeba CS pin připojit na GND. Použitelné napájecí napětí je od 1,7 V do 3,6 V. Přesnost naměřených veličin, má možnou výchytku od skutečných hodnot, kdy se tato výchytku u vlhkosti pohybuje o $\pm 3,5\%$ v rozsahu od 20 do 80 % a u teploty o $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozsahu od $+18$ do $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozlišení obou veličin je až 16bitové. Senzor je výrobně kalibrován a je u něj garantována dlouhodobá přesnost snímaných veličin [66].

4.4.4 SHT3x

Je rodina digitálních senzorů od společnosti Sensirion AG. Sensory se nachází v pouzdře DFN 8 s rozměry $2,5 \times 2,5 \times 0,9\text{ mm}$. Jsou navrženy pro komunikaci po sběrnici I^2C , kde disponují dvěma adresami. U SHT30/31 je i možnost, což je výrobně daná vlastnost, kdy senzor je buď vybaven I^2C nebo analogovým výstupem. Ten nám naměřenou hodnotu reprezentuje jako analogové úrovně napětí. Napájecí napětí se pohybuje od 2,15 V do 5,5 V a odebíraný proud je přibližně 100 μA . Teplotní rozsah senzorů je od -40 do $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vlhkostní od 0 do 100 %. U SHT30 s I^2C je teplotní přesnost

$\pm 0,2$ °C v rozsahu od 0 do 65 °C, přičemž se tato odchylka může zvyšovat na $\pm 0,5$ °C s teplotou rostoucí nad 65 °C či klesající pod 0 °C. Pro SHT31 se teplotní přesnost pohybuje v rozsahu od 0 do 90 °C o $\pm 0,2$ °C, kdy opět záleží na úrovni měřené teploty. SHT35 oproti předchozím typům disponuje nejmenší teplotní odchylkou $\pm 0,1$ °C na malém teplotním rozsahu od 20 do 60 °C. Poté se jako u předchozích typů tato přesnost mění až k hodnotě $\pm 0,4$ °C. Pro vlhkostní měření je u SHT30 přesnost ± 2 % v rozsahu od 10 do 90 %, u SHT31 je přesnost stejná, ale již na celém rozsahu od 0 do 100 %. SHT35 disponuje přesností $\pm 1,5$ % pro vlhkostní rozsah od 0 do 80 %, poté dochází k růstu této odchylky. Při měření těchto veličin závisí také na hodnotě měřené veličiny, času pro měření, který se pohybuje v jednotkách ms, a rozlišení, které po senzoru požadujeme. Rozlišení, které jsou senzory schopné, pro obě veličiny poskytnout, je 16bitové. Všechny zmíněné senzory jsou výrobně kalibrovány [67].

4.4.5 Si7013-A20

I^2C senzor pro snímání relativní vlhkosti a teploty od společnosti Silicon Labs. Senzor se nachází v pouzdře DFN (3×3 mm). Tento typ senzoru nabízí měření teploty jak čidlem uvnitř senzoru, tak možnost připojit NTC termistor na piny VINP a VINN. Díky této vlastnosti je možné provádět pomocí jednoho senzoru měření dvou teplot najednou, jedná se tedy o dvouzónové měření teploty. Teplotu je možné měřit s maximální výchylkou od skutečné hodnoty o $\pm 0,4$ °C v rozsahu od -10 do +85 °C, až do rozlišení 14 bitů. V případě měření hodnot od -40 °C do -10 °C je zde nepřesnost měření větší až o 0,9 °C, což platí i při vyšších teplotách od 85 do 125 °C. Měření vlhkosti je možné od 0 do 100 % s odchylkou měření ± 3 % s rozlišením od 8 do 12 bitů, přičemž při vyšší vlhkosti než 85 %, dochází k navýšení nepřesnosti o ± 5 %. Dále senzor umožňuje díky selektivní adrese připojit 2 čidla tohoto typu na jednu I^2C sběrnici. Napájecí napětí senzoru se pohybuje od 1,9 V do 3,6 V s velmi malým odebíraným proudem, který se v případě aktivního senzoru, tedy ve fázi měření, pohybuje kolem hodnoty 150 μA . Výrobce zaručuje velkou dlouhodobou stabilitu senzoru. Teplotní i vlhkostní část senzoru je výrobně kalibrována [68].

4.5 Termistory

4.5.1 Pt1K

Jde o PTC termistor od společnosti Tesla Blatná, a.s., založený na velmi přesném platinovém rezistoru, jenž je vyroben technologií tenkých vrstev na korundové keramice. Meандр je tvořen tenkou vrstvou platiny a laserem justován na velmi přesnou základní hodnotu elektrického odporu. Před mechanickým a chemickým poškozením je měřící prvek pokryt dielektrickou pasivační vrstvou. Nominální hodnota odporu při 0 °C je 1000 Ω . Měřící teplotní rozsah termistoru je od -200 do 400 °C s tolerancí ČSN EN 60 751 třída F 0,3. Díky přesné technologické výrobě a preciznímu zpracování výrobce zaručuje dlouhodobou stabilitu s maximálním rozptylem odporu 0,1 % po 1000 h při 200 °C a samozahřívání měřícího elementu 0,4 K/mW při °C. Díky malým rozměrům,

zmíněné dlouhodobé stability vlastností a zanedbatelnému samozahřívání jde o prvek s velmi širokým spektrem použití od domácích spotřebičů, přes automobilový průmysl, až po zkušební a kontrolní zařízení [25].

4.5.2 Pt100, Pt500, Pt1000

Jedná se o přesné, platinové PTC termistory založené na keramickém substrátu s meandrem tvořeném platinou. Výrobci je v tomto případě více, např. Siemens, Reissmann, ifm electronic atd.. Číslo v jejich názvu udává hodnotu elektrického odporu v Ohmech při teplotě 0 °C. Výrobce je zaručena přesnost měření s odchylkou $\pm 0,5$ °C. Měřicí rozsah je od -50 do +230 °C s velmi lineární charakteristikou. Termistory jsou vyrobeny v souladu s normou DIN EN 60751 [69]. Maximální měřicí proud je 1 mA. Při vyšších hodnotách může docházet k samoohřevu senzoru a zkreslení měřených hodnot. Vyrábí se v několika provedeních pro průmyslové využití, kdy je měřicí termistor umístěn v nerezové trubičce opatřené závitem pro snadnější upevnění na zařízení. Jejich určení je v přesných přístrojích měřících teplotu a dalších aplikacích s potřebou přesného měření teploty [70, 71].

5 Praktické řešení

Tato část práce se již zabývá specifickým výběrem vhodných komponent popsaných výše. Zde dojde k porovnání jejich klíčových vlastností a výběru nejvhodnějšího I^2C MUX a digitálního RH/T čidla pro danou realizaci.

Návrh plošného spoje byl realizován v návrhovém programu EasyEda, kde byl DPS navrhnut ve velikosti KETCube s odpovídajícími parametry.

Pro správnou činnost rozšiřujícího modulu bylo nutné implementovat do stávajícího firmwaru KETCube knihovny pro správnou funkci MUX s RH/T čidly.

5.1 Výběr komponent

Výběr komponent je rozdělen do jejich klíčových prvků, kde jsou porovnávány nejvýznamnější parametry těchto komponent. Díky tomu je zřejmé, v čem se různé prvky liší, v čem vynikají a v čem naopak zaostávají za konkurenčními.

5.1.1 I^2C multiplexor

Tato podkapitola se zabývá výběrem vhodného I^2C MUX. V Tab. 5.1 můžeme vidět porovnání rešeršovaných multiplexorů a jejich parametrů. Jako nejvhodnější typ, co do parametrů a ceny, se jeví PCA/TCA9548A od společností NXP Semiconductors nebo Texas Instruments, přičemž jsou zaměnitelné a kompatibilní, jen je vyrábí různé společnosti. V některých parametrech je tento MUX překonáván konkurenčními či vyšší řadou. Pokud bude brán v potaz poměr cena/parametry tak je pro tuto aplikaci dostačující.

TCA/PCA9548 je 8 kanálový I^2C MUX, který disponuje 8 nastavitelnými adresami a širokým rozsahem napětí (napájecího/na sběrnici). V této aplikaci bude fungovat a pracovat s napětovou úrovní 3V3 na kterou jsou jeho parametry plně dostačující.

Tab. 5.1: Porovnání I^2C multiplexorů

	PCA/TCA9548A	PCA9848	MAX7356	MAX7357	MAX7358	PI4MSD5V9547
Napájecí napětí [V]	1,95 - 5,5	0,8 - 3,6	2,3 - 5,5			1,65 - 5,5
Odběr [mA]	±100	±100	±100			±100
Odběr v operačním módu [μ A]	20	8	65			20
Odběr v standby módu [μ A]	1	1	0,2			0,1
Napětové úrovně na sběrnici [V]	1,8; 2,5; 3,3; 5	0,8; 1,8; 2,5; 3,3	1,8; 2,5; 3,3; 5			1,2; 1,8; 2,5; 3,3; 5
Adresy na sběrnici	0x70 - 0x77	0xE0h - 0xBEh	0x70 - 0x77			0x70 - 0x77
Spínací odpor [Ω]	12	7	11			11
Cena ¹ [Kč]	±40	±50	±100			±40

¹Ceny porovnávaných multiplexorů jsou převzaty z e-shopu Farnell <https://cz.farnell.com/>

5.1.2 RH/T senzor

V následující Tab. 5.2 je znázorněno, vybráno a porovnáno několik specifických parametrů digitálních RH/T čidel. Parametricky se od sebe čidla neliší nijak závratně, až na „Odběr v klidu“ a „Odběr při měření“, kdy se hodnoty pohybují až v řádu jednotek.

