

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2015

Pavel Gregar

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

**Domácí meteostanice
z přípravku Digilent Nexys 4**

leden 2015

Autor: Pavel Gregar

Vedoucí práce: Ing. Pavel Lafata Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 6.1.2015

.....*Progar*.....

podpis bakalanta

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlu Lafatovi Ph.D. za konzultace a připomínky při této vypracování této práci.

Dále děkuji rodičům a celé rodině za jejich podporu při studiu a mým přátelům a kolegům za jejich cenné rady a připomínky.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Gregar Pavel**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Síťové a informační technologie

Název tématu: **Domácí meteostanice z přípravku Digilent Nexys 4**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s přípravky Digilent Nexys 3 a 4 a jejich ovládáním prostřednictvím jazyka VHDL. Navrhněte a proveďte připojení alespoň trojice externích čidel, např. teplota, tlak, vlhkost apod. V jazyce VHDL vytvořte program pro vyčítání hodnot z jednotlivých čidel a zobrazení změřené hodnoty pomocí segmentového displeje na přípravku a barevných stavových LED diod. Využijte rovněž dostupný port RS232 pro vyčítání změřených hodnoty na připojené PC.

Seznam odborné literatury:

- [1] Aplikační poznámky a ukázkové aplikace dostupné z webů <http://www.xilinx.com> a <http://www.digilentinc.com> [on-line]
- [2] Pinker, J.; Poupa, M.: Číslicové systémy a jazyk VHDL. 1. vydání. BEN - Technická literatura, Praha, 2006. ISBN 80-7300-198-5.

Vedoucí: Ing. Pavel Lafata, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

prof. Ing. Boris Šimák, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 9. 12. 2013

Anotace:

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací domácí meteostanice s využitím přípravku Digilent Nexys4 naprogramovaného v jazyce VHDL. K tomuto přípravku jsou připojeny externí senzory pro snímání teploty a relativní vlhkosti vzduchu, jejichž obsluhu je věnována část této práce. Změřené fyzikální veličiny jsou pomocí segmentového displeje zobrazeny na přípravku a dále jsou odesílány do počítače pomocí USB s využitím virtuálního sériového rozhraní.

Klíčová slova: Meteostanice, FPGA, VHDL, Digilent, Nexys4, DS18B20, DHT11, DHT22, ADT7420, RS-232

Summary:

This bachelor thesis deals with the design and realization of a home weather station using Digilent Nexys4 device programmed in VHDL. This device is connected to external sensors for monitoring temperature and relative humidity. Sensors operation is described in a part of this work. The measured physical quantities are displayed by device using segment display and sent to PC via USB using a virtual serial interface.

Index Terms: Weather station, FPGA, VHDL, Digilent, Nexys4 ,DS18B20, DHT11, DHT22, ADT7420, RS-232

Obsah

Obsah	8
Úvod	8
TEORETICKÁ ČÁST	9
1. Návrh domácí meteostanice	9
1.1. Blokový návrh meteostanice	9
1.2. Požadované vlastnosti meteostanice	10
2. Výběr senzorů	11
2.1. Senzor teploty.....	11
2.2. Senzor relativní vlhkosti.....	12
3. Hardware	13
3.1. Digilent Nexys4.....	13
3.2. Digitální teplotní senzor DS18B20	14
3.2.1. Komunikace se senzorem DS18B20	14
3.3. Digitální kombinovaný senzor teploty a vlhkosti DHT11	16
3.3.1. Komunikace se senzorem DHT11.....	16
3.4. Digitální teplotní senzor ADT7420.....	18
3.4.1. Komunikace se senzorem ADT7420.....	18
3.5. Kombinovaný digitální senzor vlhkosti a teploty DHT22	20
3.5.1. Komunikace se senzorem DHT22.....	20
PRAKTICKÁ ČÁST	21
4. Software	21
4.1. Meteorologická stanice	21
4.1.1. Modul DS18B20	22
4.1.2. Modul DHT11	23
4.1.3. Modul DHT22	25
4.1.4. Modul ADT7420	25
4.1.5. Modul CRC	27
4.1.6. Modul temp_conv	28
4.1.7. Modul temp_conv2	29
4.1.8. Modul humidity_conv	30
4.1.9. Modul humidity_conv2	31
4.1.10. Modul divider a divider1MHz.....	32
4.1.11. Modul display.....	33

4.1.12.	Modul transmitter	34
4.1.13.	Submodul UART.....	35
4.1.14.	Submodul transmitController	37
4.2.	Software pro PC	38
5.	Realizace	40
5.1.	Výsledná realizace.....	40
5.2.	Testovací provoz	41
5.3.	Porovnání meteostanice.....	42
5.3.1.	Odchylka senzoru ADT7420.....	43
5.4.	Klady a zápory realizované meteostanice	44
6.	Závěr.....	45
7.	Literatura	46
8.	Seznam použitých zkratek.....	47
9.	Seznam obrázků a tabulek	48
10.	Přílohy	49

Úvod

Tato bakalářská práce je popisem návrhu a realizace domácí meteorologické stanice s využitím přípravku *Digilent Nexys4*. Meteorologická stanice bude umožňovat měření venkovní a vnitřní teploty a relativní vlhkosti vzduchu, zobrazení naměřených hodnot na sedmissegmentovém displeji a odesílání naměřených dat do počítače virtuálním sériovým rozhraním přes USB.

V první části práce je zpracován návrh meteostanice na úrovni jednotlivých bloků a jsou zde porovnány a následně vybrány nejvhodnější nabízené senzory pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu pro venkovní a vnitřní část meteostanice. V další části jsou popsány jednotlivé hardwarové části meteorologické stanice: přípravek *Digilent Nexys4* sloužící jako řídicí jednotka a vybrané senzory využití k měření fyzikálních veličin.

V praktické části práce je popsán program zajišťující funkci meteostanice, který zajišťuje komunikaci a čtení naměřených fyzikálních veličin z připojených senzorů, zobrazení naměřených veličin na displeji a odesílání dat do počítače. Dále je zde popsán program zpracovávající data v počítači určená k dalšímu zpracování a zobrazení.

Na konci práce je zhodnocena realizace této domácí meteostanice. Je zde vyhodnocen její testovací provoz a jsou zde zhodnoceny klady a zápory meteostanice oproti jiným komerčně dostupným meteostanicím.

TEORETICKÁ ČÁST

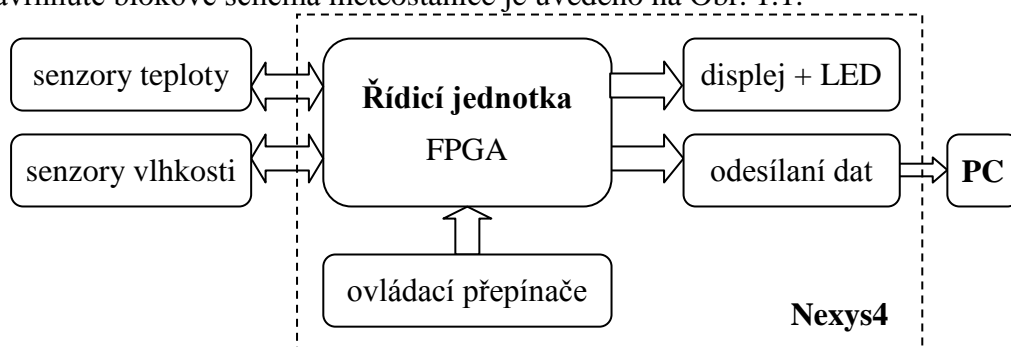
1. Návrh domácí meteostanice

V této kapitole je popsán návrh a funkce jednotlivých bloků navrhované domácí meteostanice a jsou zde uvedeny požadované vlastnosti jejich jednotlivých částí.

1.1. Blokový návrh meteostanice

Domácí meteostanice se bude skládat z řídicí jednotky tj. přípravku *Digilent Nexys4* a senzorů teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Meteostanice bude komunikovat s připojeným počítačem (PC), kde budou zpracovány a zobrazeny naměřené hodnoty.

Navrhnuté blokové schéma meteostanice je uvedeno na Obr. 1.1.



Obr. 1.1 - Blokové schéma meteostanice

Přípravek *Digilent Nexys4* bude zajišťovat komunikaci s připojenými senzory, zobrazení naměřených hodnot teploty a relativní vlhkosti vzduchu na sedmissegmentovém displeji, ovládání funkcí meteostanice pomocí přepínačů, indikaci činnosti meteostanice pomocí LED a odesílání naměřených dat do připojeného počítače přes USB pomocí virtuální sériové linky s využitím převodníku RS-232/USB umístěného na přípravku.

Senzory pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu budou připojeny k přípravku pomocí *Pmod* portů, které umožňují digitální komunikaci v úrovních logiky TTL či CMOS a zároveň poskytují napájení 3,3 V. Senzory pro měření venkovní teploty a relativní vlhkosti vzduchu budou připojeny pomocí kabelu dostatečné délky pro zajištění měření mimo interiér, kde bude umístěna meteostanice, avšak jeho délka bude naopak limitována potřebou dostatečného napětí pro správné rozlišení stavu logické nuly a jedničky. Senzory pro měření v interiéru budou připojeny přímo k řídicí jednotce.

Všechny funkce meteostanice budou implementovány pomocí jazyka VHDL v FPGA hradlovém poli přípravku (viz kapitola 3.1). Zobrazení, zpracování a ukládání dat bude realizováno pomocí programu v počítači, který bude zpracovávat přijatá data z meteostanice.

Napájení meteostanice bude zajišťovat připojený počítač pomocí USB kabelu, na kterém bude také probíhat přenos naměřených dat. V případě potřeby může být meteostanice napájena pomocí 5 V adaptéru nebo baterie [6, str. 3], v tomto případě ale nebude umožněn přenos dat do počítače a naměřené fyzikální veličiny budou pouze zobrazeny na sedmissegmentovém displeji přípravku.

1.2. *Požadované vlastnosti meteostanice*

Řídící jednotka domácí meteostanice bude zajišťovat:

- komunikaci se senzory,
- převod a zpracování naměřených fyzikálních veličin ze senzorů,
- zobrazení aktuálně naměřených veličin na sedmissegmentovém displeji,
- ovládání meteostanice pomocí přepínačů,
- indikaci činnosti meteostanice pomocí LED,
- odesílání naměřených veličin do připojeného počítače.

Senzory budou zajišťovat:

- měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu v interiéru,
- měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu v exteriéru.

Obslužný program v PC bude zajišťovat:

- zobrazení aktuálně naměřených hodnot teploty a relativní vlhkosti vzduchu,
- kontrolu komunikace s meteostanicí,
- ukládání přijatých dat pro další zpracování.

2. Výběr senzorů

Správný výběr senzorů pro měření požadovaných fyzikálních veličin je velmi důležitou částí návrhu domácí meteorostanice a zásadně ovlivní její výsledné parametry. V této kapitole jsou porovnány senzory teploty a relativní vlhkosti vzduchu, které byly zohledněny při návrhu meteorostanice. Účelem porovnání jednotlivých senzorů je seznámení s možnostmi snímání měřených veličin a určení senzorů, které budou využity při realizaci meteorostanice.

Při výběru nejvhodnějších senzorů byly hlavními parametry jejich přesnost, měřicí rozsah, typ výstupu, napájení a cena. Dále bylo nutné dodržet maximální možné napájecí napětí dané přípravkem *Nexys4*, tj. 3,3 V, aby nebylo nutné zajišťovat samostatné napájení senzorů. Primárně byly uvažovány moderní digitální senzory, které jsou vhodné pro přímé zpracování naměřených veličin pomocí přípravku použitého jako řídicí jednotka meteorostanice. Neméně důležitá byla však i výsledná cena celé realizace, kdy byly vybrány digitální senzory s dobrým poměrem cena/přesnost, kde přesnost měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu dostává pro běžné potřeby domácností.

2.1. Senzor teploty

Základní vlastností navrhované meteorostanice je měření teploty vzduchu v interiéru a exteriéru. Na trhu existuje velké množství senzorů a čidel pro měření teploty, které se liší fyzikálním principem měření, přesností i typem výstupu.

Hlavním uvažovaným parametrem byla přesnost měření, která zásadně ovlivní výslednou kvalitu meteorostanice. Proto byly uvažovány senzory s přesností lepší než ± 1 °C. Teplotní rozsah senzoru byl uvažován v rozsahu vhodném pro měření teploty odpovídající mírnému podnebnému pásu, z důvodu použití meteorostanice v těchto podmínkách. Kvůli digitálnímu zpracování signálu pomocí přípravku *Nexys4* byly uvažovány pouze senzory s digitálním výstupem.

Po uvažování těchto podmínek byly vybrány senzory uvedené v následující tabulce:

Tab. 2.1 - Porovnání senzorů teploty

Senzor	DS18B20	SHT11	SMT 160-30-92	DHT22	ADT7420
Výrobce	Maxim Integrated	Sensirion	Smartecc	Aosong	Analog Devices
Přesnost	$\pm 0,5$ °C	$\pm 0,4$ °C	$\pm 0,4$ °C	$\pm 0,5$ °C	$\pm 0,25$ °C
Měřicí rozsah	-10 ÷ 85 °C	-40 ÷ 123,8 °C	-40 ÷ 123,8 °C	-40 ÷ 125 °C	-10 ÷ 85 °C
Napájení	3 ÷ 5,5 V	2,4 ÷ 5,5 V	2,4 ÷ 5,5 V	3,3 ÷ 5,5 V	2,7 ÷ 3,3 V
Typ výstupu	digitální (1-wire)	digitální (I ² C)	digitální (PWM)	digitální (Aosong 1-wire)	digitální (I ² C)
Cena ²	62 Kč	487 Kč	97 Kč	199 Kč	- ¹

1 - senzor je integrován na přípravku *Digilent Nexys4*

2 - cena k 30.12.2014

Porovnáním parametrů a vlastností uvažovaných senzorů byly pro měření vnitřní a venkovní teploty vzduchu vybrány senzory ADT7420 a DS18B20.

Pro měření venkovní teploty byl vybrán senzor DS18B20 [7] od firmy *Maxim Integrated*. Mezi jeho hlavní výhody patří velmi nízká cena, dobrá přesnost v požadovaném rozsahu a jednovodičový digitální výstup. Tento teplotní senzor má oproti ostatním několik unikátních vlastností, které mohou být využity v navrhované domácí meteorostanici. Na jednu sběrnici lze umístit a poté adresovat více těchto senzorů pomocí unikátního 64-bitového kódu, což je možné využít například pro měření teploty na více místech. Senzor lze použít bez použití

dodatečných součástí a lze u něj využít upozornění při překročení uživatelem nastavitelné teploty.

K měření teploty v interiéru byl vybrán senzor ADT7420 [9] od firmy *Analog Devices*. Tento senzor je nejpřesnější z uvažovaných senzorů v rozsahu pro měření vnitřní teploty. Navíc je umístěn přímo na přípravku a lze ho tak použít bez dalších finančních výdajů. Jeho mírnou nevýhodou je pouze složitější protokol komunikace využívající dvou vodičů.

2.2. Senzor relativní vlhkosti

Další měřenou fyzikální veličinou je relativní vlhkost vzduchu. Nabídka senzorů pro měření relativní vlhkosti vzduchu není tak rozšířená jako u senzorů teploty, navíc většina těchto senzorů má napěťový, odporový nebo kapacitní výstup. Proto by u nich bylo nutné použít další elektroniku k analogovému zpracování a přenosu do digitálního formátu pro zpracování řídicí jednotkou. Navíc tato čidla mnohdy potřebují napájení vyšší než 3,3 V.