Tab. 5.2: Porovnání RH/T senzorů

	HDC1080	HDC2080	HTU20D	HTU21D	HTS221	SHT30	SHT31	SHT35	Si7013-A20
Napájecí napětí [V]	2,7 - 5,5	1,62 - 3,6	1,5 - 3,6	1,5 - 3,6	1,7 - 3,6	2,15 - 5,5			1,9 - 3,6
Odběr při měření	1300 nA	550 nA	450 μ A	450 μ A	2000 nA	1700 nA			150 μ A
Odběr v klidu	100 nA	50 nA	20 nA	20 nA	500 nA	200 nA			60 nA
Sběrnice	I ² C	I ² C	I ² C	I ² C	I ² C/SPI	I ² C			I ² C
Adresy na I ² C	0x40	0x40, 0x41	0x40	0x40	0x5F, 0xBE	0x44, 0x45			0x40, 0x41
Rozlišení T [bit]	11, 14	9, 11, 14	11 - 14	11 - 14	16	16			11 - 14
Rozlišení RH [bit]	8, 11, 14	9, 11, 14	8 - 12	8 - 12	16	16			8 - 12
Přesnost pro T [°C]	5 - 60, $\pm 0,2$	5 - 60, $\pm 0,2$	5 - 60, $\pm 0,3$	5 - 60, $\pm 0,3$	0 - 60, ± 1	0 - 65, $\pm 0,2$	0 - 85, $\pm 0,2$	20 - 60, $\pm 0,1$	-10 - 85, $\pm 0,3$
Přesnost pro RH [%]	20 - 60, ± 2	10 - 80, ± 2	20 - 80, ± 3	20 - 80, ± 2	20 - 80, $\pm 3,5$	10 - 90, ± 2	0 - 100, $pm2$	0 - 80, ± 1	0 - 80, ± 2
Cena ² [Kč]	± 90	± 100	± 80	± 170	± 80	± 100	± 160	± 250	± 90

Jako nejvhodnější digitální čidlo bylo vybráno HDC1080 a jeho novější ekvivalent HDC2080 od společnosti Texas Instruments, přičemž obě mají stejné rozložení vývodů. Jednou z předností výběru tohoto čidla je jeho zakomponování ve firmwaru platformy KETCube, udávané přesnosti měřených veličin a ekonomická stránka. Další klíčovou vlastností těchto senzorů je jejich malá energetická náročnost. Aby bylo možné tuto skutečnost splnit, je čidlo většinu svého času ve *sleep modu* (spánku). Výhodou takto nízkých odebíraných proudů je i vlastnost, díky které se čidlo samovolně neohřívá a nedochází tak ke zkreslení naměřených hodnot.

Další výhodou senzorů HDC1080/2080 je i vlastní monitoring napájecího napětí, což se uplatní v aplikacích napájených z chemicky zdrojů, tedy z baterií/akumulátorů. Zároveň je možné upozornit na dosažení nízkého napětí, které klesne pod 2,8 V. Dalším zajímavým prvkem je vlastní odporový vyhřívací element, který je možné využít k testování senzoru nebo ovlivnění kondenzace vlhkosti na senzoru a tím i offsetu při měření vlhkosti. Vyhřívací element se zapíná pouze v modu měření.

Sleep mode: V tomto modu HDC1080/2080 čeká na komunikaci po I²C se sekvencí konfiguračních bitů. Těmi jsou časy konverze hodnot, čtení napájecího napětí, spuštění měření, požadované rozlišení měření a vyčtení naměřených hodnot (teploty, vlhkosti, příp. napětí baterie, zapnutí ohřívacího elementu HEAT). Po příchodu této sekvence a zapnutí měření se senzor přepne ze *sleep modu* do *measurement modu*, provede naměřenou hodnotu a poté se opět přepne do *sleep modu*.

Measurement mode: V tomto modu HDC1080/2080 probíhá měření teploty a vlhkosti s nakonfigurovaným rozlišením a proběhne uložení do příslušného registru.

Programová obsluha čidla: HDC1080/2080 pracuje pouze jako *slave* zařízení na I²C sběrnici, na které není povoleno mít více zařízení se stejnou adresou. Připojení k I²C sběrnici je provedeno přes *open-drain* vstupně/výstupní piny, SDA a SCL. Po zapnutí senzoru je potřeba vyčkat přibližně 15 ms, přičemž po uplynutí této doby je možné zahájit měření.

Adresa čidla: Pro komunikaci se senzorem je potřeba nejdříve určit adresu požadovaného čidla skládající se ze 7 adresových bitů a „přímého“ bitu určující zápisovou

²Ceny porovnávaných senzorů jsou převzaty z e-shopu Farnell <https://cz.farnell.com/>

nebo čtecí operaci čidla. Jedná se o adresu danou výrobcem a to: u HDC1080 na 0x40. U novějšího modelu HDC2080 je tato adresace rozšířena na dvě a to: 0x40, 0x41 [58, 59].

5.1.3 Digitální převodník pro PTC

Porovnávané převodníky jsou uvedeny v Tab. 5.3. Vhodným kandidátem pro aplikaci měření PTC se jeví převodník MAX31865, jehož hlavní výhodou oproti LTC2986 spočívá v podstatné jednoduchosti. I přesto, že nedisponuje měřením vícero kanály, je možné rozšířit měřicí vstupy pomocí analogového multiplexoru, který by sloužil pro přepínání až 8 PTC. Dále díky možnostem převodníku a vhodného zapojení (2-, 3-, 4-vodičové) lze anulovat odpory MUX a přívodních vodičů. Tím by bylo možné dosáhnout požadovaných měřících vlastností soustavy.

Tab. 5.3: Porovnání Digitálních převodníků pro PTC

	MAX31865	LTC2986
Napájecí napětí [V]	3,0 - 3,6	2,85 - 5,25
Odběr [mA]	2	15
Sběrnice	SPI	SPI
Počet měřících kanálů	1	10
Rozlišení ADC [bit]	15	24
Přesnost měření [°C]	0,5	0,1
Podporované měřicí elementy	PTC	PTC, termočláanky
Čas konverze [ms]	21	167,2
Detekce chyb snímacího elementu	ano	ano
Ochrana proti přepětí vstupů [V]	ano, ± 45	ne, musí být externí
Cena ³ [Kč]	± 130	± 450

5.1.4 Analogový multiplexor

V Tab. 5.4 jsou porovnány základní parametry analogových MUX. Některé z porovnávaných MUX nevyhovují kladeným požadavkům ať už napájecím napětím, či velkým odporem v zapnutém stavu. Jednou z velkých nevýhod některých analogových MUX je odpor v zapnutém stavu (R_{ON}). Velký odpor by již nebylo možné zanedbat a ovlivňoval by naměřené hodnoty. Jako nejvhodnější MUX se jeví ADG708, MAX4638 nebo MAX4781.

Tab. 5.4: Porovnání analogových MUX

	CD74HC4051	ADG708BRUZ	MAX4638ESE	MUX508IPWR	MAX4781
Napájecí napětí [V]	2 - 5,5	1,8 - 5,5	1,8 - 5,5	10 - 36	1,6 - 3,6
Odběr [μ A]	8	5	0,08	-	1
Odpor v zapnutém stavu [Ω]	70	8	4,5	225	0,7
Cena ⁴ [Kč]	± 10	± 100	± 95	± 60	± 100

³Ceny porovnávaných převodníků jsou převzaty z e-shopu Farnell <https://cz.farnell.com/>

⁴Ceny porovnávaných analogových MUX jsou převzaty z e-shopu Farnell <https://cz.farnell.com/>

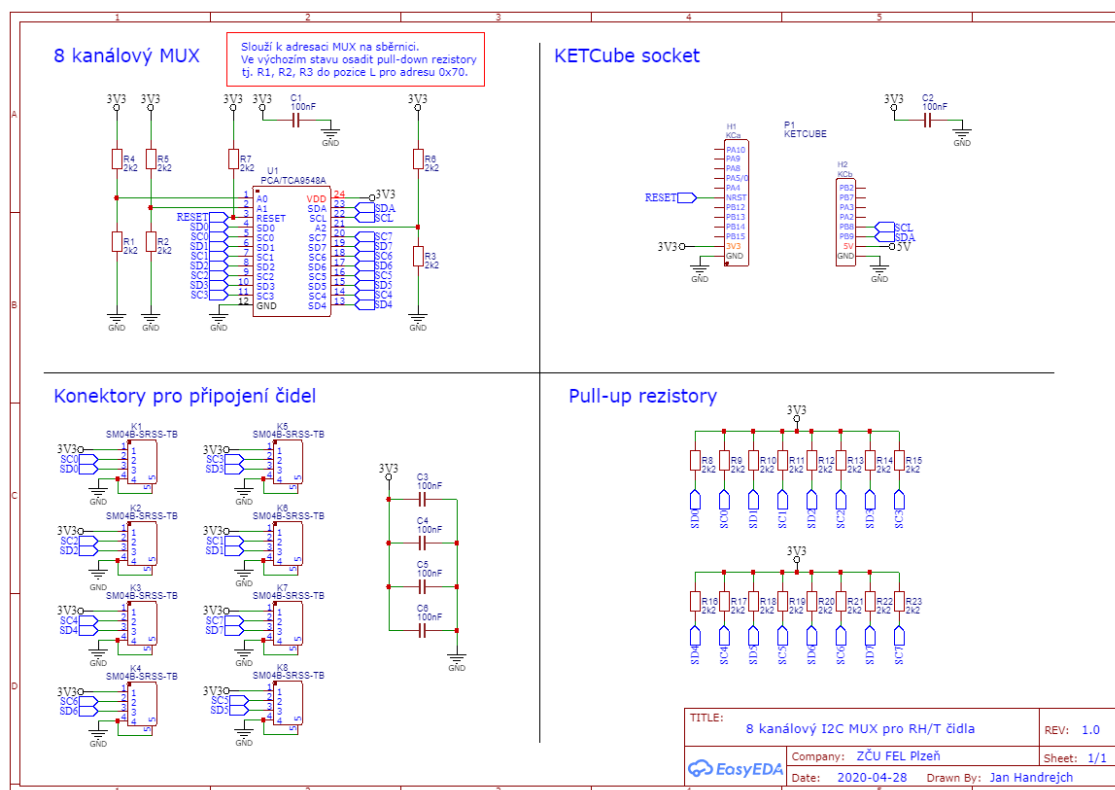
5.2 Návrh rozšiřující desky

Návrh desek plošných spojů byl realizován ve volně dostupném nástroji EasyEDA. Jedná se o poměrně jednoduchý návrhový software s různými funkcemi od jednoduchých návrhových pravidel jednovrstvých a vícevrstvých DPS, až po 3D vizualizaci výsledného DPS.

Prakticky bude realizováno pouze měření pomocí digitálních RH/T čidel a I^2C MUX, pro která budou navržena odpovídající DPS. Jedním z důvodů výběru tohoto řešení je jeho jednoduchost, spolehlivost a stabilita v oblasti měření a vhodnost z ekonomického hlediska.

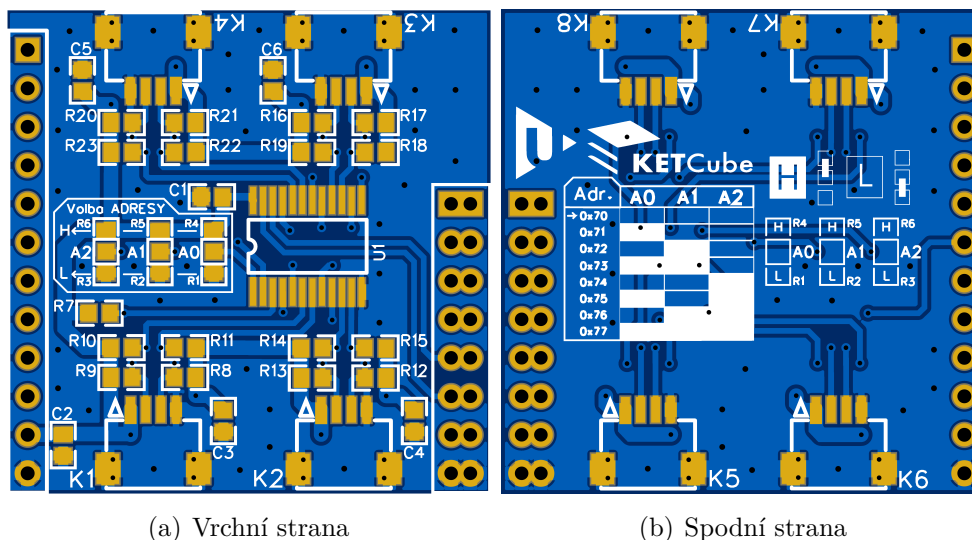
5.2.1 DPS pro I^2C MUX a RH/T čidla

Na schématu Obr. 5.1 je znázorněno zapojení 8 kanálového I^2C MUX, který potřebuje pro svojí funkci pouze několik pasivních součástek, rezistorů, jak pro adresaci, tak *pull-up* rezistory pro správnou funkci I^2C sběrnice. Tyto rezistory, jak napovídá poznámka ve schématu, je nutné osadit podle potřeby a nastavení příslušné adresy. Dále je zde několik blokovacích keramických kondenzátorů na napájecí větvi, jak u samotného MUX, tak u konektorů pro RH/T čidla. Dále se ve schématu a poté i na desce nachází několik *pull-up* rezistorů na vodičích sběrnice, které jsou připojeny a umístěny ke konektorům tak, aby se nemuseli nacházet u čidel.



Obr. 5.1: Schéma rozšiřujícího modulu I^2C MUX

Na Obr. 5.2 je uveden návrh a rozložení komponentů: multiplexoru, pasivních součástek a konektorů na desce plošných spojů, včetně popisků pro lepší orientaci při osazování. Krátká zdvojená lišta, pro připojení KETCube, je vytvořena z důvodu zpětné kompatibility s předchozí verzí KETCube Obr. 5.2(a). Na spodní straně je i „pomocník“ pro výběr I^2C adresy, který vidíme na Obr. 5.2(b).

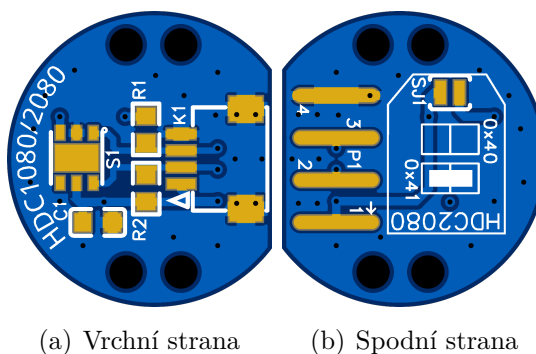


Obr. 5.2: Návrh DPS s I^2C MUX pro platformu KETCube

5.2.2 DPS pro RH/T čidla

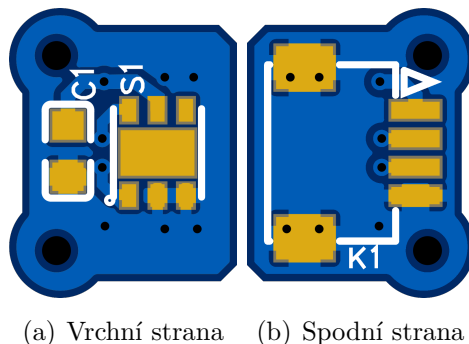
Návrh DPS pro vybrané senzory HDC1080/2080 byl zhotoven v několika provedeních.

Na Obr. 5.3 je znázorněn „hybridní“ návrh senzoru pro připojení buď pomocí konektorů, které se nacházejí i na desce s I^2C MUX, nebo pomocí textilního vodiče s průměrem 18 mm. Na této DPS jsou obsaženy i pájecí plošky pro *pull-up* rezistory R1, R2, které je možné doplnit v případě, že se senzor používá v zapojení, kdy na I^2C sběrnici ještě nejsou obsaženy. Dále je čidlo možné, díky shodnému *footprintu* senzorů používat s HDC1080/2080. Jelikož senzor HDC2080 má variabilní I^2C adresu, je zde pro něj zakomponován výběr adresy.



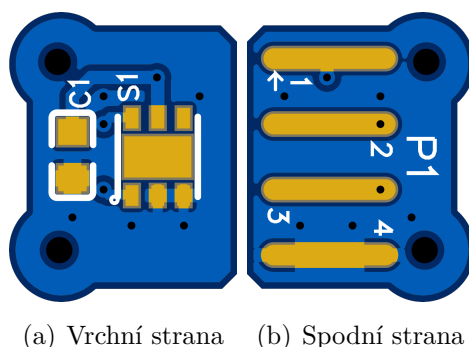
Obr. 5.3: Návrh kulatého DPS pro senzor HDC1080/2080

Na Obr. 5.4 je zobrazen senzor s vnějšími rozměry 10×8 mm, přičemž je na DPS obsažen pouze blokační kondenzátor C1, samotný senzor S1 a konektor K1.



Obr. 5.4: Návrh DPS s konektorem pro senzor HDC1080/2080

Na Obr. 5.5 je zobrazen senzor s vnějšími rozměry 12×8 mm, pájecími ploškami pro textilní vodič. Jinak je shodný jako předchozí DPS.



Obr. 5.5: Návrh DPS pro senzor HDC1080/2080 s ploškami pro textilní vodič

5.3 Softwarová obsluha

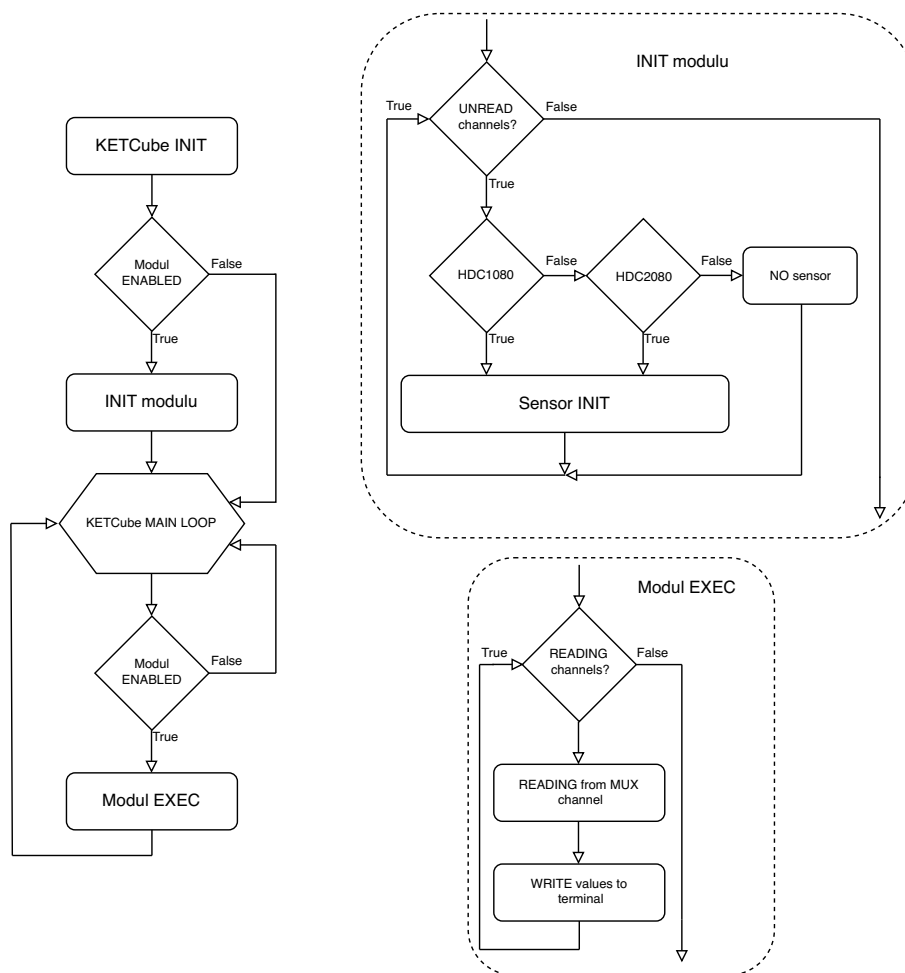
Programování samotného KETCube probíhá pomocí volně dostupného softwaru Keil s příslušnou licencí pro čipy STM32 s jádrem Cortex-M0/M0+, kde je využito programovacího jazyku C/C++. Celý firmware je volně dostupný na GitHubu, kde si každý může stáhnout tento repositář a naprogramovat si svoje moduly do tohoto firmwaru. V projektu můžeme nalézt obslužné knihovny a drivery pro SX1278 a samotný STM čip.