Z těchto důvodů byly uvažovány pouze senzory s digitálním výstupem uvedené v následující tabulce:

Tab. 2.2 - Porovnání senzorů relativní vlhkosti vzduchu

Senzor	DHT11	DHT22	SHT11	SHT15	SHT71
Výrobce	Aosong	Aosong	Sensirion	Sensirion	Sensirion
Přesnost ¹	±5 %	±2 ÷ 5 %	±3 ÷ 5 %	±2 ÷ 4 %	±3 ÷ 5 %
Měřicí rozsah	20 ÷ 95 %	0 ÷ 100 %	0 ÷ 100 %	0 ÷ 100 %	0 ÷ 100 %
Napájení	3 ÷ 5,5 V	2,4 ÷ 5,5 V	2,4 ÷ 5,5 V	2,4 ÷ 5,5 V	2,4 ÷ 5,5 V
Typ výstupu	digitální (Aosong 1-wire)	digitální (Aosong 1-wire)	digitální (Data + SCK)	digitální (Data + SCK)	digitální (Data + SCK)
Cena ²	75 Kč	199 Kč	487 Kč	917 Kč	762 Kč

1 - přesnost měření relativní vlhkosti vzduchu v rozsahu 20 ÷ 95 % a 0 ÷ 100 %

2 - cena k 30.12.2014

Všechny senzory uvedené v tabulce jsou kombinované senzory pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Přesnost měření teploty u nich ale není tak dobrá, aby mohly plně nahradit specializované senzory pro měření teploty uvedené v kapitole 2.1.

Senzory od firmy *Sensirion* jsou mnohonásobně dražší a pro získání relativní vlhkosti vzduchu je nutné použít výpočtů s desetinnou čárkou. Naopak senzory od firmy *Aosong* poskytují výstup odpovídající přímo změřené veličině, a tak je zpracování a práce s naměřenou veličinou rychlejší a jednodušší. Navíc přesnost těchto senzorů je srovnatelná se senzory SHTXX.

Z těchto důvodů byl pro měření relativní vnitřní vlhkosti vzduchu vybrán senzor DHT11 [8]. Senzor poskytuje rozsah měření relativní vlhkosti vzduchu 20 ÷ 95 %, který je pro měření v interiéru dostačující. Pro měření venkovní relativní vlhkosti vzduchu byl vybrán senzor DHT22 [11] s lepší přesností a větším měřicím rozsahem.

3. Hardware

Navrhovaná meteostanice bude realizována pomocí přípravku *Digilent Nexys4*, který bude základní řídicí jednotkou meteostanice, senzorů ADT7420 a DHT11 pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu v interiéru a senzorů DS18B20 a DHT22 pro měření v exteriéru.

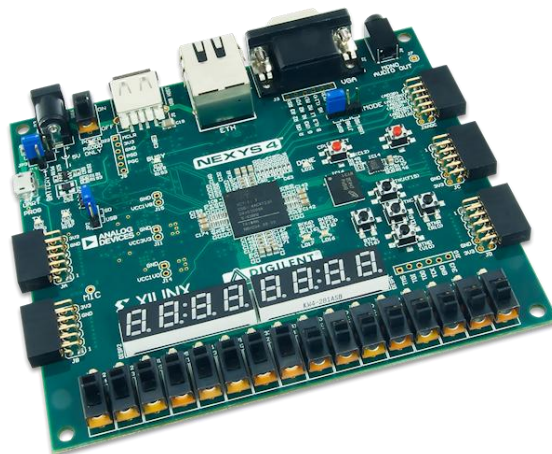
3.1. *Digilent Nexys4*

Přípravek *Nexys^{TM4} Artix-7 FPGA Board* od firmy *Digilent* (viz Obr. 3.1) je digitální vývojová platforma založená na hradlovém poli *Artix-7TM Field Programmable Gate Array* (FPGA) od firmy *Xilinx*.

Základním prvkem přípravku je FPGA hradlové pole *Artix-7* (XC7A100T-1CSG324C) optimalizovaný pro vysokorychlostní logiku, nabízející vyšší výkon a kapacitu než dřívější FPGA čipy od firmy *Xilinx*. Díky velkokapacitnímu programovatelnému hradlovému poli, velké externí paměti (128 Mbit) a množství portů (USB, Ethernet, VGA, PS/2, audio), může přípravek *Nexys4* pojmout různorodá zařízení od jednoduchých kombinačních obvodů až po výkonné vestavěné procesory. Dále přípravek obsahuje několik vestavěných periférií, včetně tlačítek, přepínačů, akcelerometru, senzoru teploty, MEMS digitálního mikrofону, reproduktoru, MicroSD slotu a několika vstupně-výstupních zařízení, které umožňují použít přípravek i bez použití dalších externích zařízení pro velké množství různých aplikací.

Nexys4 je kompatibilní s vývojovým prostředím *Vivado[®] Design Suite* a vývojovým prostředím *ISE[®] WebPACKTM*. Firma *Xilinx* nabízí volně stažitelnou verzi *ISE Design Suite*, která byla využita v této práci pro programování hradlového pole přípravku.

Přípravek *Nexys4* obsahuje novější FPGA čip s větší kapacitou, větší vnitřní pamětí a vyšším výkonem. Dále má více periférií a portů než starší přípravek *Nexys3*¹. [6, str. 1-2].



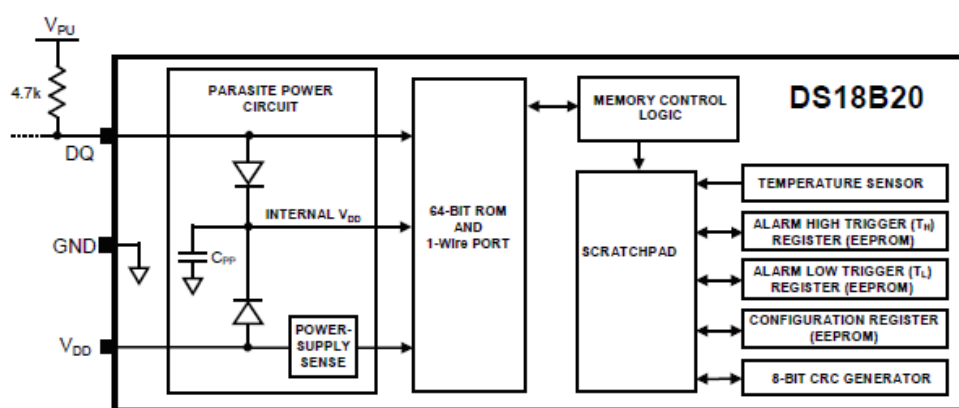
Obr. 3.1 - Přípravek *Nexys4* [6, str. 1]

¹ *Nexys3* - dokumentace dostupná z http://www.digilentinc.com/Data/Products/NEXYS3/Nexys3_rm_V2.pdf

3.2. Digitální teplotní senzor DS18B20

Pro měření venkovní teploty byl vybrán senzor DS18B20 od firmy *Maxim Integrated*. Tento teplotní senzor s digitální jednovodičovou sběrnici *1-wire*² poskytuje až dvanácti bitové rozlišení měřené teploty v rozsahu od -55 °C do +125 °C s přesností $\pm 0,5$ °C v rozsahu teplot od -10 °C do 85 °C. V rozsahu od -55 °C do +125 °C pracuje senzor s přesností ± 2 °C.

Senzor je možné napájet přímo přes datovou sběrnici DQ (tzv. parazitní napájení) nebo externím napájením V_{DD} v rozsahu 3,0-5,5 V. Vnitřní struktura senzoru (viz Obr. 3.2) obsahuje obvod řídicí typ napájení senzoru, paměť ROM, kde je uložen jedinečný 64-bitový kód použitý k adresování senzorů připojených na sběrnici. Dále senzor obsahuje ovládací obvod paměti a paměť (scratchpad). Ta obsahuje dva registry s digitálním výstupem teplotního senzoru, dva registry zálohované v EEPROM pro nastavení poplachu při překročení nastavené teploty, konfigurační registr pro nastavení rozlišení senzoru (zálohované v EEPROM) a poslední registr obsahuje CRC paměti scratchpad. [7, str. 1-3]



Obr. 3.2 - DS18B20 - blokové schéma - Figure 1. [7, str. 3]

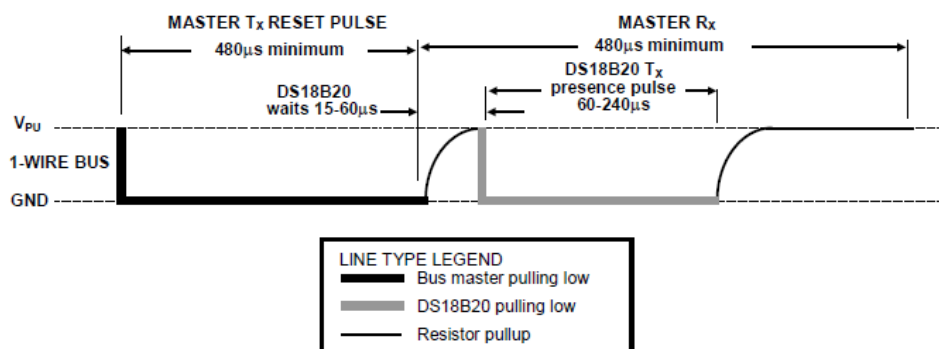
3.2.1. Komunikace se senzorem DS18B20

Senzor teploty DS18B20 je ovládán přes digitální jednovodičovou sběrnici *1-wire*, ke které musí být připojeno jedno řídicí zařízení typu Master (zde *Nexys4*) a jedno či více ovládaných zařízení typu Slave (senzor DS18B20).

Každé zařízení je paralelně připojeno ke sběrnici pomocí tří stavového portu DQ s externím pull-up rezistorem, takže sběrnice v nečinném stavu je v logické úrovni 1. To umožňuje každému zařízení nevysílajícího data uvolnit sběrnici přepnutím portu DQ do stavu vysoké impedance. Tím dojde k uvolnění sběrnice návratem do základního stavu, takže sběrnice může být využita jiným připojeným zařízením.

Komunikační protokol mezi zařízeními Master a Slave se skládá ze tří kroků. Prvním z nich je inicializace sběrnice zařízením Master pomocí resetovacího pulzu, tj. nastavení sběrnice do stavu logické 0 a poté uvolnění sběrnice. Díky pull-up odporu přejde sběrnice do stavu logické 1 a připojené zařízení detekuje tuto náběžnou hranu. Zařízení Slave odpoví nastavením sběrnice také do stavu logické 0. Tato inicializace probíhá v přesně stanovených časových intervalech, které jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 3.3).

² *1-wire*® je registrovaná obchodní značka firmy *Dallas Semiconductor* (nyní *Maxim Integrated*)

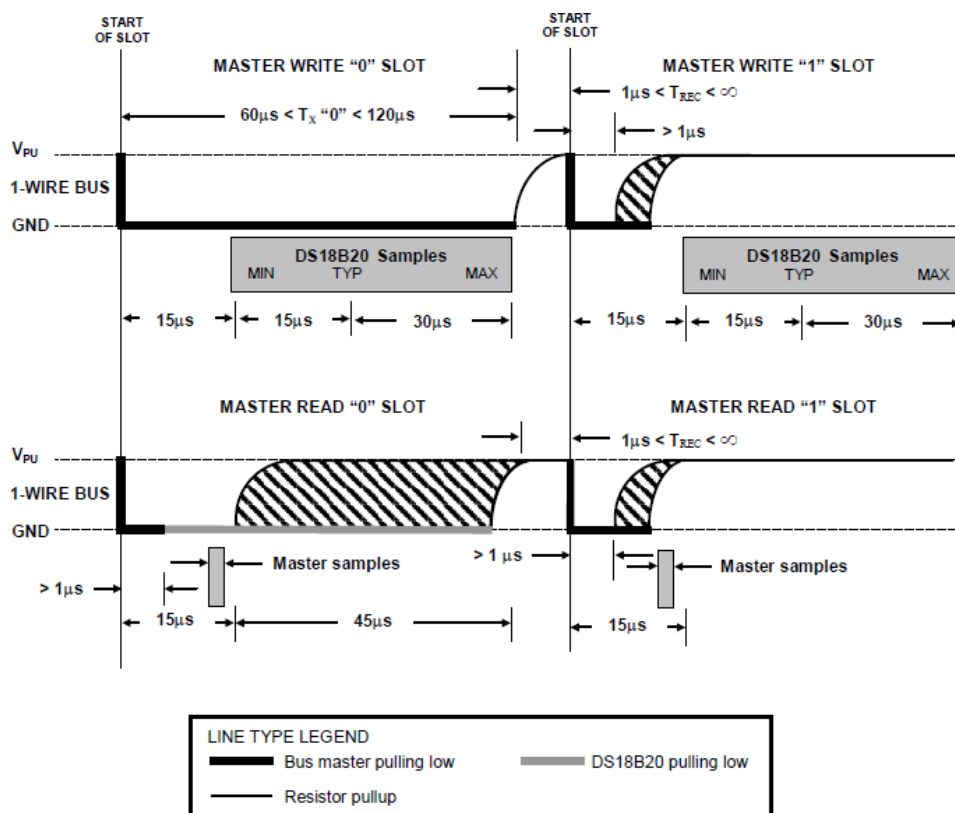


Obr. 3.3 - Inicializace senzoru DS18B20 - Figure 13. [7, str. 15]

V druhém kroku po detekování zařízení typu Slave musí Master zahájit komunikaci vysláním příkazu ROM. Tento příkaz slouží k adresaci určitého zařízení na sběrnici pomocí unikátního ROM kódu Slave zařízení, případně k adresaci všech zařízení na sběrnici.

Ve třetím kroku komunikace Master adresuje zařízení, se kterým chce komunikovat, pomocí funkčního příkazu. Tyto příkazy pro senzor DS18B20 umožňují například zapisovat a číst data uložené v paměti scratchpad, zahájit zápis naměřené teploty do registrů nebo změnit režim napájení senzoru.

U všech dat a příkazů je vždy první vyslán nejméně významný bit (LSB). Všechny vyslané příkazy a přijatá data mají přesně definovaný časový diagram tzv. time slot, kde může být zapsán nebo přečten jeden bit dat. Celkem jsou definovány čtyři time sloty: zápis logické 0, zápis logické 1, čtení logické 0 a čtení logické 1. Jednotlivé časové sloty pro zápis a čtení dat jsou přehledně znázorněny na Obr. 3.4. [7, str. 9-12, 15-17]



Obr. 3.4 - Čtení a zápis dat - DS18B20 - Figure 14. [7, str. 16]

3.3. Digitální kombinovaný senzor teploty a vlhkosti DHT11

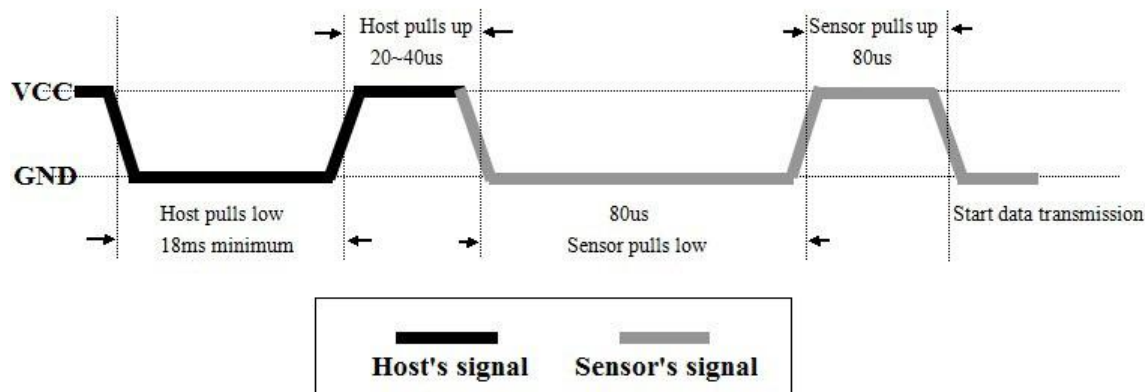
Pro měření vnitřní relativní vlhkosti vzduchu byl vybrán senzor DHT11 od firmy *Aosong Electronics Co., Ltd.*. Jedná se o kombinovaný senzor pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu s digitální jednovodičovou sběrnici *Aosong 1-wire bus*. Tato sběrnice je odlišná od sběrnice *1-wire* od firmy *Dallas Semiconductor* a není s ní kompatibilní. Senzor poskytuje osmibitové rozlišení teploty v rozsahu teplot od 0 do 50 °C s přesností ± 2 °C a osmibitové rozlišení relativní vlhkosti vzduchu v rozsahu od 20 do 90 % s přesností ± 5 %.