Samotné programování probíhá přes programátor ST-Link, ve kterém se nahraje zkompileovaný firmware z programu Keil. Pro správnou funkci a úspěšné naprogramování musí být KETCube během programování napájen přes USB port. Po naprogramování lze na hostitelském zařízení otevřít konzoli a na daném portu COM sledovat konzolové menu zařízení, či práci jednotlivých povolených modulů s výpisem.

Funkce KETCube je následovná: uvnitř běží hlavní program s danou délkou opakování (*base period*), který postupně projde všechny povolené moduly (*podprogramy*),

vyčte hodnoty a připraví je pro odeslání do sítě LoRa/Sigfox. V případě, že to moduly podporují vypíše text s hodnotami do konzole.

Pro vytvoření takového modulu, je připraven pomocný program v jazyce Python, který předpřipraví soubory modulu a zavede modul do systému hlavního programu. Na uživateli je, aby napsal obsah pro .h a .c soubory svého modulu.



Obr. 5.6: Stavový diagram programu

Navržený program funguje následovně (viz Obr. 5.6). Po připojení zařízení KETCube k převodníku TTL/USB a otevření COM portu, např. v programu PuTTY, dále pak zapojení napájení KETCube, kdy lze na konzoli sledovat probíhající inicializaci zařízení. V případě, že modul není povolen, lze pomocí příkazu „list“ zobrazit všechny podporované moduly zařízení KETCube. Navržený modul lze poté povolit příkazem „enable tca9548 2“, a provést restart zařízení pomocí příkazu „reload“. Tímto nastavením začne modul pracovat. Program poté v cyklu projde všechny kanály MUX modulu a zkusí najít a inicializovat připojené moduly (HDCX080). Po skončení inicializace skočí do hlavní smyčky KETCube. Periodicky jsou poté ze zařízení čteny hodnoty připojených HDCX080. To probíhá následovně: postupně se v cyklu projdou všechny kanály MUX a vyčítají se hodnoty, které se poté vypisují na konzoli. Po skončení smyčky se opět vrátíme na hlavní smyčku KETCube.

6 Závěr

Cílem této práce bylo najít řešení realizace vícekanálového měření teploty pro platformu KETCube a rozšířit tak možnosti této platformy.

V teoretické části práce byly rozebrány jednotlivé technologie, potřebné pro pochopení a správný návrh architektury měření, kde byla snaha o návrh jak digitální, pomocí integrovaných digitálních senzorů, tak analogové řešení, pomocí přesných PTC. Bylo potřeba popsat a přiblížit si samotnou platformu KETCube, z pohledu HW, kdy popsání klíčových prvků a parametrů vedlo k lepšímu povědomí o této platformě. Ná samotné prvky obsažené v KETCube navazují popisy jednotlivých elektronických prvků, které byly využity dále v práci včetně popisu jednotlivých digitálních komunikačních sběrnic. V návaznosti na hlavní MCU platformy KETCube a jako bezdrátové konektivity, byly částečně popsány i standardy používané v IoT sítích. Nedílnou součástí samotné teoretické části jsou řešerše jednotlivých elektronických prvků, kde byla snaha, o průzkum trhu a nalezení jednotlivých vhodných, elektronických součástek od různých výrobců s podobnými a vyhovujícími parametry pro realizaci měření a následné použití.

Měření teploty bylo realizováno zatím pomocí integrovaných digitálních senzorů s rozšířením pomocí multiplexoru. Analogové řešení snímání teploty pomocí PTC, zůstalo pouze na teoretické úrovni s nastíněním tohoto problému, jeho úskalími a vhodnou cestou pro jeho vyřešení s možností vícekanálového snímání.

V praktické části bylo vybráno a porovnáno několik důležitých parametrů součástek, které se uplatnili u digitálního řešení snímání teploty. Jimiž byly digitální senzory a 8-kanálový MUX, podporující I^2C sběrnici. Pro vybrané součástky byly navrženy desky plošných spojů, kdy deska s MUX je navržena v rozměrech platformy KETCube. Desky pro senzory byly navrženy v několika různých provedeních s připojitelností i pro textilní vodiče. Pro správnou funkci tohoto modulu byla zrealizována základní softwarová obsluha, která využívá již implementované knihovny a dopsána byla pouze obsluha vybraného MUX.

Je ale nutné poznamenat, že ne všechny problémy, které se vyskytly v průběhu této práce byly uspokojivě vyřešeny. Možná nešťastným řešením jsou miniaturní konektory a jejich složitější výroba a kompletace. Dalším aspektem zahrnutým do tohoto odstavce může být samotné měření pomocí PTC termistorů, přičemž není ještě plně rozhodnuto, jakou cestou bude analogové řešení v budoucnu realizováno. Část teoretické přípravy v práci, může být využita k lepšímu rozhodnutí a povědomí o tomto typu měření.

Ovšem cíle bakalářské práce se povedlo naplnit a vznikl tak další modul rozšiřující platformu KETCube, který lze použít i nejen pro multikanálové měření I^2C senzory, ale i pro ostatní zařízení podporující tuto sběrnici.

Literatura

- [1] WIKIPEDIE. *Teplota* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2020. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Teplota&oldid=18234521>.
- [2] Y. HOUDAS, E. R. *Human Body Temperature: Its Measurement and Regulation*. Springer Science & Business Media, 1982. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=LDcLBgAAQBAJ>. ISBN 1489903453, 9781489903457.
- [3] WIKIPEDIE. *Tělesná teplota* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2020. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=T%C4%9Blesn%C3%A1_teploata&oldid=18195634.
- [4] NATHAN CHANDLER. *What Is Relative Humidity and How Does it Affect How I Feel Outside?* [online]. howstuffworks, 25.1.2019. [cit. 5.5.2020]. Dostupné z: <https://science.howstuffworks.com/nature/climate-weather/atmospheric/question651.htm>.
- [5] WIKIPEDIE. *Vlhkost vzduchu* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2020. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Vlhkost_vzduchu&oldid=18048756.
- [6] GAVRI.CZ. *Vyhrajte nad vlhkostí vzduchu* [online]. <https://www.gavri.cz/>, 2020. [cit. 24.3.2020]. Dostupné z: <https://www.gavri.cz/blog-1/jak-vlhkost-vzduchu-ovlivnuje-vas-zivot/>.
- [7] JAN BĚLOHOUBEK, KRYŠTOF VANĚK, MARTIN ÚBL. *KETCube Datasheet (0.1.1)* [online]. The SmartCAMPUS Team, 25.1.2019. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: <https://github.com/SmartCAMPUSZCU/KETCube-docs>.
- [8] WIKIPEDIE. ARM - Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2020. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=ARM&oldid=18153378>.
- [9] STMICROELECTRONICS. *Ultra-low-power 32-bit MCU Arm® based Cortex®-M0+, STM32L082KB, STM32L082KZ, STM32L082CZ* [online]. 2019. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l082cz.pdf>.
- [10] MURATA MANUFACTURING CO., LTD. *Sub-G Module Data Sheet* [online]. 2017. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: https://wireless.murata.com/datasheet?/RFM/data/type_abz.pdf.
- [11] WIKIPEDIE. GPIO - Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2020. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=GPIO&oldid=18104704>.
- [12] ARM HOLDINGS. *Cortex™-M0+, Technical Reference Manual* [online]. 2012. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: https://static.docs.arm.com/ddi0484/c/DDI0484C_cortex_m0p_r0p1_trm.pdf.

- [13] WIKIPEDIE. Poloduplex - Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2019. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Poloduplex&oldid=17889506>.
- [14] SEMTECH. *Datasheet SX1276/77/78/79* [online]. 2019. [cit. 8.3.2020]. Dostupné z: https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000Je1G/a/2R00000010Ks/Bs97dmPXeatnbdoJNVMIDaKD1Qz8q1N_gxDcgqi7g2o.
- [15] SEMTECH. *Semtech SX1276* [online]. 2019. [cit. 9.3.2020]. Dostupné z: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1276>.
- [16] MIKROELEKTRONIKA D.O.O. *mikroBUSTM standard specifications* [online]. 2015. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: <https://download.mikroe.com/documents/standards/mikrobus/mikrobus-standard-specification-v200.pdf>.
- [17] MIKROELEKTRONIKA D.O.O. *mikroBUSTM pinout standard specification* [online]. 2012. [cit. 4.5.2020]. Dostupné z: https://www.mouser.com/pdfdocs/mikroElektronika_mikroBUS_specification.pdf.
- [18] WIKIPEDIE. A/D převodník - Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2019. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=A/D_p%C5%99evodn%C3%ADk&oldid=17519767. [Online; navštíveno 28. 3. 2020].
- [19] VLASTIMIL JÁNEŠ. *D/A a A/D převodníky* [online]. [cit. 28.3.2020]. Dostupné z: https://www.fd.cvut.cz/personal/janes/zdt/prednasky/3_prevodniky.pdf.
- [20] WIKIPEDIE. D/A převodník - Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2019. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=D/A_p%C5%99evodn%C3%ADk&oldid=17391505. [Online; navštíveno 28. 3. 2020].
- [21] [HTTP://OKLIKE.C-A-V.COM/](http://oklike.c-a-v.com/). *CO TO JE TERMISTOR* [online]. [cit. 4.4.2020]. Dostupné z: http://oklike.c-a-v.com/soubory/co_je_termistor.html.
- [22] JACK, KUFRE AND NWANGWU, EMMANUEL AND ETU, ISRAEL AND OSUAGWU, ERNEST. *A Simple Thermistor Design for Industrial Temperature Measurement* [online]. [cit. 4.4.2020]. Dostupné z: <https://bit.ly/3d9h3cs>.
- [23] ILX LIGHTWAVE. *Callendar-Van Dusen Equation and RTD Temperature Sensors* [online]. [cit. 10.5.2020]. Dostupné z: https://www.newport.com/medias/sys_master/images/h97/h74/9163083317278/TN-RTD-1-Callendar-Van-Dusen-Equation-and-RTD-Temperature-Sensors.pdf.
- [24] TEXAS INSTRUMENTS. *A Basic Guide to RTD Measurements* [online]. [cit. 10.5.2020]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/sbaa275/sbaa275.pdf?ts=1589631776151>.
- [25] TESLA BLATNÁ A.S. *Pt 1K* [online]. [cit. 4.4.2020]. Dostupné z: http://www.tesla-blatna.cz/_soubory/katalogovy_list_pt1k.pdf.
- [26] THE DUTCH SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING. *RESISTANCE THERMOMETERS PTC* [online]. [cit. 15.5.2020]. Dostupné z: <https://www.dspe.nl/knowledge-base/thermomechanics/chapter-5---measurement/5-2-contact-sensors/5-2-2--resistance-thermometers-ptc/>.

- [27] WIKIPEDIE. LoRa — Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2020. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=LoRa&oldid=18014928>.
- [28] SIGFOX. *Sigfox connected objects: Radio specifications* [online]. [cit. 1.4.2020]. Dostupné z: https://storage.sbg.cloud.ovh.net/v1/AUTH_669d7dfced0b44518cb186841d7cbd75/prod_medias/b2be6c79-4841-4811-b9ee-61060512ecf8.pdf.
- [29] SEMTECH. *RF Wireless, LoRa Wireless Products* [online]. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf>.
- [30] SAN RAMON, CALIF.(BUSINESS WIRE)LoRa ALLIANCE™. *LoRaWAN R1.0 Open Standard Released for the IoT* [online]. 2015. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: <https://www.businesswire.com/news/home/20150616006550/en/LoRaWAN-R1.0-Open-Standard-Released-IoT>.
- [31] MICHAL LOM, ONDŘEJ PŘIBYL. *Sítě pro internet věcí v České republice* [online]. [cit. 1.4.2020]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/informacni-a-telekomunikacni-technologie/16519-site-pro-internet-veci-v-ceske-republice>.
- [32] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/01.2019-1 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu* [online]. [cit. 1.4.2020]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/vseobecne-opravneni-c.vo-r/10/01.2019-1/obrazky/vo-r10-012019-1.pdf>.
- [33] JUAN CARLOS ZUNIGA, BENOIT PONSARD. *SIGFOX System Description* [online]. [cit. 1.5.2020]. Dostupné z: <https://www.ietf.org/proceedings/96/slides/slides-96-lpwan-10.pdf>.
- [34] RF WIRELESS WORLD. *SigFox tutorial-network architecture, interfaces, protocol stack* [online]. [cit. 1.4.2020]. Dostupné z: <https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/Sigfox-tutorial.html>.
- [35] IOT-PORTAL. *SIGFOX – princip, struktura, protokol, použití* [online]. [cit. 1.4.2020]. Dostupné z: <https://www.iot-portal.cz/2017/05/29/sigfox-princip-struktura-protokol-pouziti/>.
- [36] PAVEL TIŠNOVSKÝ. *Externí sériové sběrnice SPI a I²C* [online]. [cit. 1.4.2020]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbernice-spi-a-i2c/>.
- [37] NIT CALICUT. *SERIAL AND PARALLEL COMMUNICATION* [online]. [cit. 4.4.2020]. Dostupné z: <http://www.rignitc.com/serial-and-parallel-communication/>.
- [38] JIŘÍ VLČEK. *Přenos dat* [online]. [cit. 1.5.2020]. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/docu/texty/0001/000102_mereni_a_sber_dat_pomoci_pc.pdf.
- [39] NXP SEMICONDUCTORS N.V. *UM10204 I²C-bus specification and user manual* [online]. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>.

- [40] BEST-MICROCONTROLLER-PROJECTS. *SPI interface Tutorial* [online]. [cit. 1.4.2020].
Dostupné z:
<https://www.best-microcontroller-projects.com/spi-interface.html>.
- [41] FPGA4FUN. *SPI 1 - What is SPI?* [online]. [cit. 1.4.2020]. Dostupné z:
<https://www.fpga4fun.com/SPI1.html>.
- [42] MAXIM INTEGRATED™. *WHAT IS AN IBUTTON DEVICE?* [online]. [cit. 4.4.2020].
Dostupné z:
<https://www.maximintegrated.com/en/products/ibutton/ibuttons/index.cfm>.
- [43] MAXIM INTEGRATED™. *DS18B20* [online]. [cit. 4.4.2020]. Dostupné z:
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
- [44] MAXIM INTEGRATED™. *GUIDE TO 1-WIRE COMMUNICATION* [online]. 2008.
[cit. 4.4.2020]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/1/1796.html>.
- [45] PICPROJECTS.NET. *DS1820 1-Wire Temperature Sensor* [online]. [cit. 4.4.2020].
Dostupné z: <http://www.picprojects.net/ds1820/>.
- [46] NXP SEMICONDUCTORS N.V. *PCA9548A, 8-channel I²C-bus switch with reset*
[online]. 2015. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z:
<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9548A.pdf>.
- [47] TEXAS INSTRUMENTS. *TCA9548A, Low-Voltage 8-Channel I²C Switch with Reset*
[online]. 2019. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca9548a.pdf>.
- [48] NXP SEMICONDUCTORS N.V. *PCA9848, 8-channel ultra-low voltage, Fm+ I²C-bus
switch with reset* [online]. 2016. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z:
<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9848.pdf>.
- [49] MAXIM INTEGRATED™. *MAX7356/MAX7357/MAX7358, 1-to-8 I²C Bus
Switches/Multiplexers with Bus Lock-Up Detection, Isolation, and Notification* [online].
2008. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z:
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX7356-MAX7358.pdf>.
- [50] DIODES INCORPORATED, PERICOM. *PI4MSD5V9547, 8 Channel I²C bus multiplexer
with Reset* [online]. 2016. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z:
<https://www.diodes.com/assets/Datasheets/PI4MSD5V9547.pdf>.
- [51] TEXAS INSTRUMENTS. *CDx4HC405x, CDx4HCT405x High-Speed CMOS Logic Analog
Multiplexers and Demultiplexers* [online]. 2019. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc4052.pdf>.
- [52] ANALOG DEVICES. *ADG708/ADG709* [online]. 2014. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z:
https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG708_709.pdf.

- [53] MAXIM INTEGRATED™. *3.5 ω , Single 8:1 and Dual 4:1, Low-Voltage Analog Multiplexers* [online]. 2012. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX4638-MAX4639.pdf>.
- [54] TEXAS INSTRUMENTS. *MUX50x 36-V, Low-Capacitance, Low-Charge-Injection, Precision, Analog Multiplexers* [online]. 2016. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/mux509.pdf>.
- [55] MAXIM INTEGRATED™. *High-Speed, Low-Voltage, CMOS Analog Switches/Multiplexers* [online]. [cit. 15.5.2020]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX4781-MAX4783.pdf>.
- [56] MAXIM INTEGRATED™. *RTD to Digital Converter* [online]. [cit. 15.5.2020]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.pdf>.
- [57] LINEAR TECHNOLOGY. *Multi-Sensor High Accuracy Digital Temperature Measurement System with EEPROM* [online]. [cit. 15.5.2020]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/29861fa.pdf>.
- [58] TEXAS INSTRUMENTS. *HDC1080, Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor* [online]. 2016. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1080.pdf>.
- [59] TEXAS INSTRUMENTS. *HDC2080, Low-Power Humidity and Temperature Digital Sensor* [online]. 2018. [cit. 1.5.2020]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc2080.pdf?ts=1588153096224>.
- [60] TEXAS INSTRUMENTS. *Technical differences among HDC2080/HDC2010/HDC1080* [online]. 2018. [cit. 1.5.2020]. Dostupné z: <http://e2e.ti.com/support/sensors/f/1023/t/861532?HDC2010-Technical-differences-among-HDC2080-HDC2010-HDC1080>.
- [61] TEXAS INSTRUMENTS. *HDC1010, Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor* [online]. 2016. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1010.pdf>.
- [62] TEXAS INSTRUMENTS. *HDC2010, Low-Power Humidity and Temperature Digital Sensors* [online]. 2019. [cit. 1.5.2020]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc2010.pdf?ts=1588525202843>.
- [63] TE CONNECTIVITY LTD. *HTU20D(F), Digital Relative Humidity sensor with Temperature output* [online]. 2018. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FHPC202%7F7%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_HPC202_7.pdf%7FHPP845E034R4.
- [64] MEASUREMENT SPECIALTIES INC. *HTU21D(F), Digital Relative Humidity sensor with Temperature output* [online]. 2013. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/1899-HTU21D.pdf>.