Každý senzor je teplotně kompenzován a kalibrován v přesné kalibrační komoře a kalibrační konstanty jsou uloženy v paměti senzoru. Tyto konstanty jsou poté využity při kalibraci signálu ze senzoru. Senzor je nutné napájet externím napětím 3,3-5 V. [8, str. 1]

3.3.1. Komunikace se senzorem DHT11

Senzor DHT 11 je ovládán přes digitální jednovodičovou sběrnici, ke které musí být připojeno jedno řídicí zařízení (Master) a jeden senzor DHT11 (Slave). Ovládání senzoru je velmi jednoduché a nevyžaduje tak složitý protokol komunikace jako senzor DS18B20. Jeho jednoduchost ale neumožňuje adresování více senzorů na jedné sběrnici.

Komunikace mezi řídicím zařízením a senzorem se skládá ze tří stavů. Prvním z nich je požadavek na zahájení komunikace řídicím zařízením (stav Request). Master vyšle inicializační pulz o délce minimálně 18 ms nastavením sběrnice do stavu logické 0 a poté uvolní sběrnici. Díky pull-up odporu přejde sběrnice do stavu logické 1. Zařízení Slave detekuje tuto náběžnou hranu a odpoví na tento požadavek nastavením sběrnice do stavu logické 0 na dobu 80 μ s a poté přechodem do stavu logické 1 také na 80 μ s (stav Presence). Tyto dva stavy jsou zobrazeny na Obr. 3.5.



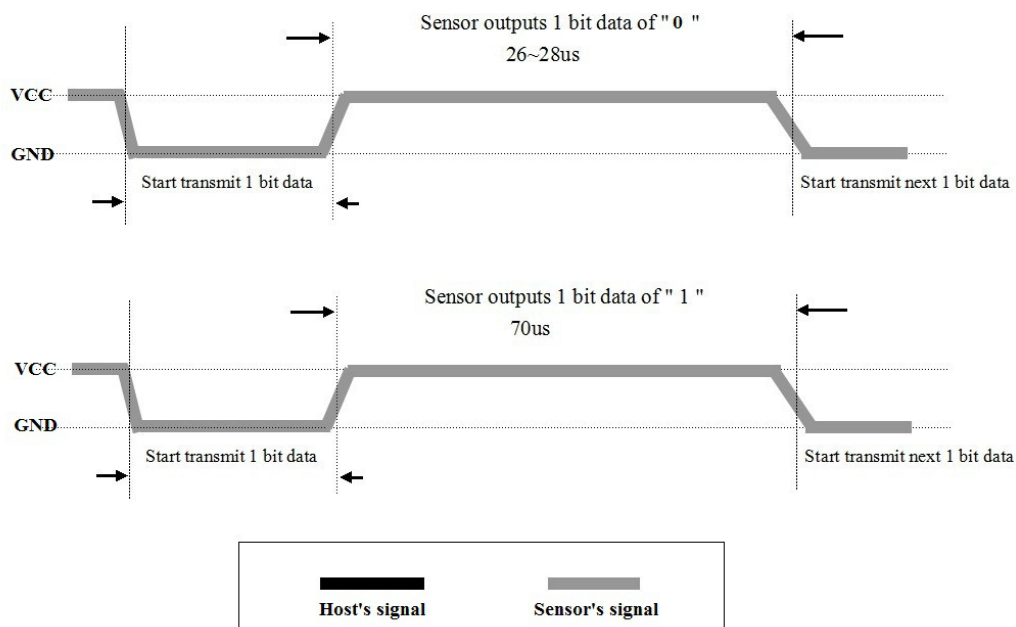
Obr. 3.5 - Inicializace senzoru DHT11 [8, str. 3]

Poslední stav komunikace je samotný přenos dat ze senzoru. Vyslaná data jsou uspořádána do pěti bajtů, celkem je tedy senzorem vysláno 40 bitů dat. První bajt obsahuje celočíselnou část hodnoty naměřené relativní vlhkosti, třetí celočíselnou hodnotu naměřené teploty. Druhý a čtvrtý bajt jsou u tohoto senzoru nulové. Poslední bajt obsahuje kontrolní součet prvních čtyřech bajtů, který může Master využít ke kontrole správnosti přijatých dat.

Tab. 3.1 - Struktura dat ze senzoru DHT11

1. bajt	2. bajt	3. bajt	4. bajt	5. bajt
rel. vlhkost vzduchu	00000000	teplota vzduchu	00000000	kontrolní součet

Každý bit dat vyslaný senzorem začíná přechodem do stavu logické 0 na $50\ \mu\text{s}$ a poté pokračuje přechodem do stavu logické 1 na dobu, která určuje logickou úroveň vyslaného bitu. Kratší impulz ($26\text{--}30\ \mu\text{s}$) odpovídá úrovni logické 0, delší impulz ($70\ \mu\text{s}$) odpovídá úrovni logické 1. (viz Obr. 3.6). [8, str. 2-4]

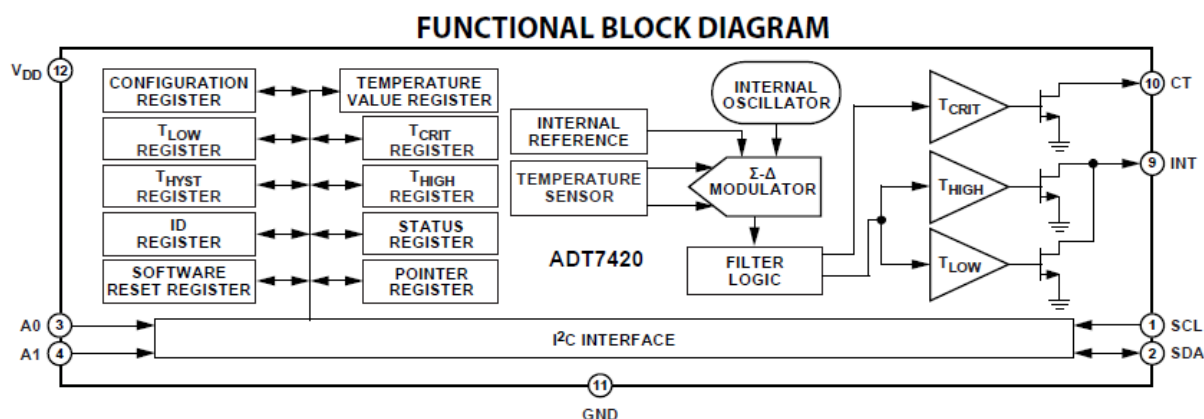


Obr. 3.6 - Časová struktura dat vyslaných senzorem DHT11 [8, str. 4]

3.4. Digitální teplotní senzor ADT7420

K měření vnitřní teploty byl použit integrovaný senzor ADT7420 od firmy *Analog Devices*. Tento digitální senzor teploty poskytuje až šestnácti bitové rozlišení měřené teploty v rozsahu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností $\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozsahu teplot od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ při napájení od 2,7 V do 3,3 V. Senzor používá ke komunikaci sériovou sběrnici využívající protokolu I²C³ [10].

Senzor musí být napájen externím napájením V_{DD} 2,7-5,5 V. Senzor obsahuje rozhraní sběrnice I²C, senzor teploty, Σ - Δ modulátor zpracovávající signál ze senzoru teploty a vnitřní napěťové reference, interní oscilátor, logiku pro ovládání výstupů INT a CT a čtrnáct registrů. Blokové schéma senzoru je uvedeno na Obr. 3.7. [9, str. 1, 10]



Obr. 3.7 - ADT7420 -Blokový diagram - Figure 1. [9, str. 1]

3.4.1. Komunikace se senzorem ADT7420

Senzor ADT7420 je ovládán pomocí sběrnice kompatibilní s protokolem I²C. Využívá se zde dvou obousměrných vodičů. Prvním z nich je hodinový signál SCL a druhý datový signál SDA. Oba vodiče jsou připojeny pomocí tří stavového portu s externím pull-up rezistorem, takže sběrnice je v nečinném stavu v logické úrovni 1.

Tato sběrnice umožňuje připojení více zařízení typu Master a umožňuje adresovat Slave zařízení pomocí 7, 8 nebo 10 bitové adresy. U senzoru ADT7420 je využita sedmibitová adresa a prvních 5 bitů adresy je nastaveno hardwarově, proto je možné adresovat maximálně čtyři senzory. [9, str. 17] V případě přípravku *Nexys4* je připojen pouze jeden senzor s adresou 4B_h [6, str. 22]

Komunikaci se senzorem zahajuje Master vysláním zahajovacího stavu (*start condition*), který je definován jako sestupná hrana na SDA v době, kdy je SCL ve stavu logické 1. Komunikace je ukončena vysláním stop stavu (*stop condition*), který je definován jako vzestupná hrana na SDA v době, kdy je SCL ve stavu logické 1.

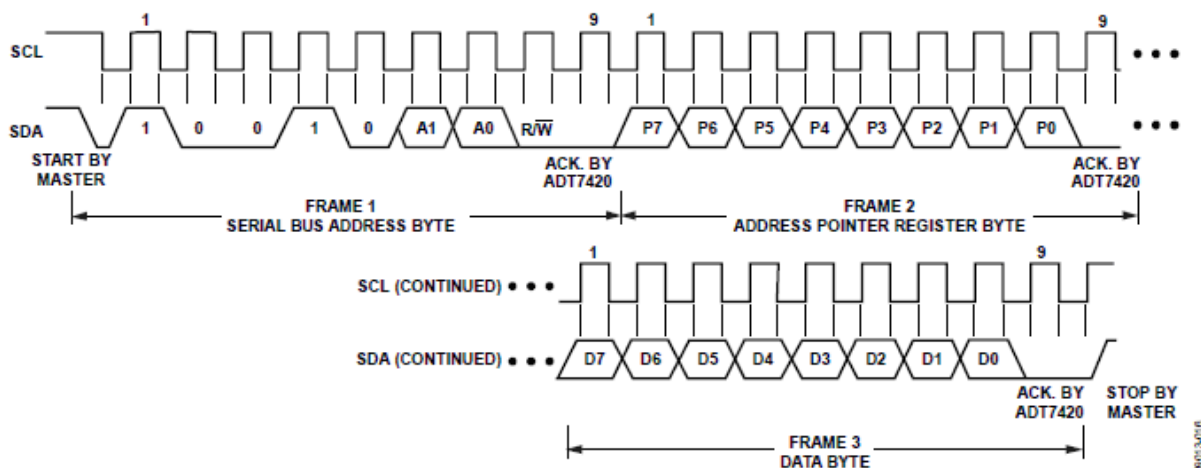
Po vyslání zahajovacího stavu následuje vyslání adresy Slave zařízení a příznaku čtení/zápisu (R/W bit), a poté následují přijímané nebo odesílané datové bajty. Každý přenos musí příjemce dat potvrdit pomocí vyslání ACK bitu, tj. vysílací zařízení uvolní SDA a příjemce nastaví SDA do stavu logické 0. Pokud není přenos dat potvrzen, jsou přenášená data považována za neplatná. Případná další zařízení připojená na sběrnici, která mají jinou adresu, zůstávají během této komunikace adresovaného zařízení v klidu.

³ I²C je komunikační protokol vytvořený Philips Semiconductors (nyní NXP Semiconductors).

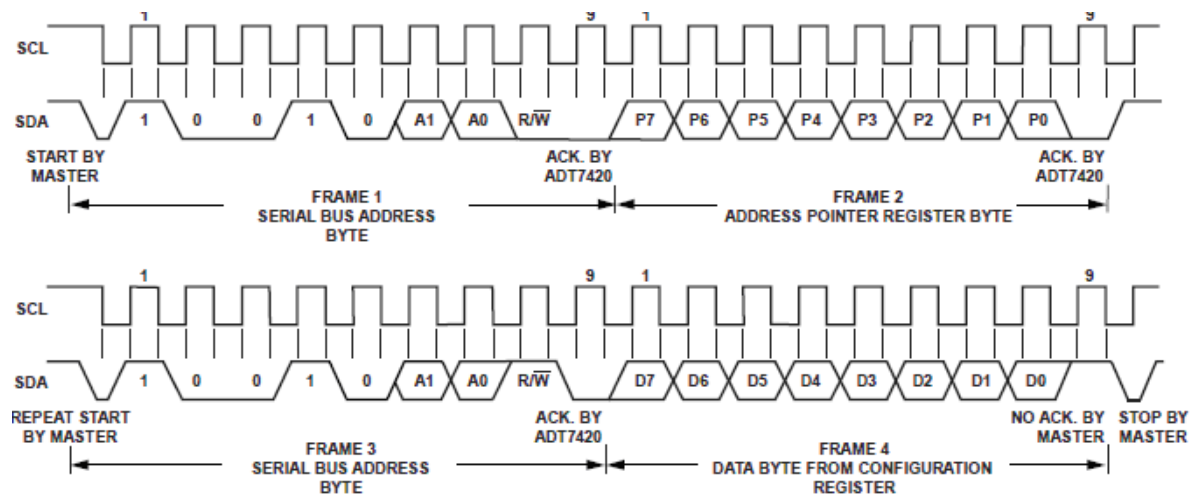
Data jsou odesílána na sběrnici jako sekvence devíti pulzů, kde osm pulzů obsahuje data a devátý pulz je ACK bit vyslaný příjemcem dat. Přechod mezi logickými stavy na SDA musí proběhnout během doby, kdy je SCL ve stavu logické 0 a musí zůstat neměnný, kdy je SCL ve stavu logické 1, jinak dojde k chybnému vyslání stop nebo start stavu a chybě komunikace. Některé registry senzoru jsou složeny ze dvou osmi bitových registrů a je možné do nich zapisovat a číst z nich během jedné transakce. Čtení lze po přečtení první poloviny takového registru přerušit vyslání NACK bitu.

Poté, co byla všechna data poslána nebo přečtena, je nutné ukončit komunikaci vysláním STOP bitu (*stop condition*). [9, str. 17-19]

Celé časové diagramy potřebné pro čtení a zápis dat jsou uvedeny na Obr. 3.8 a Obr. 3.9



Obr. 3.8 - Časový diagram zápisu do registru senzoru ADT7420 - Figure 14. [9, str. 18]



Obr. 3.9 - Časový diagram čtení z registru senzoru ADT7420 - Figure 16. [9, str. 19]

3.5. Kombinovaný digitální senzor vlhkosti a teploty DHT22

Pro měření venkovní relativní vlhkosti vzduchu byl vybrán senzor DHT22 (AM2302⁴) od firmy *Aosong Electronics Co., Ltd.* Jedná se o podobný senzor jako DHT11 uvedený v kapitole 3.3. Na rozdíl od tohoto senzoru má ale lepší měřicí parametry, větší rozměry a odlišnou interpretaci naměřených fyzikálních veličin v odesílaných datech.

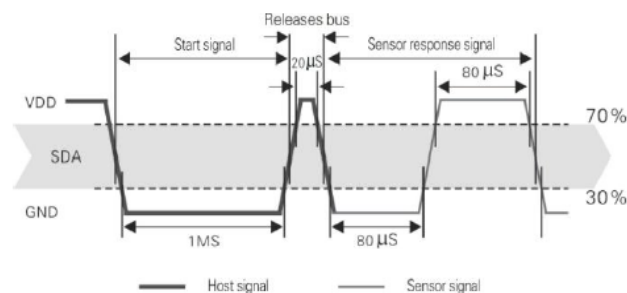
Jedná se o kombinovaný senzor pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu umožňující digitální komunikaci prostřednictvím jednovodičové sběrnice *Aosong 1-wire bus*. Senzor poskytuje šestnácti bitové rozlišení teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Rozsah měření teploty je $-40\div 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rozsah měření relativní vlhkosti je od $0\div 100\text{ }%$ s přesností $\pm 2\text{ }%$. Tento senzor je nutné napájet externím napětím 3,3-5 V. [11, str. 1-2]

3.5.1. Komunikace se senzorem DHT22

Senzor DHT22 je ovládán přes digitální jednovodičovou sběrnici, ke které musí být připojeno řídicí zařízení a jeden senzor DHT22. Komunikace se senzorem je velmi podobná komunikaci se senzorem DHT11 a také neumožňuje adresování více senzorů na jedné sběrnici.