- [65] TE CONNECTIVITY LTD. *HTU21D(F), Digital Relative Humidity sensor with Temperature output* [online]. 2017. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FHPC199_6%7FA6%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_HPC199_6_A6.pdf%7FCAT-HSC0004.
- [66] STMICROELECTRONICS. *HTS221, Capacitive digital sensor for relative humidity and temperature* [online]. 2016. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/hts221.pdf>.
- [67] SENSIRION AG. *SHT3x-DIS, Humidity and Temperature Sensor* [online]. 2019. [cit. 1.5.2020]. Dostupné z: https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/2_Humidity_Sensors/Datasheets/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT3x_Datasheet_digital.pdf.
- [68] SILICON LABS. *Si7013-A20, I²C Humidity and Two-zone Temperature sensor* [online]. 2016. [cit. 25.2.2020]. Dostupné z: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si7013-A20.pdf>.
- [69] WIKA INSTRUMENT, LP. *Operating limits and tolerances of platinum resistance thermometers per EN 60751: 2008* [online]. [cit. 5.4.2020]. Dostupné z: https://de-de.wika.de/upload/DS_IN0017_en_co_20804.pdf.
- [70] REISSMANN SENSORTECHNIK GMBH. *Pt100, Pt500, Pt1000* [online]. [cit. 4.4.2020]. Dostupné z: http://www.apkservice.ru/files/Pt100_Pt500_Pt1000.pdf.
- [71] LAKE SHORE CRYOTRONICS, INC. *PT-100 Platinum RTDs* [online]. [cit. 4.4.2020]. Dostupné z: <http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~iqup/domeenv/PDF/pt100plat.pdf>.

Seznam obrázků

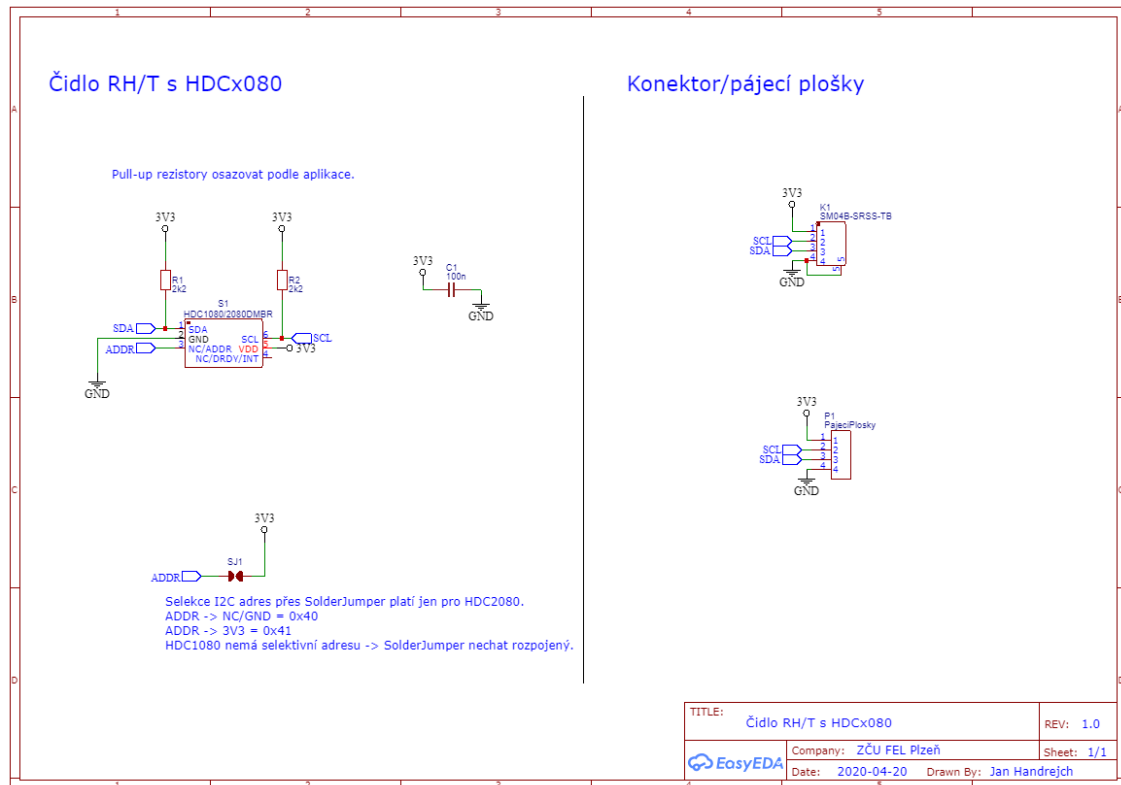
2.1	Blokové schéma vícekanálového měření RH+T	12
3.1	Rozměry a rozložení vývodů mikroBUS™ (převzato z [17])	16
3.2	Teplotní závislost PTC a NTC (překresleno z [22])	18
3.3	Zapojení PTC pro měření (překresleno z [24])	19
3.4	Sériová komunikace (MSB první) (překresleno z [37])	22
3.5	Paralelní komunikace (překresleno z [37])	22
3.6	Sběrnice I ² C (překresleno z [39])	23
3.7	Sběrnice SPI v zapojení s Chip select (překresleno z [40])	24
3.8	Sběrnice SPI v zapojení Daisy-Chain (překresleno z [40])	24
3.9	Sběrnice 1-Wire™ (překresleno z [45])	25
5.1	Schéma rozšiřujícího modulu I ² C MUX	38
5.2	Návrh DPS s I ² C MUX pro platformu KETCube	39
5.3	Návrh kulatého DPS pro senzor HDC1080/2080	39
5.4	Návrh DPS s konektorem pro senzor HDC1080/2080	40
5.5	Návrh DPS pro senzor HDC1080/2080 s ploškami pro textilní vodič	40
5.6	Stavový diagram programu	41
1	Schéma kulatého „hybridního“ čidla pro HDCX080	51
2	Návrh kulatého „hybridního“ čidla pro HDCX080, 3D vizualizace	52
3	Schéma „mini“ čidla s konektorem pro HDCX080	52
4	Návrh „mini“ čidla pro HDCX080 s konektorem, 3D vizualizace	53
5	Schéma „mini“ čidla s pájecími ploškami pro HDCX080	53
6	Návrh „mini“ čidla pro HDCX080 s pájecími ploškami, 3D vizualizace	54
7	Návrh I ² C MUX, 3D vizualizace	54
8	Návrh I ² C MUX, 3D vizualizace	54
9	Vyrobené DPS	55
10	Vyrobené DPS	55
11	Osazené DPS I ² C MUX	56
12	Osazené DPS „hybridního“ čidla pro HDCX080	56
13	Osazené DPS Mini čidla s konektorem	56

Seznam tabulek

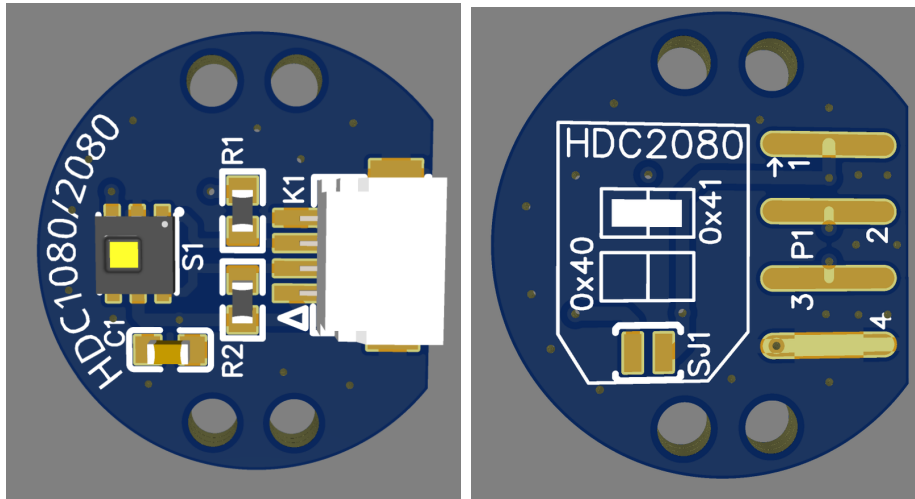
5.1	Porovnání I^2C multiplexorů	35
5.2	Porovnání RH/T senzorů	36
5.3	Porovnání Digitálních převodníku pro PTC	37
5.4	Porovnání analogových MUX	37

Přílohy

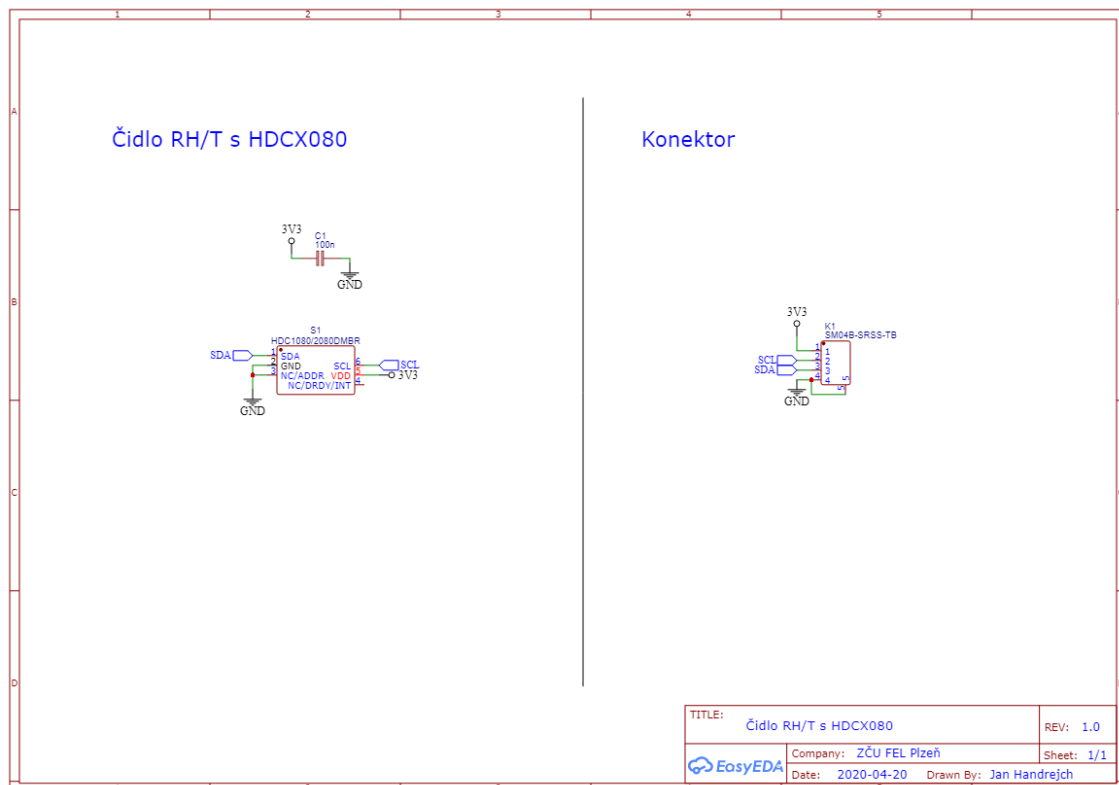
V příloze na CD lze nalézt jak samotnou práci v digitální podobě, veškeré zdrojové soubory pro DPS, v několika formátech pro různé návrhové software. Funkční SW modul, včetně celého firmwaru KETCube na kterém bylo prováděno testování. Viz CtiMe.txt na přiloženém CD.



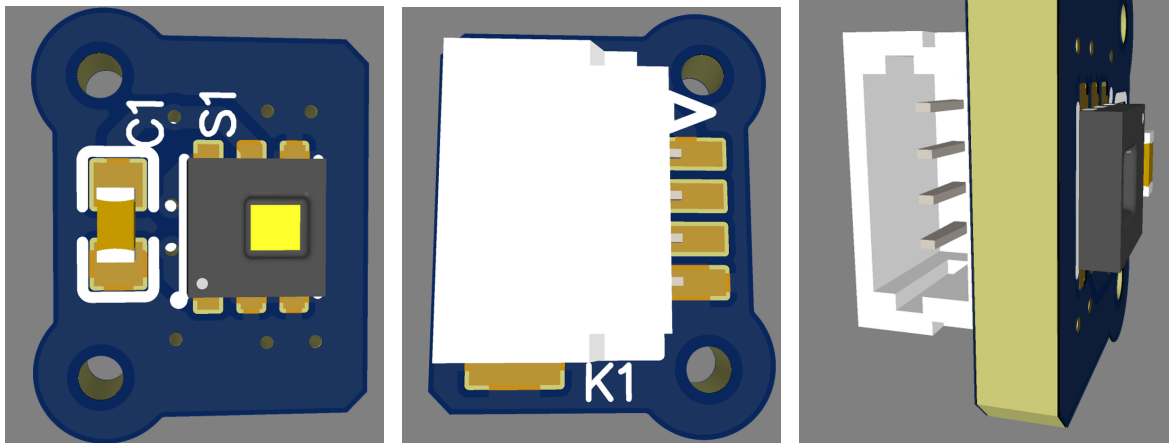
Obr. 1: Schéma kulatého „hybridního“ čidla pro HDCX080



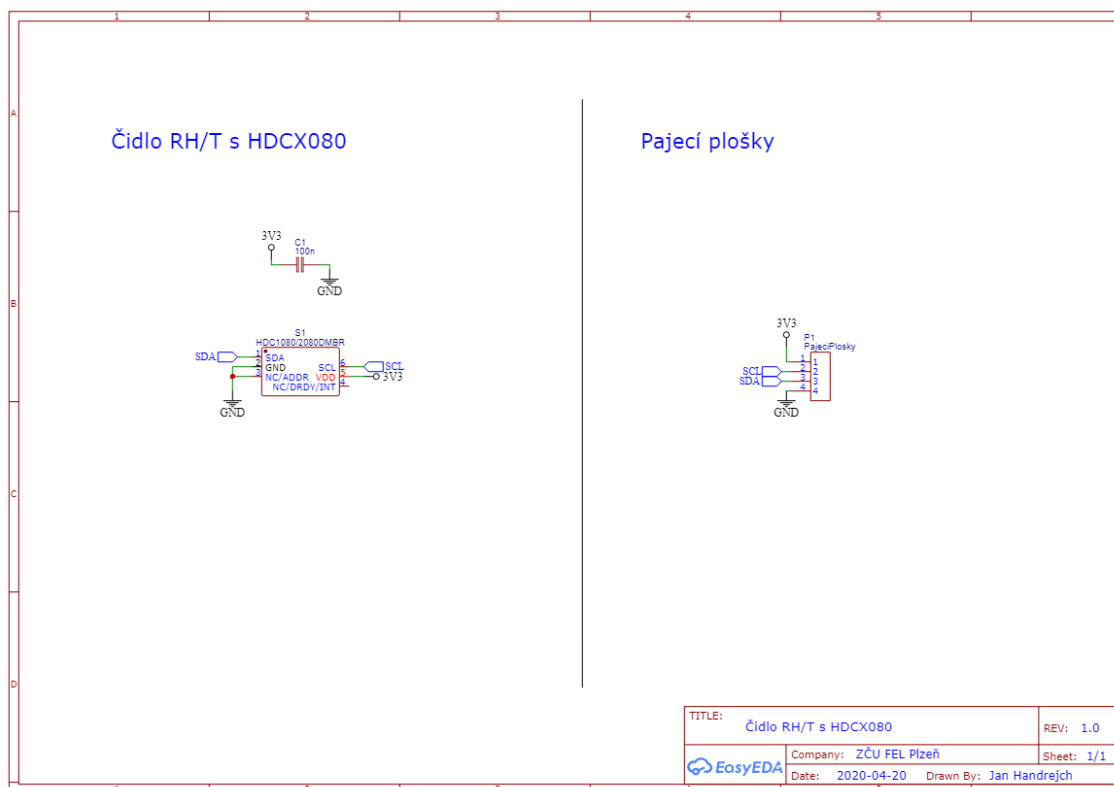
Obr. 2: Návrh kulatého „hybridního“ čidla pro HDCX080, 3D vizualizace



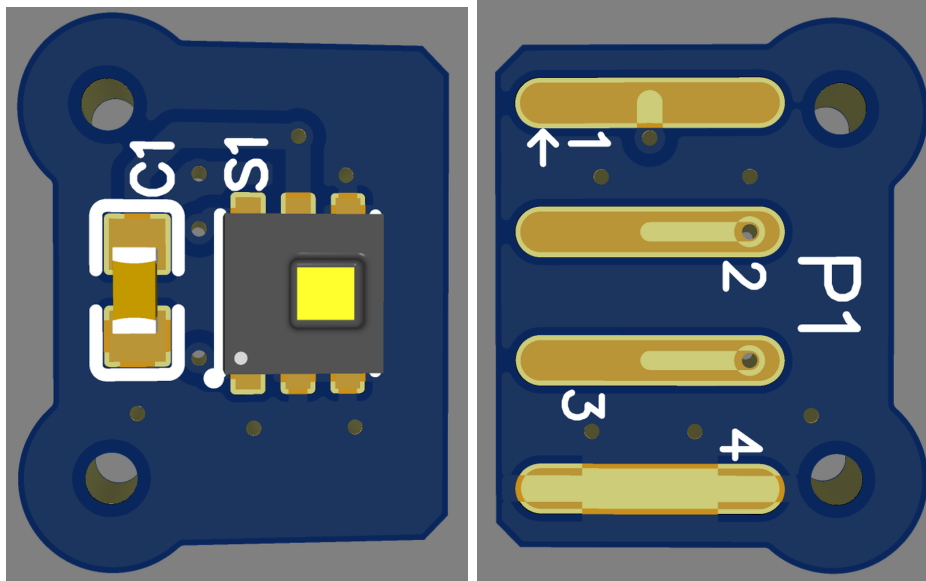
Obr. 3: Schéma „mini“ čidla s konektorem pro HDCX080



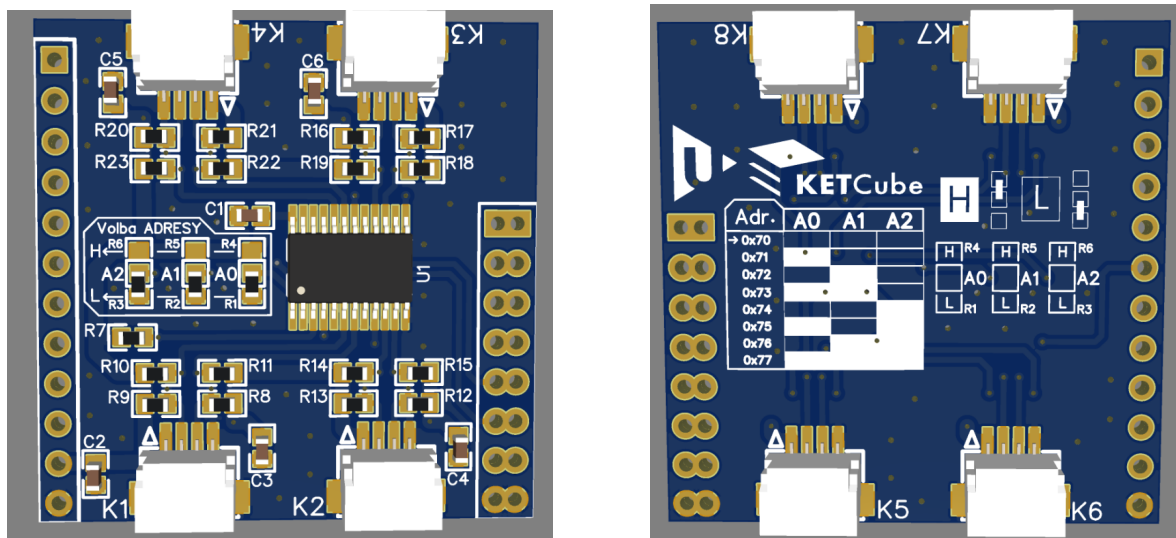
Obr. 4: Návrh „mini“ čidla pro HDCX080 s konektorem, 3D vizualizace