Po zapnutí napájení senzoru je nutné počkat alespoň dvě sekundy, aby se senzor ustálil a správně reagoval na vysílané instrukce. Po této době lze zahájit komunikaci mezi řídicím zařízením a senzorem, která se skládá ze tří stavů. Prvním z nich je požadavek na zahájení komunikace řídicím zařízením (stav Request). Řídicí zařízení vyše inicializační pulz nastavením sběrnice do stavu logické 0 na dobu minimálně $800\text{ }\mu\text{s}$ a poté uvolní sběrnici. Díky pull-up odporu přejde sběrnice do stavu logické 1. Senzor odpoví na tento pulz vysláním odpovědi nastavením sběrnice do stavu logické 0 na dobu $80\text{ }\mu\text{s}$ a poté přechodem do stavu logické 1 také na $80\text{ }\mu\text{s}$ (stav Presence).

Tyto dva stavy jsou zobrazeny na Obr. 3.10.



Obr. 3.10 - Inicializace senzoru DHT22 [11, str. 7]

Po inicializaci následuje přenos dat ze senzoru. Vyslaná data jsou uspořádána do pěti bajtů, celkem je tedy senzorem vysláno 40 bitů dat. U každého bajtu je první vyslán MSB. První a druhý bajt obsahuje naměřenou relativní vlhkost, třetí a čtvrtý bajt obsahuje naměřenou teplotu a pátý bajt obsahuje kontrolní součet prvních čtyř bajtů dat.

Každý bit dat vyslaný senzorem začíná přechodem do stavu logické 0 typicky na $50\text{ }\mu\text{s}$ a poté pokračuje přechodem do stavu logické 1 na dobu, která určuje logickou úroveň vyslaného bitu. Kratší impulz ($22\text{-}30\text{ }\mu\text{s}$) odpovídá úrovni logické 0, delší impulz ($68\text{-}75\text{ }\mu\text{s}$) odpovídá úrovni logické 1. (viz [11, str. 6 - Pic 6, Table 6])

⁴ -jiné označení stejného senzoru

PRAKTICKÁ ČÁST

4. Software

Při návrhu programu pro meteostanici bylo využito vývojové prostředí *ISE Design Suite 14.6* a *14.7* od firmy *Xilinx*. Kód zajišťující funkci meteorologické stanice je napsán v jazyce VHDL a je určen pro přípravek *Digilent Nexys4*. Celý program je rozdělen do několika zdrojových souborů popisujících jednotlivé moduly meteostanice pro větší přehlednost a možnost jednoduššího vylepšení nebo přidávání dalších funkcí meteostanice.

Software pro zpracování odesílaných dat z meteostanice v počítači je napsán v programovacím jazyce *Java* s využitím knihovny *java-simple-serial-connector* (jSSC) [13].

4.1. Meteorologická stanice

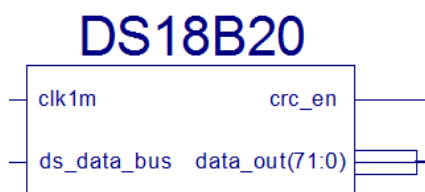
Program v jazyce VHDL zajišťující funkci meteorologické stanice se skládá z třinácti modulů popsanych v následujících zdrojových souborech:

- DS18B20.vhd,
- DHT11.vhd,
- DHT22.vhd,
- ADT7420.vhd,
- temp_conv.vhd,
- humidity_conv.vhd,
- humidity_conv2.vhd,
- temp_conv2.vhd,
- divider.vhd,
- divider1MHz.vhd,
- CRC.vhd,
- transmitter.vhd,
- display.vhd.

Každý z uvedených souborů definuje funkci jednoho z níže uvedených modulů, jejichž význam a funkce je popsána v následujících podkapitolách. Celé blokové schéma meteostanice v souboru *schematic.sch* je uvedeno v Příloha 1.

4.1.1. Modul DS18B20

Komunikace se senzorem DS18B20 je zajištěna pomocí modulu *DS18B20*, jehož funkci zajišťuje zdrojový soubor *DS18B20.vhd*. Tento modul je synchronně spouštěn náběžnou hranou signálu o periodě 1 μ s (vstupní port *clk1m*). Dále modul obsahuje vstupně-výstupní port *ds_data_bus* zajišťující obousměrnou komunikaci se senzorem. Datovým výstupem modulu je 72-bitový signál obsahující údaje přečtené z paměti scratchpad, přivedený na port *data_out(71:0)*. Posledním výstupním portem je *crc_en* spouštějící výpočet CRC přijatých dat v následujícím modulu *CRC* (kapitola 4.1.5).



Obr. 4.1 - Modul *DS18B20*

Stavový diagram komunikace se senzorem se skládá z pěti stavů: *WAIT_800ms*, *RESET*, *PRESENCE*, *SEND* a *GET_DATA*. Dále z pomocných stavů *WRITE_BYTE*, *WRITE_LOW*, *WRITE_HIGH*, *READ_BIT*. Tyto stavy odpovídají stavům FSM ve zdrojovém kódu programu. Stavový diagram tohoto modulu je uveden na konci této podkapitoly na Obr. 4.2.

První stav, ve kterém se nachází tento modul po nahrání kódu do přípravku, je stav *WAIT_800ms*, který zajišťuje správnou inicializaci senzoru po připojení napájení, zajišťuje rozestup 800 ms mezi každým měřením a je využit pro čekání po zahájení měření.

Stav *RESET* zajišťuje spolu s následujícím stavem *PRESENCE* inicializaci senzoru. Ta je provedena uvedením sběrnice na 485 μ s do stavu logické 0 a poté uvolněním sběrnice (viz Obr. 3.3).

Ve stavu *PRESENCE* je zkontrolováno, zda senzor správně odpověděl na přítomnost impulzu generovaného ve stavu *REQUEST* pomocí ověření logické 0 na sběrnici po 550 μ s od zahájení tohoto impulzu. Pokud při kontrole stavu sběrnice nedojde k detekci senzoru, dojde k přeskočení až do stavu *WAIT_800ms* spolu s nastavením výstupu ze senzoru tak, aby odpovídající nastavená výstupní data, která jsou dále zpracována modulem *CRC*, neměla správný kontrolní součet, čímž je detekována chyba komunikace se senzorem. V případě správné funkce a tedy detekce senzoru na sběrnici, dojde k přechodu do stavu *SEND*.

Ve stavu *SEND* jsou vysílány instrukce senzoru : příkaz ROM nebo funkční příkaz. Je zde vytvořena sekvence, která zajišťuje naměření teploty z jednoho senzoru připojeného ke sběrnici. Posloupnost vyslaných příkazů je následující:

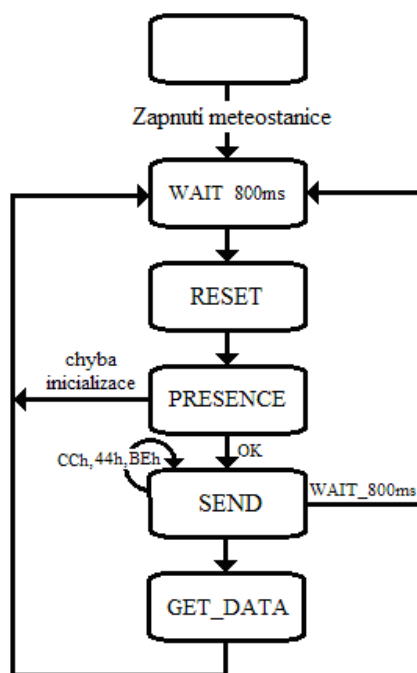
Skip ROM – Přeskoč ROM (CCh) - adresování všech senzorů na sběrnici.

Convert T – Převod teploty (44h) - zahájení převodu teploty do registru paměti scratchpad. Do ukončení převodu nemůže být sběrnice využívána. Pro dvanácti bitové rozlišení teploty je doba převodu typicky 750 ms. Z tohoto důvodu je po vykonání tohoto příkazu proveden návrat do stavu *WAIT_800ms*. Poté je nutné dle komunikačního protokolu 1-wire sběrnice opakovat inicializační sekvenci senzoru a znovu vyslat příkaz SKIP ROM.

Read scratchpad – Čti scratchpad (BEh) - tento příkaz slouží k přečtení obsahu paměti scratchpad. Data jsou vyslána po tomto příkazu od LSB nultého bajtu až po MSB osmého bajtu (CRC). [7, str. 10-12]

V programu slouží k vyslání příkazů pomocné stavy `WRITE_BYTE`, `WRITE_LOW` a `WRITE_HIGH`. V těchto stavech jsou definována časová okna jednotlivých logických úrovní podle jejich definice v komunikačním protokolu sběrnice *1-wire* (Obr. 3.4).

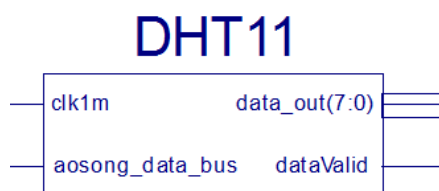
Po vyslání celé této sekvence příkazů je zahájen příjem dat ze senzoru ve stavu `GET_DATA`. K přijetí dat je využit pomocný stav `READ_BIT`, který je volán v tomto stavu. V něm je odebrán vzorek impulzu odeslaný senzorem, podle něhož je určena logická hodnota právě přijímaného bitu. Po příjmu 72 bitů jsou data odeslána na výstupní port tohoto modulu. Spolu s tím je signálu `crc_en` nastavena logická úroveň 1, která způsobí zahájení funkce modulu `CRC`, který kontroluje přijatá data. Modul se poté vrací do stavu `WAIT_800ms`.



Obr. 4.2 - Stavový diagram modulu DS18B20

4.1.2. Modul DHT11

Komunikace a obsluha senzoru DHT11 je zprostředkována pomocí modulu *DHT11*, jehož funkci zajišťuje kód ve zdrojovém souboru *DHT11.vhd*. Tento modul je synchronně spouštěn náběžnou hranou signálu o periodě $1\ \mu\text{s}$ (vstup *clk1m*). Dále modul obsahuje vstupně-výstupní port *aosong_data_bus*, které zajišťuje obousměrnou komunikaci se senzorem. Výstupem modulu je osmibitový port *data_out(7:0)* obsahující údaj s naměřenou relativní vlhkostí vzduchu, případně obsahující data vyjadřující chybový stav senzoru. Posledním výstupním portem je *dataValid* spouštějící převod dat pro další zpracování v následujícím modulu *humidity_conv*.



Obr. 4.3 - Modul DHT11

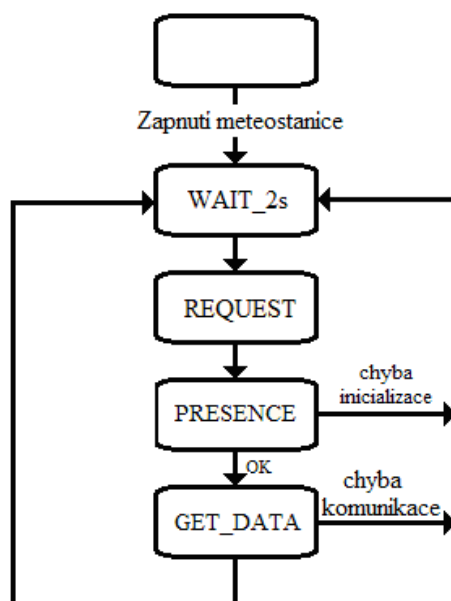
Stavový diagram komunikace se skládá ze čtyř hlavních stavů: WAIT_2S, REQUEST, PRESENCE a GET_DATA a pomocného stavu READ_BIT. Těmto stavům také odpovídají stavy FSM v kódu programu. Stavový diagram je uveden na konci této kapitoly na Obr. 4.4.

Prvním stavem FSM je WAIT_2S zajišťující správnou inicializaci senzoru po připojení napájení, jak je doporučeno výrobcem senzoru [8, str. 2], a dále zajišťuje rozestup 2 s mezi každým měřením.

Druhý stav REQUEST slouží k inicializaci senzoru pomocí 18,04 ms dlouhého impulsu na sběrnici vyslaného k senzoru přípravkem *Nexys4* podle specifikací, které jsou uvedeny na Obr. 3.5 v kapitole 3.3.1.

Ve třetím stavu PRESENCE je zkontrolována přítomnost senzoru pomocí kontroly stavu sběrnice zjištěním úrovně na sběrnici v časech 40 μ s a 120 μ s po vyslání inicializačního impulsu. Tyto časové intervaly odpovídají polovině trvání jednotlivých úrovní generovaných senzorem (viz Obr. 3.5 v kapitole 3.3.1). Pokud při kontrole stavu sběrnice není detekován senzor, dojde k návratu do stavu WAIT_2S a po 2 s následuje další pokus o navázání komunikace. Výstup senzoru je v tomto případě nastaven na hodnotu odpovídající chybové hodnotě, která je dále zpracována následujícím modulem. Tato hodnota je volena tak, aby nemohl senzor při správné funkci generovat stejnou posloupnost dat, která by mohla být vyhodnocena jako tato chyba komunikace se senzorem. V případě detekce senzoru na sběrnici dojde k přechodu do dalšího stavu GET_DATA.

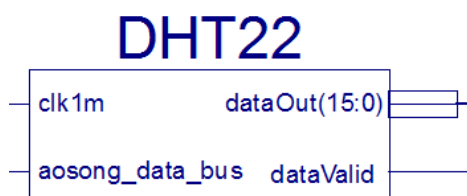
Čtvrtý stav GET_DATA zajišťuje příjem a kontrolu dat ze senzoru. K tomu je využit pomocný stav READ_BIT, který je volán v tomto stavu. V něm je měřena délka impulsu odeslaného senzorem, podle níž je určena logická hodnota právě přijímaného bitu. Pokud dojde během tohoto stavu k chybě při komunikaci senzorem, ať už vlivem odpojení senzoru nebo k nesprávnému příjmu dat, dojde zde podobně jako ve stavu PRESENCE k návratu do stavu WAIT_2S. Po příjmu 40 bitů je zde proveden jejich kontrolní součet, který je zkontrolován s přijatým kontrolním součtem obdržaným ze senzoru. Pokud je tento kontrolní součet shodný, jsou data obsahující informaci o naměřené hodnotě relativní vlhkosti vzduchu odeslána na výstupní port tohoto modulu. V opačném případě je na výstup vyslána chybová hodnota podobně jako při chybě komunikace ve stavu PRESENCE.



Obr. 4.4 - Stavový diagram modulu *DHT11*

4.1.3. Modul DHT22

Komunikace se senzorem DHT22 je realizována pomocí modulu DHT22. Funkci tohoto modulu zajišťuje kód umístěný v souboru *DHT22.vhd*. Tento modul je synchronně spouštěn náběžnou hranou signálu o periodě 1 μ s (vstup *clk1m*). Dále modul obsahuje vstupně-výstupní port *aosong_data_bus*, zajišťující obousměrnou komunikaci se senzorem. Výstupem je šestnácti bitový port *data_out(15:0)* obsahující údaj o naměřené relativní vlhkosti vzduchu, případně chybový stav senzoru. Posledním výstupním portem je *dataValid* spouštějící převod dat pro další zpracování v následujícím modulu *humidity_conv2*.

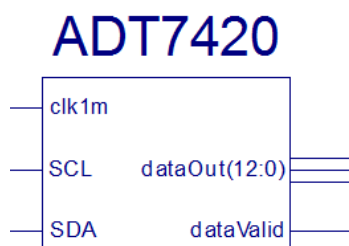


Obr. 4.5 - Modul DHT22

Komunikace se s tímto senzorem je téměř totožná, jako u senzoru DHT11. Liší se pouze obsahem odesílaných bajtů obsahujících naměřenou relativní vlhkost a výpočtem kontrolního součtu. Stavový diagram a funkce jsou stejné jako u modulu *DHT11* a jsou uvedeny v kapitole 4.1.2.