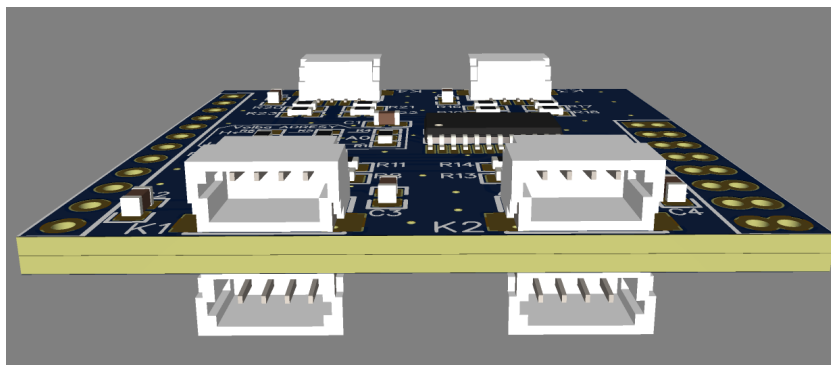
Obr. 5: Schéma „mini“ čidla s pájecími ploškami pro HDCX080



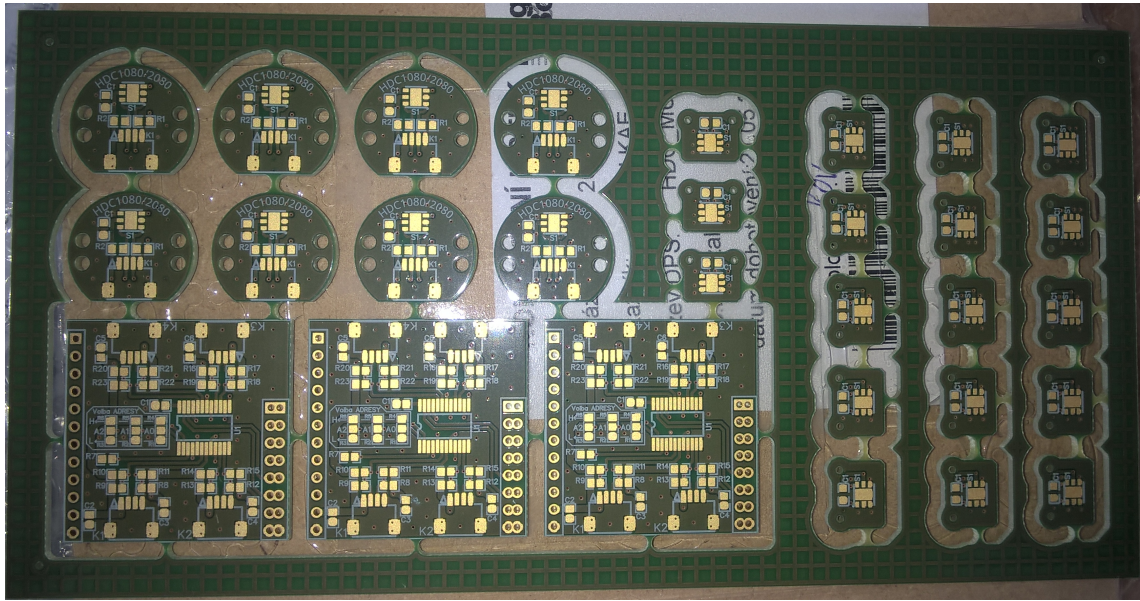
Obr. 6: Návrh „mini“ čidla pro HDCX080 s pájecími ploškami, 3D vizualizace



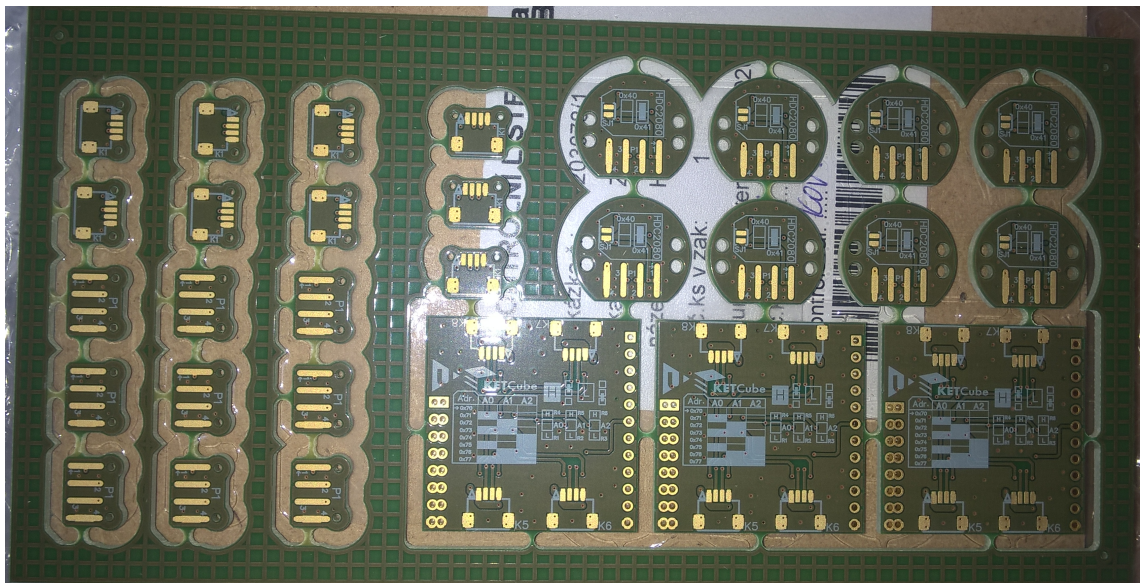
Obr. 7: Návrh I²C MUX, 3D vizualizace



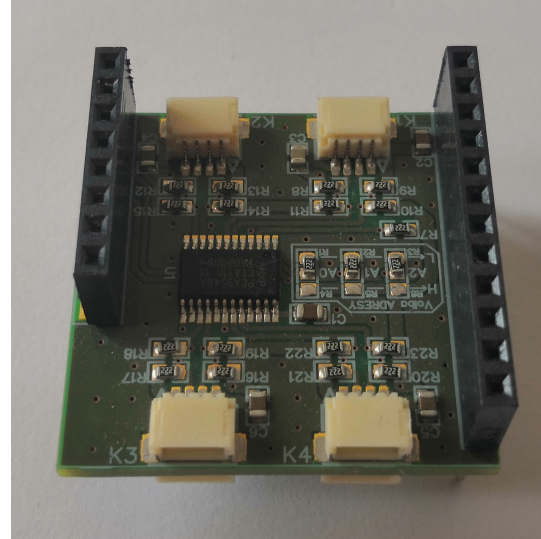
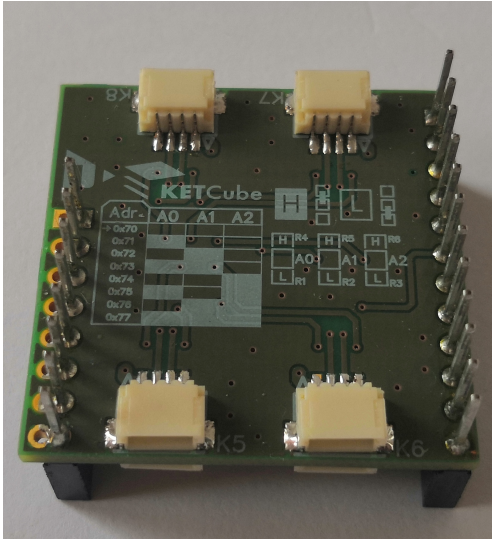
Obr. 8: Návrh I²C MUX, 3D vizualizace



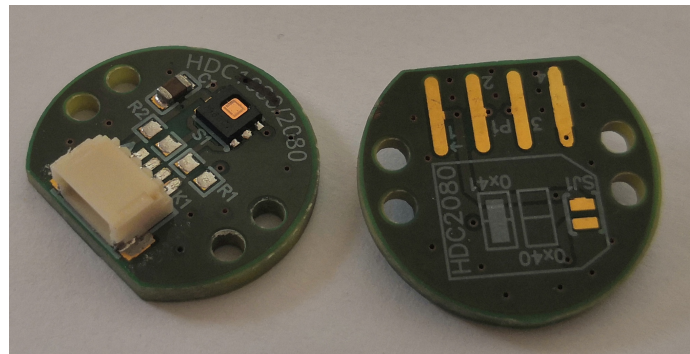
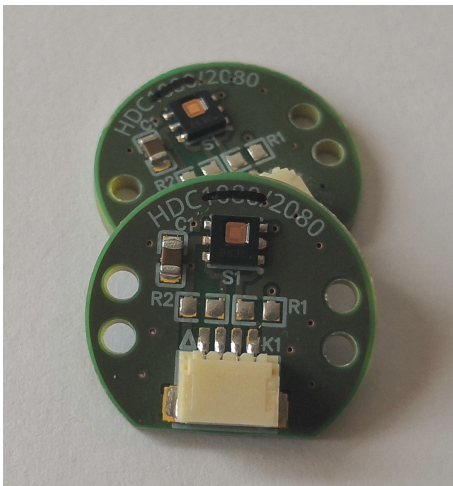
Obr. 9: Vyrobené DPS



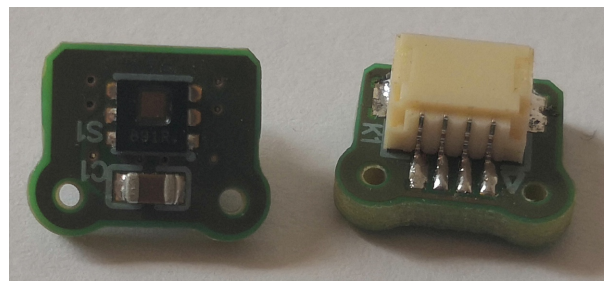
Obr. 10: Vyrobené DPS



Obr. 11: Osazené DPS I²C MUX



Obr. 12: Osazené DPS „hybridního“ čidla pro HDCX080



Obr. 13: Osazené DPS Mini čidla s konektorem