4.1.4. Modul ADT7420

Komunikace se senzorem teploty ADT7420, který je umístěn přímo na přípravku *Digilent Nexys4*, je zajištěna modulem *ADT7420*. Funkci modulu zajišťuje kód umístěný v souboru *ADT7420.vhd*. Tento modul je synchronně spouštěn náběžnou hranou signálu s periodou 1 μ s (vstup *clk1m*). Modul obsahuje dva vstupně-výstupní porty *SCL* a *SDA*, které umožňují komunikaci se senzorem. Výstupem je třinácti bitový port *dataOut(12:0)* obsahující údaj s naměřenou teplotou. Posledním výstupním portem je port *dataValid* spouštějící převod dat pro další zpracování v následujícím modulu *temp_conv2*.



Obr. 4.6 - Modul ADT7420

Stavový diagram komunikace se skládá z devíti stavů: IDLE, START, COMMAND, SLAVE_ACK1, WR, RD, SLAVE_ACK2, MASTER_ACK a STOP. Těmto stavům také odpovídají stavy v kódu programu. Stavový diagram je uveden na konci této kapitoly na Obr. 4.7.

Stav tohoto modulu je přepínán vzestupnou hranou pomocného signálu *data_clk*, který je vzhledem k signálu *SCL* posunut o čtvrtinu periody. Sestupná hrana tohoto signálu slouží ke zjištění potvrzení a ke čtení dat ze senzoru.

Stav IDLE, ve kterém se nachází tento modul po zapnutí přípravku, zajišťuje správnou inicializaci senzoru po připojení napájení a zajišťuje rozestup 1 s mezi každým měřením teploty. Po uplynutí 1 s přejde modul do stavu START.

Ve stavu START je zahájena komunikace sestupnou hranou na portu SDA v době, kdy je SCL ve stavu logické 0, čímž je generována start podmínka sběrnice I²C. Dále je zahájeno generování signálu SCL o periodě 10 kHz a modul přechází do stavu COMMAND.

V tomto stavu je vyslána adresa senzoru a příznak čtení/zápis (R/W) pro následující transakci. V první části průchodu stavového automatu je příznak R/W nastaven na zápis a je vysláno sedm bitů adresy a příznak. Poté dojde k přechodu do stavu SLAVE_ACK1.

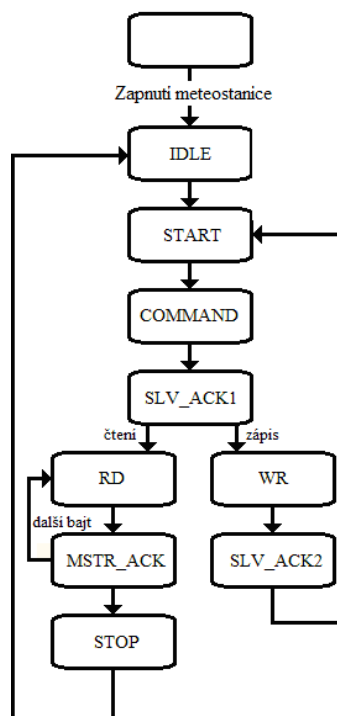
Ve stavu SLAVE_ACK1 je zjištěno potvrzení příjmu adresy a příznaku R/W senzorem. Dochází zde také k větvení běhu programu přechodem do stavu pro zápis dat nebo stavu pro čtení dat. Při prvním průchodu dojde k přechodu do stavu pro zápis WR, poté již program, až do opětovného návratu do stavu IDLE, při průchodu tímto stavem přechází do větve RD.

Stav WR zajišťuje vyslání adresy registru, ze které budou přečtena data ve stavu RD. Tato adresa je nastavena na hodnotu adresy registru 00h, ve kterém je uložen první bajt naměřené teploty.

Následující stav SLAVE_ACK2 slouží k zjištění potvrzení zapsaných dat senzorem, nastavení příznaku pro čtení dat a přechod zpět do stavu START. Znovu je zahájena komunikace a dojde k průchodu stavu START, COMMAND a SLAVE_ACK1. Ve stavu SLAVE_ACK1 dojde k přechodu do stavu RD, díky nastavení příznaku pro čtení dat.

Ve stavu RD je nejprve přečten první bajt dat ze senzoru, následuje potvrzení přijatých dat vysláním logické 1 na portu SDA ve stavu MASTER_ACK. Poté je ve stavu RD přečten druhý bajt z následující adresy - 01h. Poté je ve stavu MASTER_ACK vygenerován NACK, čímž je senzoru signalizován konec čtení dat.

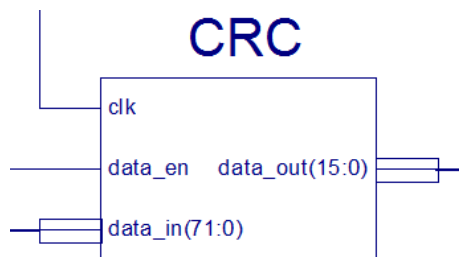
V posledním stavu STOP je ukončena komunikace se senzorem generováním stop podmínky a modul je navrácen do výchozího stavu IDLE, kde setrvává po dobu 1 s. Pokud v průběhu komunikace nedošlo k potvrzení správného příjmu dat senzorem, jsou na výstupu modulu generována data indikující chybu komunikace. V případě správného příjmu jsou použita přijatá data ze senzoru obsahující naměřenou teplotu.



Obr. 4.7 - Stavový diagram modulu ADT7420

4.1.5. Modul CRC

Kontrola přijatých dat ze senzoru DS18B20 je provedena v modulu *CRC*, jehož funkci zajišťuje kód ve zdrojovém souboru *CRC.vhd*. Tento modul je synchronně spouštěn náběžnou hranou signálu o periodě 1 μ s (vstup *clk*) při současném nastavení vstupu *data_en* do logické úrovně 1. To zajišťuje modul *DS18B20* (viz kapitola 4.1.1). Dále modul obsahuje vstupní port *data_in(71:0)*, které umožňuje přijetí vstupních dat z modulu *DS18B20*. Výstupem je šestnáctibitový signál na portu *data_out(15:0)* obsahující údaj s naměřenou teplotou, případně s chybovým stavem senzoru.



Obr. 4.8 - Modul *CRC*

Tento modul kontroluje CRC obdržené v devátém bajtu dat z modulu *DS18B20* s hodnotou vypočítanou ze zbývajících osmi bajtů obdržených dat.

Cyklický redundantní součet použitý senzorem je udán ekvivalentní polynomem, který je zapsán vztahem (1) a jeho implementace pomocí LFSR je uvedena na Obr. 4.9.

$$CRC = x^8 + x^5 + x^4 + 1 \quad (1)$$

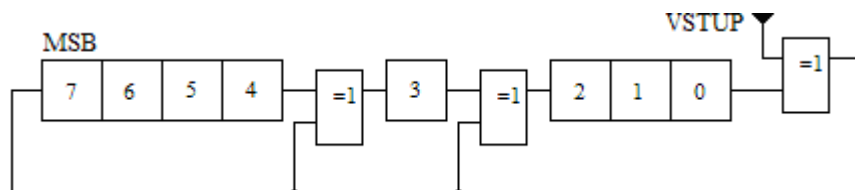
Postup výpočtu CRC realizovaný v tomto modulu je založen na principu lineárního posuvného registru, který má ve své zpětné vazbě hradla XOR. Po příchodu vzestupné hrany na portu *data_en* dochází k zahájení cyklického výpočtu CRC s každým taktem vstupu *clk*. Po 72 taktech je výpočet ukončen a vnitřní stav registru je zkontrolován.

Protože posledních 8 bitů, které jsou vloženy do posuvného registru, obsahuje vypočítané CRC předchozích dat, musí být při přenosu dat bez chyb CRC celé této sekvence nulové. To indikuje pravděpodobnou integritu přijatých dat [12, str. 4]. V tomto případě je na výstupu modulu použito 15 bitů vstupních dat obsahující teplotu naměřenou senzorem DS18B20. V případě, že po výpočtu CRC není obsah registru nulový a došlo tedy k chybě v přenosu, je na výstupu modulu generovaná hodnota, která je dále vyhodnocena jako chyba přenosu.

Výrobce uvádí, že *1-Wire CRC* detekuje tyto typy chyb [12, str. 3]:

- jakýkoliv lichý počet chyb kdekoli v 64 bitovém rámci,
- všechny dvoubitové bitové chyby kdekoli v 64 bitovém rámci,
- jakýkoliv shluk chyb, které mohou být obsaženy v rámci osmibitového "okna",
- většinu větších shlukových chyb.

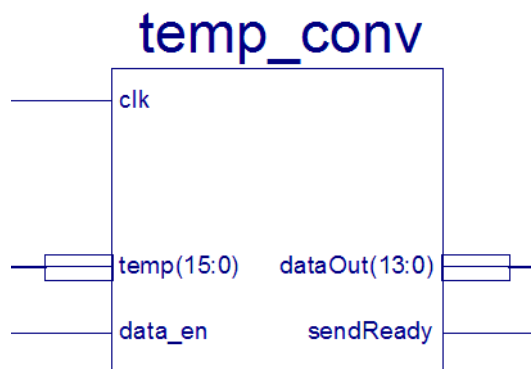
Z provedení posuvného registru na Obr. 4.9 je zřejmé, že konečný výsledek CRC je závislý na struktuře celé bitové posloupnosti. Z tohoto důvodu by musela být posloupnost obdržených bitů velmi specifická, aby došlo k nedetekování chyby v přenosu dat.



Obr. 4.9 - LFSR generátor CRC pro 1-wire

4.1.6. Modul *temp_conv*

Tento modul dekóduje hodnotu získanou z registru paměti scratchpad senzoru DS18B20 zkontrolovanou modulem *CRC*, případně obdrženy chybový kód, přijatý na portu *temp(15:0)*. Dekódování je spouštěno synchronně náběžnou hranou signálu o periodě 1 μ s (vstup *clk*) při nastavení vstupu *data_en* do logické úrovně 1. Dekódovaná hodnota je přivedena na čtrnácti bitový výstup *dataOut(13:0)*. Poslední výstupní port je *sendReady* spouštějící vysílání dat následujícím modulem *transmitter* po ukončení převodu.



Obr. 4.10 - Modul *temp_conv*

Funkce modulu je zajištěná konečným stavovým automatem se stavy IDLE, TEMP_CALC_PLUS, TEMP_CALC_MINUS, ERROR_CHECK a SEND_DATA.

Po příjmu nových dat na vstupním portu *temp* jsou nejprve data zkontrolována ve stavu ERROR_CHECK. Pokud došlo v předchozích blocích k chybě přenosu, nebo se u dat objevila chyba CRC, jsou na výstupní port generována data s odpovídající strukturou pro jednotlivý typ chyby (viz Tab. 4.1 a Tab. 4.2) a dojde k odeslání dat ve stavu SEND_DATA.

Při správné funkci jsou vstupními daty na portu *temp* dva bajty paměti scratchpad senzoru DS18B20. Význam jednotlivých bitů pro dvanáctibitové rozlišení udává následující obrázek.

BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0
2^3	2^2	2^1	2^0	2^1	2^2	2^3	2^4
BIT 15	BIT 14	BIT 13	BIT 12	BIT 11	BIT 10	BIT 9	BIT 8
S	S	S	S	S	2^6	2^5	2^4

Obr. 4.11 - Význam 0. a 1. bajtu paměti scratchpad senzoru DS18B20 - Figure 2. [7, str. 4]

Bit č. 0 má tedy nejnižší odpovídající hodnotu teploty 0,0625 $^{\circ}$ C (2^4), bit č. 10 udává hodnotu teplotě 64 $^{\circ}$ C (2^6) a bity č. 11-15 určují znaménko teploty (0 = kladná, 1 = záporná). Pokud je teplota kladná je nutné pouze dekódovat obsah registru na dekadickou hodnotu. V případě záporné teploty je zde odlišnost ve vyjádření teploty, která je navíc zakódovaná ve dvojkovém doplňku. Proto je jí nutné nejprve převést na binární hodnotu a poté na dekadickou, což je realizováno ve stavu ERROR_CHECK.

Po převodu na dekadickou hodnotu teploty je ve stavu TEMP_CALC_PLUS nebo TEMP_CALC_MINUS celá část teploty pomocí operací modulo 10 a modulo 100 rozdělena na jednotlivé cifry. Rozlišení senzoru DS18B20 převyšuje možnosti zobrazení sedmsegmentového displeje, proto je desetinná část zaokrouhlena na jedno desetinné místo, což je vhodné i vzhledem k přesnosti senzoru.

Získaná dekadická hodnota teploty je porovnána s hodnotou 100 $^{\circ}$ C, případně -55 $^{\circ}$ C, a pokud dojde k překročení těchto hodnot, jsou na výstupní port generována data s odpovídající strukturou pro jednotlivý typ chyby. Pokud je teplota v intervalu -55÷100 $^{\circ}$ C,

obsahují generovaná data naměřenou teplotu. Jednotlivé cifry jsou kódovány v binárním formátu (viz Tab. 4.1 a Tab. 4.2).

Tab. 4.1 - Struktura výstupních dat modulu *temp_conv*

dataOut	13	12	11	8	7	4	3	0
kladná teplota	0	0	první cifra teploty		druhá cifra teploty		desetinná část teploty	
záporná teplota	0	1						
chyba	1	1	číslo chyby					

Tab. 4.2 - Význam jednotlivých čísel chyb modulu *temp_conv*

Číslo chyby	Popis chyby
000	chyba připojení senzoru
001	$T > T_{MAX}$ (100°C)
002	$T < T_{MIN}$ (-55 °C)
003	chyba CRC
004	chyba dat

V posledním stavu SEND_DATA jsou data odeslána na výstupní port *dataOut(13:0)* a na jeden takt *clk* je nastaven výstup *sendReady* na logickou úroveň 1. Posledním krokem je návrat modulu zpět do výchozího stavu IDLE, kde modul čeká na další platná data na vstupu.

4.1.7. Modul *temp_conv2*

Modul *temp_conv2* dekóduje hodnotu získanou z registrů s adresou 0x00h a 0x01h senzoru ADT7420, případně obdrženy chybový kód, přijatý na portu *temp(12:0)*. Dekódování je spouštěno synchronně náběžnou hranou signálu o periodě 1 μ s (vstup *clk*) při současném nastavení vstupu *data_en* do logické úrovně 1. Dekódovaná hodnota je přivedena na čtrnácti bitový výstup *dataOut(13:0)*. Poslední výstupní port je *sendReady* spouštějící vysílání dat následujícím modulem *transmitter* po ukončení převodu.



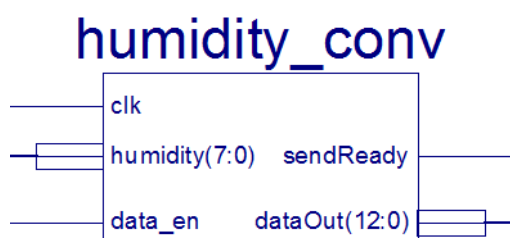
Obr. 4.12 - Modul *temp_conv2*

Funkce modulu je zajištěná konečným stavovým automatem se stavy IDLE, TEMP_CALC_PLUS, TEMP_CALC_MINUS, ERROR_CHECK a SEND_DATA.

Funkce tohoto modulu je téměř totožná, jako u modulu *temp_conv*. Liší se pouze velikostí vstupního portu *temp(12:0)*, kontrolou struktury vstupních dat ve stavu ERROR_CHECK a vynecháním chyby CRC, která u senzoru ADT7420 není použita. Stavový diagram a funkce jsou stejné jako u modulu *temp_conv* a jsou uvedeny v kapitole 4.1.6. Struktura výstupních dat je totožná jako u modulu *temp_conv* a je uvedena v Tab. 4.1.

4.1.8. Modul *humidity_conv*

Tento modul dekóduje data získané modulem *DHT11* ze senzoru, případně vyhodnocuje obdrženy chybový kód, přijatý na vstupním portu *humidity(7:0)*. Dekódování je spouštěno synchronně náběžnou hranou signálu o periodě 1 μ s (vstup *clk*) při současném nastavení vstupu *data_en* do logické úrovně 1. Dekódovaná hodnota je přivedena na výstup *dataOut(12:0)* a spolu s ním je nastaven výstupní port *sendReady* spouštějící vysílání dat následujícím modulem *transmitter*.



Obr. 4.13 - Modul *humidity_conv*

Funkce modulu je zajištěna jednoduchým konečným stavovým automatem se stavy *IDLE*, *HUMIDITY_CALC*, *ERROR_CHECK* a *SEND_DATA*.

Po příjmu nových dat na vstupním portu *humidity(7:0)* jsou nejprve data zkontrolována ve stavu *ERROR_CHECK*. Pokud došlo v předchozích blocích k chybě přenosu nebo u dat neodpovídá kontrolní součet, jsou na výstupní port generována data s odpovídající strukturou pro jednotlivý typ chyby (viz Tab. 4.4) a dojde k odeslání dat ve stavu *SEND_DATA*.

V případě správně přijatých dat má modul na svém vstupu jeden bajt s binárně zakódovanou hodnotou naměřené relativní vlhkosti ze senzoru *DHT11*. Bit na pozici č. 0 odpovídá relativní vlhkosti 1 %, bit na pozici č. 6 odpovídá hodnotě relativní vlhkosti 64 %. Tato binární hodnota je modulem převedena na dekadickou hodnotu. Dekadická hodnota relativní vlhkosti je pomocí operací modulo 10 a modulo 100 rozdělena na jednotlivé cifry. (viz Tab. 4.3)

Získaná dekadická hodnota relativní vlhkosti je porovnána s hodnotou 90 % a 20 % (měřicí rozsah) a pokud dojde k překročení těchto hodnot, jsou na výstupní port generována data se strukturou pro odpovídající typ chyby. Pokud je naměřená vlhkost v požadovaném intervalu, jsou generována data obsahující naměřenou vlhkost. (viz Tab. 4.3 a Tab. 4.4).

Tab. 4.3 - Struktura výstupních dat modulu *humidity_conv*

dataOut	12	11	8	7	4	3	0
rel. vlhkost	0	1111		první cifra rel. vlhkosti	druhá cifra rel. vlhkosti		
chyba	1	číslo chyby					

Tab. 4.4 - Význam jednotlivých čísel chyb modulu *humidity_conv*

Číslo chyby	Popis chyby
000	chyba připojení senzoru
001	$\rho^5 > \rho_{MAX}$ (90 %)
002	$\rho < \rho_{MIN}$ (20 %)
003	chyba kontrolního součtu

⁵ ρ - relativní vlhkosti vzduchu

4.1.9. Modul *humidity_conv2*

Tento modul dekóduje naměřenou vlhkost vzduchu získanou modulem DHT22 ze senzoru DHT22, případně vyhodnocuje obdrženy chybový kód, na vstupním portu *humidity(15:0)*. Dekódování je spouštěno synchronně náběžnou hranou signálu o periodě 1 μ s (vstup *clk*) při současném nastavení vstupu *data_en* do logické úrovně 1. Dekódovaná hodnota je přivedena na třináctibitový výstup *dataOut(12:0)* a spolu s ní je nastaven výstupní port *sendReady* spouštějící vysílání dat následujícím modulem *transmitter*.



Obr. 4.14 - Modul *humidity_conv2*

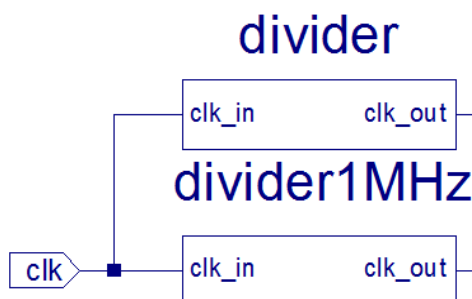
Funkce modulu je zajištěná jednoduchým konečným stavovým automatem (FSM) se stavy IDLE, HUMIDITY_CALC, ERROR_CHECK a SEND_DATA.

Činnost tohoto modulu je téměř totožná, jako u modulu *humidity_conv*. Liší se velikostí vstupního portu *humidity*, kontrolou struktury vstupních dat ve stavu ERROR_CHECK a rozdělením vstupních dat na tři cifry pomocí operací modulo 10, modulo 100 a modulo 1000. Stavový diagram a funkce jsou stejné jako u modulu *humidity_conv* a jsou uvedeny v kapitole 4.1.8.

Struktura výstupních dat se liší použitím všech bitů 0-11 pro hodnotu vyjadřující naměřenou relativní vlhkost vzduchu. Struktura výstupních dat a význam čísel chyb je stejný jako u modulu *humidity_conv* a je uvedena v Tab. 4.3 a Tab. 4.4.

4.1.10. Modul *divider* a *divider1MHz*

Tyto dva moduly jsou si velmi podobné a svojí funkcí jednoduché, proto každému není věnována samostatná podkapitola. Oba moduly slouží pouze k vydělení hodinového signálu s frekvencí 100 MHz na vstupním portu *clk_in* na signál o periodě 1 MHz u modulu *divider1MHz* respektive 800 Hz u modulu *divider* přivedeného na výstupní port *clk_out*.



Obr. 4.15 - Modul *divider* a *divider1MHz*

V obou těchto blocích je pouze použit čítač do určité hodnoty dané potřebnou periodou výstupu pro vydělení vstupního signálu. Po jejím překročení je čítač vynulován a hodnota výstupu na jeden takt *clk_in* nastavena do logické úrovně 1. Tím je generován výstupní signál na portu *clk_out* s požadovanou periodou.

Počet taktů n potřebných pro překlopení signálu pro generování signálu o požadované periodě je:

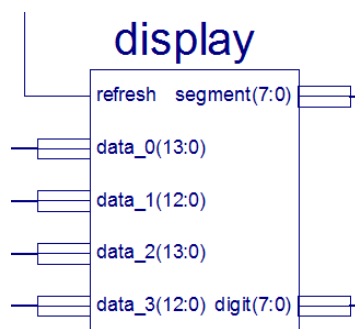
$$n = \frac{f_{IN}}{f_{OUT}} \quad (2)$$

,kde f_{IN} je frekvence vstupního signálu,

f_{OUT} je požadovaná frekvence výstupního signálu.

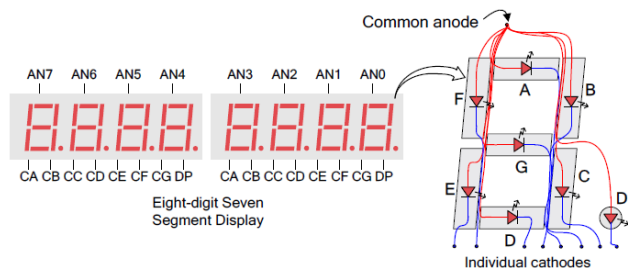
4.1.11. Modul display

Zobrazení naměřených hodnot teploty a relativní vlhkosti vzduchu na dvou sedmissegmentových displejích přípravku zajišťuje modul *display*. Vstupní port *refresh* zajišťuje přepínání jednotlivých pozic displeje (výstupní port *digit(7:0)*). Ostatní vstupní porty *data_0* až *data_3* obsahují data z modulů *temp_conv*, *humidity_conv2*, *temp_conv2* a *humidity_conv* a určují, co bude zobrazeno na jednotlivých segmentech pozice tj. port *segment(7:0)*.



Obr. 4.16 - Modul *display*

Anody jednotlivých osmi LED, které tvoří každou pozici, jsou spolu spojené do jedné tzv. společné anody. Jejich katody zůstávají oddělené, jak je ukázáno na Obr. 4.17. Osm společných anod AN7 až AN0 tak slouží pro vybrání příslušné pozice displeje. Katody CA až CG a DP slouží k rozsvícení jednotlivých segmentů vybrané pozice displeje.



Obr. 4.17 - Sedmissegmentový displej - Figure 18 [6, str. 19]

Na displeji lze tedy zobrazit najednou pouze jednu pozici. Při zobrazení více pozic najednou, je nutné řídit signál pro společné anody a katody jednotlivých pozic, které chceme zobrazit v trvale se opakujícím sledu rychleji, než dokáže zaznamenat lidské oko. Každá pozice svítí jen 1/8 času, ale protože oko nedokáže z důvodu setrvačnosti vnímat ztmavnutí pozice, vnímáme jednotlivé pozice jako kontinuálně rozsvícené. [6, str. 19]

Pro obnovovací frekvenci 100 Hz bude tedy celý displej obnoven jednou za 10 ms. Každá cifra bude muset svítit 1/8 z tohoto času (1,25 ms). Tato obnovovací frekvence je dostatečná pro kvalitní vjem zobrazení. Frekvence přepínání jednotlivých cifer f_{DIGIT} bude tedy:

$$f_{DIGIT} = n \cdot f_{DISPLAY} = 8 \cdot 100 = 800 \text{ Hz} \quad (3)$$

, kde $f_{DISPLAY}$ je požadovaná frekvence obnovení všech pozic displeje,

n je počet pozic displeje.

Na levé části displeje přípravku se zobrazují naměřené hodnoty ze senzorů DS18B20 a DHT22 a v pravé části ze senzorů ADT7420 a DHT11. Vždy je současně zobrazena teplota nebo relativní vlhkost vzduchu a každé 2,5 sekundy je zobrazený údaj vyměněn za právě nezobrazenou hodnotu.

4.1.12. Modul transmitter

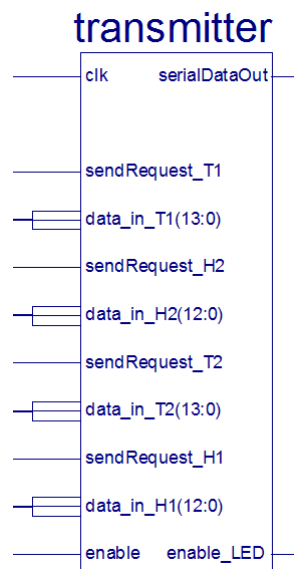
Modul *transmitter* slouží k odesílání dat s naměřenými hodnotami teploty a relativní vlhkosti vzduchu přes USB pomocí virtuálního sériového rozhraní. Tento modul je synchronně spouštěn náběžnou hranou signálu o frekvenci 100 MHz (vstup *clk*). Činnost modulu je spouštěna vstupem *enable*, který je připojen na přepínač přípravku *Nexys4*. Činnost modulu je indikována výstupním portem *enable_LED* připojeného na LED diodu přípravku.

Dvojice vstupních portů *sendRequest_XY* a *data_in_XY*, kde X značí typ a Y číslo senzoru slouží k přenosu dat a indikaci příchodu nových dat z připojených modulů. Modul serializuje vstupní data na portech *data_in_XY* a odesílá je na výstupní port *serialDataOut*, který je vyveden na rozhraní převodníku RS-232/USB přípravku *Nexys4*.

Parametry sériové komunikace modulu jsou následující:

- přenosová rychlost 115200 b/s,
- 8 datových bitů,
- 1 stop bit,
- žádná parita,
- řízení toku - žádné.

Modul *transmitter* je složen ze dvou submodulů: *UART* a *transmitControler* popsaných v kapitolách 4.1.13 a 4.1.14.

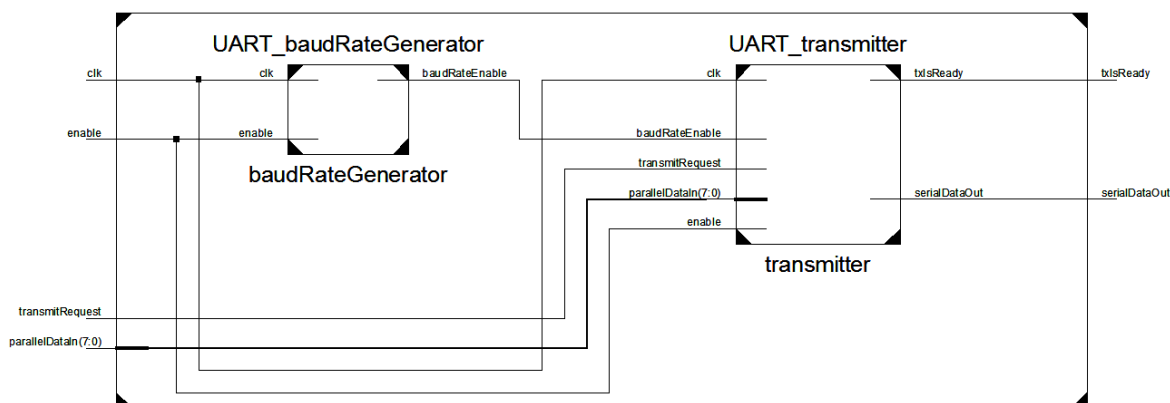


Obr. 4.18 - Modul *transmitter*

4.1.13. Submodul UART

Submodul *UART* serializuje bajt dat na vstupním portu *parallelDataIn(7:0)*, který odesílá pomocí sériové linky do počítače virtuálním sériovým rozhraním přes USB. Oproti standardnímu modulu *UART* (Universal Asynchronous Transceiver) je v meteostanici realizována pouze vysílací část a generátor taktu. Přijímání dat bylo realizováno a vyzkoušeno, ale v meteostanici není přijímací část využita.

Submodul se skládá ze dvou částí: *UART_baudRateGenerator* a *UART_transmitter* (viz Obr. 4.19).



Obr. 4.19 - Blokové schéma submodulu *UART*

Funkce submodulu *UART_baudRateGenerator* je generování taktu pro odesílání dat požadovanou přenosovou rychlostí.

Pro přenosovou rychlost sériového rozhraní v_p je nutné generovat signál s periodou trvání vysílání jednoho bitu T_p :

$$T_p = \frac{1}{v_p} \quad (4)$$

Pro přenosovou rychlost 115200 b/s je doba trvání vysílání jednoho bitu $T_p = 8,6805 \mu\text{s}$. Při použití krystalu přípravku s frekvencí 100 MHz nelze signál s takovou periodou generovat pouhým dělením frekvence signálu.

Nejbližší možná perioda signálu, který lze generovat je $8,68 \mu\text{s}$. Naštěstí protokol RS-232 nepotřebuje generování úplně přesného taktu a tato odchylka tedy nemá vliv na správnou funkci sériové komunikace. Submodul *UART_baudRateGenerator* generuje na svém výstupním portu *baudRateEnable* každých $8,68 \mu\text{s}$ pulz, jehož vzestupná hrana je využita k synchronizaci odesílání jednotlivých bitů submodulem *UART_transmitter*.

Submodul *UART_transmitter* slouží k odeslání bajtu dat přijatého na vstupním portu *parallelDataIn(7:0)* pomocí výstupního port *serialDataOut*, který je vyveden na rozhraní sériové linky přípravku *Nexys4*. Odesílání je řízeno logickou úrovní 1 na portu *transmitRequest*. Při odesílání je nastaven výstupní port *txIsReady* na logickou úroveň 0, čímž je indikováno právě probíhající vysílání.

Funkce submodulu je zajištěna konečným stavovým automatem (FSM) se stavy IDLE, SEND_START_BIT, SEND_DATA_BITS a SEND_STOP_BIT. Stavový diagram submodulu je uveden na Obr. 4.20.

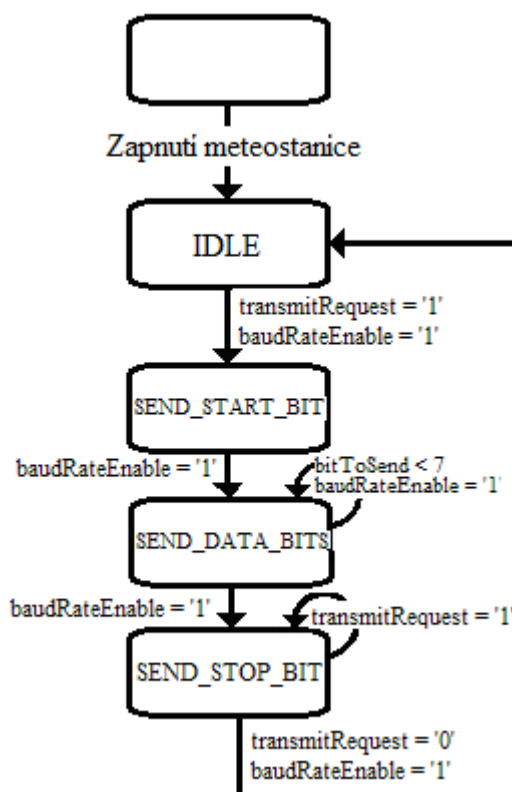
Pokud je submodul aktivní, tj. port *enable* je nastaven na logickou úroveň 1, testuje každý takt příchod požadavku na odesílání na portu *transmitRequest*. Pokud dojde k detekci

požadavku na vysílání, jsou požadovaná data k odeslání uložena. Po příchodu vzestupné hrany na portu *baudRateEnable* přechází submodul do stavu SEND_START_BIT.

Zde je vygenerován start bit komunikace přechodem výstupu do logické úrovně 0 na dobu jednoho taktu *baudRateEnable* a submodul přechází do stavu SEND_DATA_BITS.

V tomto stavu dochází k vyslání dat obdržných při přijetí požadavku na komunikaci ve stavu IDLE. S každou vzestupnou hranou na portu *baudRateEnable* je vyslán následující bit. Po odeslání osmého datového bitu přechází submodul do stavu SEND_STOP_BIT.

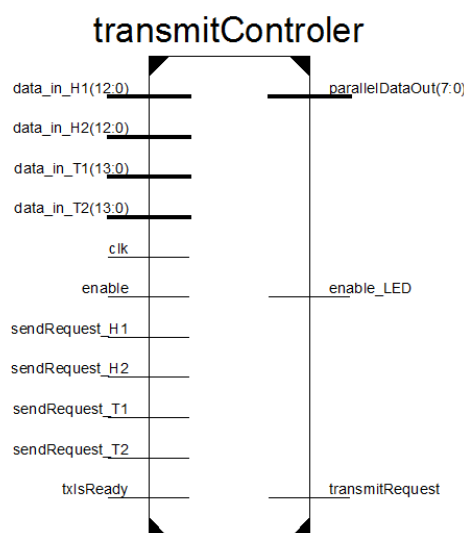
Poslední stav SEND_STOP_BIT navrácí sériovou linku do základního stavu na dobu alespoň jednoho taktu *baudRateEnable*. Dále je zkontrolováno navrácení portu *transmitRequest* na logickou úroveň 0, aby nebylo omylem opakovaně zahájeno vysílání již odeslaných dat. Submodul se po detekování logické úrovně 0 na portu *transmitRequest* vrací do stavu IDLE a čeká na požadavek na odeslání dalšího bajtu dat.



Obr. 4.20 - Stavový diagram submodulu *UART_transmitter*

4.1.14. Submodul *transmitController*

Tento submodul řídí vysílání naměřených dat ze senzorů pomocí sériové linky submodulem *UART*. Submodul *transmitController* čeká na data z připojených modulů na portech *data_in_T1(13:0)*, *data_in_T2(13:0)*, *data_in_H1(12:0)* a *data_in_H2(12:0)*, jejichž příchod je indikován logickou úrovní 1 na portech *sendRequest_T1*, *sendRequest_T2*, *sendRequest_H1* a *sendRequest_H2*. Po přijetí všech dat je vytvořena sekvence bitů k odeslání sériovou linkou pomocí submodulu *UART*, se kterým je komunikace řízena pomocí portů *parallelDataOut*, *txIsReady* a *transmitRequest*.



Obr. 4.21 - Submodul *transmitController*

Funkce modulu je zajištěná konečným stavovým automatem (FSM) se stavy IDLE, PREPARE_SEQUENCE, PREPARE_CHAR a SEND_CHAR.

Ve stavu IDLE čeká submodul na data z modulů *temp_conv*, *temp_conv2*, *humidity_conv* a *humidity_conv2*, které po zpracování dat ze senzorů indikují submodulu *transmitController* nová data pomocí portů *sendRequest_XY* (X - typ, Y - číslo senzoru). Po přijmutí dat ze všech předchozích modulů přejde submodul do stavu PREPARE_SEQUENCE, kde je podle typu přijatých dat (viz Tab. 4.1 a Tab. 4.3) vytvořen signál obsahující data ze všech senzorů. Data z jednotlivých modulů jsou v odesílaném řetězci oddělena pomocí středníku.

Odesílání dat je realizováno pomocí stavů PREPARE_CHAR a SEND_CHAR. V prvním z nich je na port *parallelDataOut* vybrán vysílaný znak přeformátovaný do formátu ASCII⁶ tj. jeden bajt obsahující textový znak. Ve stavu SEND_CHAR je zkontrolován stav odesílání dat submodulem *UART* na portu *txIsReady*. Pokud právě neprobíhá odesílání (port *txIsReady* je ve stavu logické 1), je vyslán požadavek na odeslání dalšího bajtu dat na portu *transmitRequest*. Po odeslání všech znaků se submodul vrací do stavu IDLE, kde submodul čeká na příchod nových dat k odeslání.

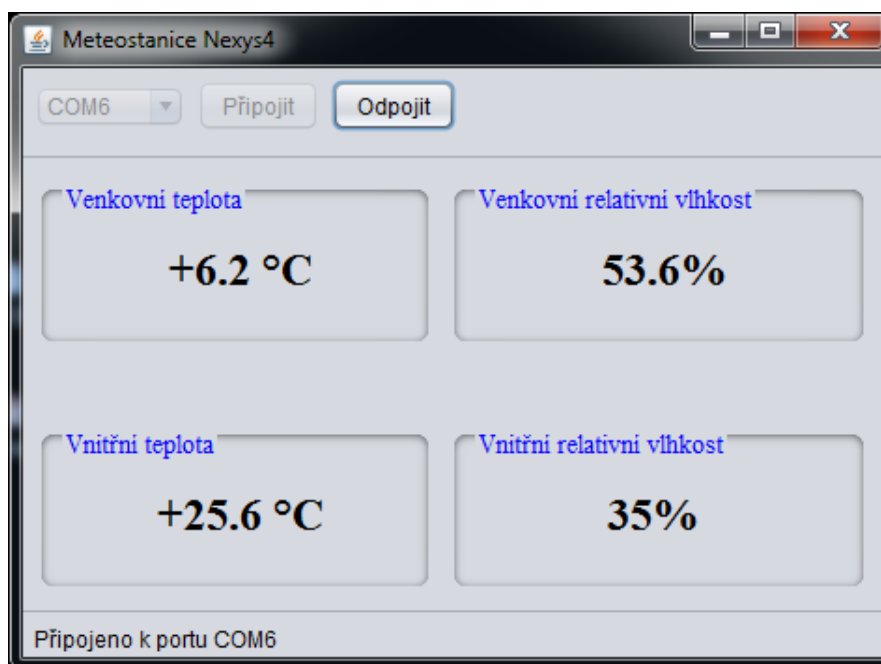
⁶ ASCII -americký standardní kód pro výměnu informací (American Standard Code for Information Interchange)

4.2. Software pro PC

Program „Meteostanice Nexys4“ slouží k zobrazení aktuálně naměřených hodnot teploty a relativní vlhkosti vzduchu přijatých z meteostanice a k ukládání těchto naměřených dat do souboru *log.csv* v počítači.

Program je napsán v programovacím jazyce *Java* s využitím knihovny pro sériovou komunikaci *java-simple-serial-connector* (jSSC) [13]. K spuštění programu je potřeba nainstalované prostředí JRE⁷ verze 6 nebo vyšší. Dále je potřeba ovladač pro virtualizaci sériového portu na rozhraní USB. Tento ovladač pro čip použitý na přípravku *Digilent Nexys4* je možné stáhnout na internetové stránce <http://www.ftdichip.com/Drivers/VCP.htm>. Poté je toto rozhraní možné použít jako standardní sériový port.

Hlavní okno programu je uvedeno na následujícím obrázku.



Obr. 4.22 - Hlavní okno programu „Meteostanice Nexys4“

Po spuštění programu jsou zjištěna aktivní sériová rozhraní, která jsou zobrazena v rozbalovacím menu v levé horní části hlavního okna programu.

Stisknutím tlačítka „Připojit“ je program připojen na zvolené COM rozhraní a čeká na příchod dat z meteostanice. Dále je spuštěn čítač s periodou 5 sekund, který slouží k testování příchodu nových dat, čímž je kontrolována komunikace s meteostanicí. Pokud za tuto dobu nedojde k příchodu nových dat, dojde k odpojení sériové komunikace a uživatel je o tomto stavu informován ve stavovém řádku v dolní části hlavního okna programu. Při správné komunikaci meteostanice na zvoleném rozhraní, jsou přijatá data převedena do vhodného formátu a zobrazena v hlavním okně programu v příslušných panelech.

Přijatá data z meteostanice jsou opatřena časovou značkou se systémovým časem počítače a každou minutu jsou zapsána poslední přijatá data do souboru *log.csv* umístěném ve složce se spuštěným programem. Do souboru jsou ukládána data v csv formátu. Jednotlivé hodnoty jsou v souboru oddělené čárkami v pořadí: datum a čas měření, vnitřní teplota,

⁷ JRE - Java Runtime Environment

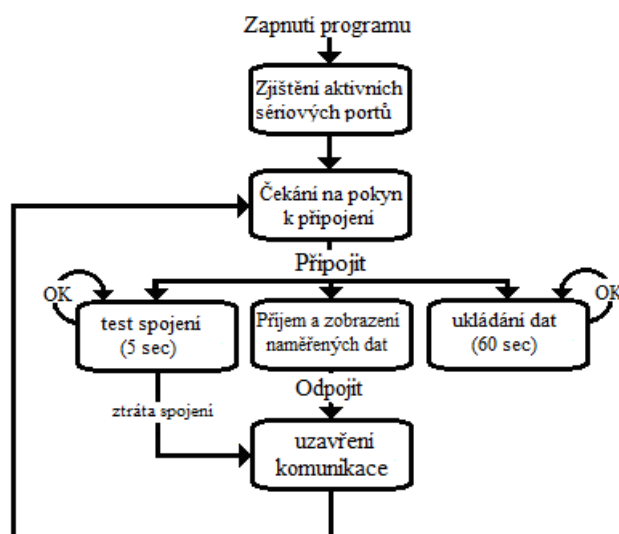
vnitřní relativní vlhkost, vnější teplota a vnější relativní vlhkost. Pro ilustraci uvádím jeden řádek ze souboru log.csv obsahující naměřené hodnoty.

```
25. 12. 2014 17:25;6.9;35%;25.6;49.30%
```

Odpojení komunikace s meteostanicí je možné pomocí tlačítka „Odpojit“. Jeho stisknutím dojde k ukončení komunikace na připojeném sériovém portu a ke zobrazení výchozích stavů zobrazených hodnot. Poté se program vrací do výchozího stavu a čeká na případné další navázání komunikace s meteostanicí.

Stavový diagram funkce programu je uveden na Obr. 4.23.

Program byl vyzkoušen pouze na operačním systému Windows 7, ale měl by být bez problému spustitelný na jiných operačních systémech podporujících programovací jazyk *Java* a uvedené ovladače pro virtualizaci sériových portů.



Obr. 4.23 - Stavový diagram funkce programu „Meteostanice Nexys4“

5. Realizace

V této kapitole je popsána realizace domácí meteostanice, je zde vyhodnocen její testovací provoz a zhodnoceny klady a zápory realizované meteostanice oproti jiným komerčně dostupným meteostanicím.

5.1. Výsledná realizace

Domácí meteostanice byla dle zadání implementována prostřednictvím jazyka VHDL na přípravku *Nexys4*.

Senzory pro měření v exteriéru (DS18B20 a DHT22) jsou připojeny k meteostanici pomocí UTP kabelu k *Pmod* portu JD. Senzory jsou umístěny v plastové krabičce pro jejich ochranu před povětrnostními vlivy. Senzor pro měření relativní vlhkosti vzduchu v interiéru (DHT11) je připojen přímo k *Pmod* portu JB pomocí oboustranných kolíků. Senzor ADT7420 pro měření vnitřní teploty vzduchu je umístěn přímo na přípravku *Nexys4*.

Meteostanice zobrazuje naměřené hodnoty z jednotlivých senzorů na sedmi-segmentovém displeji a odesílá je do připojeného PC. Odesílání přes sériové rozhraní je ovládáno pomocí pravého přepínače přípravku (SW0) a zapnuté odesílání je indikováno rozsvícenou LED nad tímto přepínačem (LED0).

Zdrojový soubor pro konfiguraci hradlového pole je zapsán do nevoltaické paměti *Quad SPI Flash (S25FL128S)* a při nastavení jumperu MODE do pozice QSPI je automaticky nahrána konfigurace hradlového pole meteostanice po jejím zapnutí.

K realizaci domácí meteostanice byly použity tyto komponenty:

- Přípravek *Nexys4*
- Senzor DS18B20
- Senzor DHT11
- Senzor DHT22
- UTP kabel
- oboustranné kolíky 2,54 mm
- plastová krabička U-NK1AV

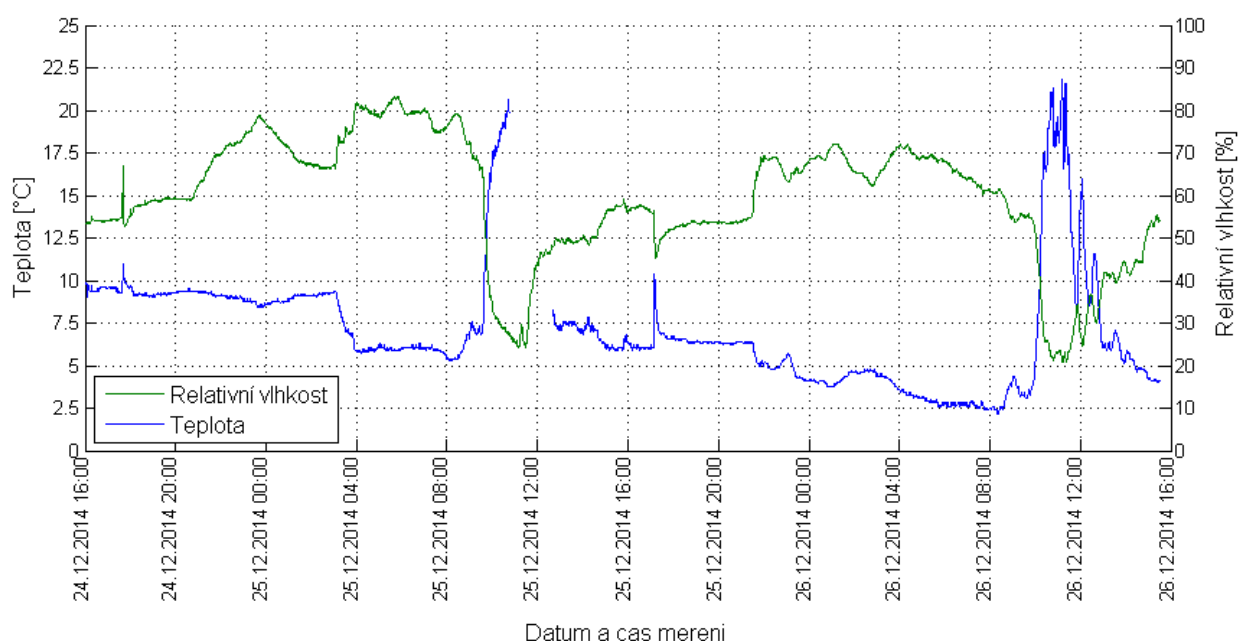
Fotografie výsledné realizace jsou uvedeny v Příloha 2 a Příloha 3.

5.2. Testovací provoz

Funkčnost meteostanice byla otestována dvoudenním zkušebním provozem. Během této doby byly naměřené hodnoty zobrazovány na displeji meteostanice a odesílány sériovým rozhraním do počítače. Během celého testu nedošlo u meteostanice k jakékoliv chybě funkce programu a meteostanice pracovala správně.

Naměřené hodnoty byly programem „Meteostanice Nexys4“ ukládány do souboru *log.csv* a po ukončení testu byly zpracovány do dvou grafů pro senzory v exteriéru a senzory v interiéru. Celkem bylo zaznamenáno 2851 záznamů s naměřenými hodnotami teploty a relativní vlhkosti vzduchu.

V průběhu měření došlo, na dobu zhruba dvou hodin, ke ztrátě připojení meteostanice a senzoru DS18B20. Při otevření okna se meteostanice posunula, došlo ke ztrátě kontaktu mezi *Pmod* konektorem přípravku a kabelem s připojeným senzorem. Z tohoto důvodu nebyla po tuto dobu zaznamenána venkovní teplota. Tento stav je zaznamenán na grafu venkovní teploty na Obr. 5.1. Po zjištění odpojení senzoru byl senzor znovu připojen a měření teploty po zbytek testu probíhalo bez problému.

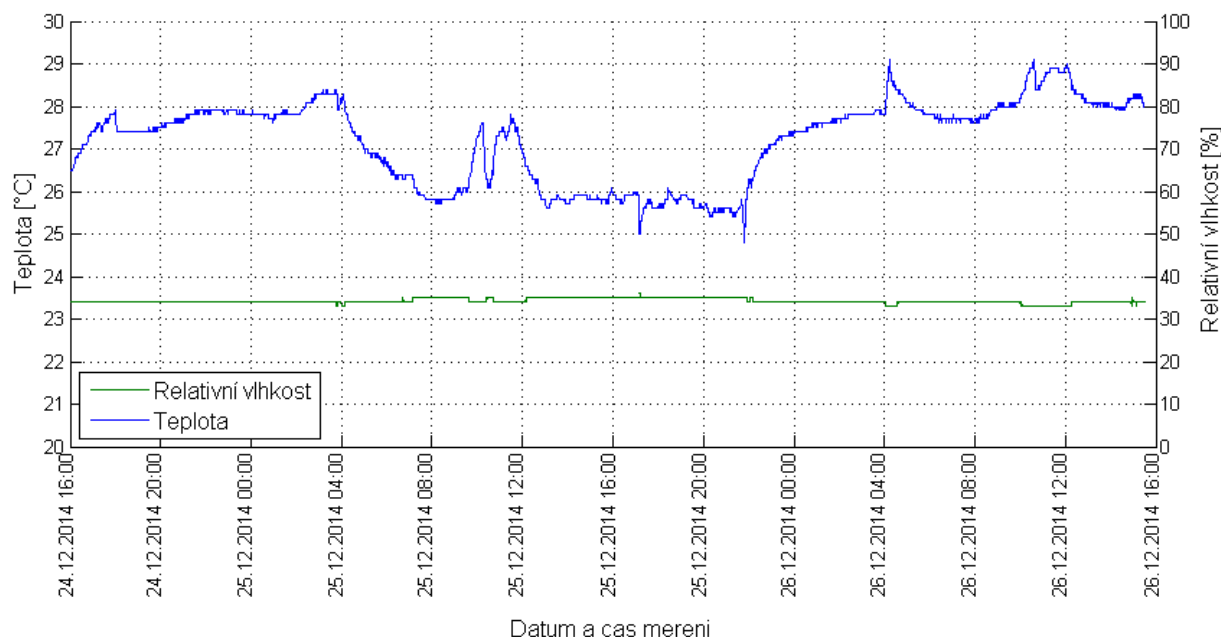


Obr. 5.1 - Graf venkovní teploty a relativní vlhkosti vzduchu

Během celého měření nedošlo při komunikaci se senzory DHT22 a DS18B20 k žádné jiné chybě. Použitá délka kabelu pro připojení externích senzorů tedy nezpůsobuje chyby komunikace vlivem nedostatečného napětí pro správné rozlišení logických stavů. Použití delšího kabelu by tedy bylo možné, ale bylo by nutné vyzkoušet vliv delšího kabelu na komunikaci.

U senzoru DHT11, který byl připojen přímo k *Pmod* portu, došlo u 21 z 2851 zaznamenaných hodnot relativní vlhkosti vzduchu k chybě kontrolního součtu (E.003). Došlo tedy k chybě komunikace mezi senzorem DHT11, použitého pro měření vnitřní relativní vlhkosti vzduchu, a přípravkem *Nexys4*. Tyto chyby mohly být způsobeny špatným kontaktem senzoru a přípravku, případně chybou samotného senzoru. Četnost chyb komunikace ale nebyla příliš vysoká a pro potřeby měření domácí meteostanicí je vyhovující.

Senzor ADT7420, použitý pro měření vnitřní teploty umístěný přímo na přípravku, během celého testu negeneroval žádnou chybu. Graf s naměřenými hodnotami teploty a relativní vlhkosti vzduchu v interiéru je uveden na Obr. 5.2



Obr. 5.2 - Graf vnitřní teploty a relativní vlhkosti vzduchu

Jiné chyby nebyly meteostanicí generovány a celková funkčnost realizované meteostanice, tak byla ověřena. Všechny funkce realizované meteostanice byly tedy realizovány a jsou plně funkční.

5.3. Porovnání meteostanice

Realizovaná domácí meteostanice byla porovnána s komerčně dostupnou meteostanicí GARNI 657 [14] umožňující měření teploty, relativní vlhkosti vzduchu a tlaku. Porovnávaná meteostanice má podle údajů výrobce tyto parametry:

Tab. 5.1 . Parametry domácí meteostanice GARNI 657

Rozsah měření vnitřní teploty / tolerance	-5°C až +50°C ±1°C
Rozlišení vnitřní teploty	0,1°C
Rozsah měření vnější teploty / tolerance	-50°C až +60°C ±1°C
Rozlišení vnější teploty	0,1°C
Rozsah měření vnitřní rel. vlhkosti / tolerance	25% až 95% ±5%
Rozlišení vnitřní rel. vlhkosti	1%
Rozsah měření vnější rel. vlhkosti / tolerance	25% až 95% ±5%
Rozlišení vnější rel. vlhkosti	1%

Při měření byly senzory porovnávaných meteostanic umístěny co nejbližší u sebe, aby bylo zajištěno co nejpřesnější měření jednotlivých fyzikálních veličin.

Protože porovnávaná meteostanice neumožňuje odesílání naměřených veličin do počítače, byly naměřené hodnoty porovnávané v reálném čase přímo čtením z displejů meteostanic. Odečítání hodnot probíhalo v pětiminutových intervalech po dobu jedné hodiny.

Za celou dobu měření se venkovní teplota u obou meteostanic nelišila o více než 0,2 °C a venkovní relativní vlhkost vzduchu o 4 %. Vnitřní teplota měřená meteostanicí GARNI 657

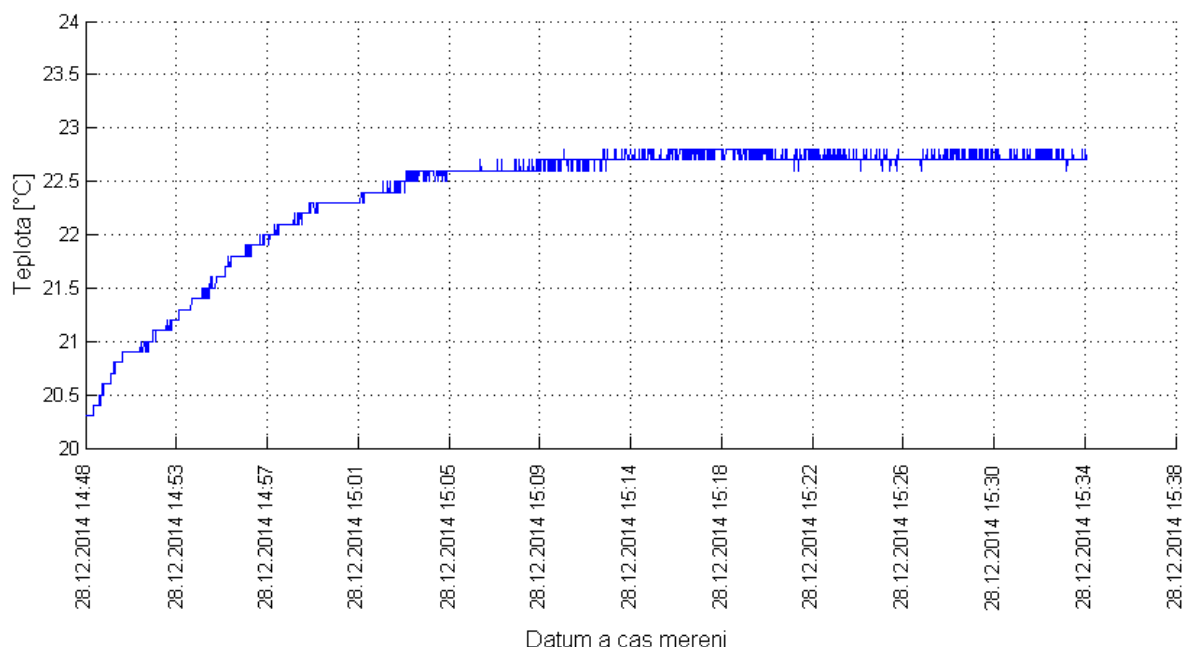
byla asi o 3 °C nižší než u realizované meteostanice. Naměřená vnitřní relativní vlhkost vzduchu se u obou meteostanic lišila maximálně o 5 %.

Tyto odchylky, mimo měření vnitřní teploty vzduchu, odpovídají udávaným přesnostem měření jednotlivých senzorů použitých v realizované a porovnávané meteostanici.

5.3.1. Odchylka senzoru ADT7420

U senzoru ADT7420, které má udávanou přesnost 0,25 °C je odchylka měření teploty mnohem vyšší než předpokládaná a od teploty naměřené meteostanicí GARNI 657 se liší o více než 2 °C. Po zapnutí meteostanice je naměřená teplota liší od hodnoty změřené meteostanicí GARNI méně, poté se odchylka zvyšuje na hodnotu zhruba 2-3 °C.

Senzor odesílá naměřenou hodnotu teploty a reaguje na její změny. Odesílaná teplota je ale vyšší než teplota okolního vzduchu. Tato odchylka je pravděpodobně způsobena ohříváním desky plošných spojů přípravku *Nexys4* po zapnutí napájení. To vysvětluje postupný nárůst odchylky teploty po zapnutí meteostanice do doby než se teplota desky plošných spojů ustálí. To lze pozorovat i na časovém průběhu vývoje naměřené teploty na Obr. 5.3.



Obr. 5.3 - Graf oteplení senzoru ADT7420

Ohřátí senzoru ADT7420 přípravkem *Nexys4* zkrsluje měřenou teplotu a tato teplota je poté vyšší než skutečná teplota okolního vzduchu. Umístění senzoru na desce bohužel neumožňuje přesun senzoru na jiné místo, které by nebylo od desky tolik zahříváno. Jedinou možností zpřesnění měření teploty tímto senzorem by byla softwarová kalibrace naměřené hodnoty podle teploty okolí a zahřívání přípravku *Nexys4*.

Další možností by bylo měření vnitřní teploty pomocí senzoru neumístěného na desce přípravku *Nexys4*. Tím by se zamezilo ohřívání senzoru a došlo by ke zpřesnění naměřené hodnoty teploty. Senzor teploty umístěný přímo na desce přípravku *Nexys4* není pro přesné měření teploty vzduchu vhodný.

5.4. Klady a zápory realizované meteostanice

Na trhu existuje velké množství meteostanic, které se liší jak měřenými meteorologickými veličinami, tak dalšími přídavnými funkcemi. Nabízené meteostanice umožňují většinou měřit teplotu, barometrický tlak a relativní vlhkost vzduchu, některé specializované meteostanice umožňují měřit i rychlost a směr větru, srážky a sluneční svit. Nabízené meteostanice většinou neumožňují přenos naměřených veličin do počítače. Dlouhodobý záznam nebo odesílání dat do počítače je doménou dražších profesionálních a poloprofesionálních meteostanic. Komerční meteostanice mají pevně dané připojené senzory, případně je u nich možné použít více senzorů pro stejnou měřenou veličinu (např. teplotu). Přidání dalších senzorů pro měření dalších veličin u nich není možné. [15]

Realizovaná domácí meteostanice umožňuje měření vnitřní a venkovní teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Navíc tyto hodnoty odesílá do počítače. Meteostanici by bylo možné doplnit o další funkce, běžné u komerčních meteostanic: zobrazení času a data, výpočet hodnoty rosného bodu a heat indexu⁸ pouze změnou programu v hradlovém poli.

Nevýhodou realizované meteostanice je připojení senzorů pro měření v exteriéru pomocí UTP kabelu. To vede k možnosti ztráty komunikace se senzory při nechtěném odpojení kabelu při manipulaci s meteostanicí. K tomu došlo i během testovacím provozu. Možným vylepšením by mohla být vizuální nebo akustická indikace odpojení senzoru během měření. Jiným řešením by mohlo být propojení řídicí jednotky meteostanice a externích senzorů pomocí bezdrátového přenosu dat. To by vyžadovalo výrobu desky plošného spoje se senzory, řídicím mikroprocesorem a modulem pro bezdrátovou komunikaci. Dále by bylo nutné vyrobit přijímač na straně řídicí jednotky meteostanice. Dalším možným vylepšením by byla možnost ukládání dat do paměti na vysílací straně v případě ztráty komunikace s řídicí jednotkou. Případně do paměti řídicí jednotky pro možnost odesílání dat po větších blocích, čímž by odpadla nutnost stálého připojení meteostanice k počítači.

Jak jsem se zmínil v kapitole 5.3.1, senzor ADT7420 použitý pro měření teploty vzduchu v interiéru, by bylo vhodné nahradit jiným senzorem neumístěným na desce přípravku *Nexys4*. Teplota měřená tímto senzorem je silně zkreslena oteplením přípravku *Nexys4*, změřená teplota vzduchu je pouze orientační a nedosahuje přesnosti senzoru ADT7420.

Největší výhodou realizované meteostanice je možnost implementace měření dalších meteorologických veličin pomocí připojení dalších senzorů a následné úpravy programu. U dalších senzorů, které by mohly být připojeny k meteostanici, by bylo možné použít například senzor tlaku (senzor BMP180), osvětlení (senzor MAX44007) nebo UV záření (Si1132). Tyto uvedené senzory využívají k přenosu naměřených veličin sběrnici I²C, která je již v této meteostanici realizována. Jejich přidání by tedy nebylo obtížné. K meteostanici by bylo možné připojit více senzorů DS18B20 na již implementovanou sběrnici a spolu s jejich adresováním by bylo možné přidat měření teploty vzduchu na více místech.

Cena realizace této meteostanice je zatím vyšší než při koupi komerční meteostanice s podobnými funkcemi, z důvodu použití přípravku *Nexys4* jehož cena je 7200 Kč⁹. Bylo by možné využít levnějšího přípravku, což by vedlo k razantní úspoře za cenu změny periférií přípravku a snížení velikosti hradlového pole. Přidáním senzorů pro měření dalších meteorologických veličin by cena výsledné meteostanice začala konkurovat podobným komerčně dostupným meteostanicím i s ponecháním přípravku *Nexys4*.

⁸ Heat index – pocitová teplota kombinující teplotu vzduchu a relativní vlhkost vzduchu

⁹ Cena k 30.12.2014

6. Závěr

V této bakalářské práci byla navržena a realizována domácí meteorologická stanice s využitím přípravku Digilent *Nexys4*. Meteostanice umožňuje měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu v exteriéru a interiéru. Tyto naměřené hodnoty jsou zobrazeny na sedmissegmentovém displeji přípravku a odesílány přes virtualizované sériové rozhraní do počítače.

Realizovaná meteostanice funguje bez problémů a všechny funkce meteostanice, které byly požadovány v zadání práce a byly uvažovány při návrhu meteostanice byly implementovány. Zadání bakalářské práce se mi tak podařilo zcela a úspěšně splnit.

Měření teploty v interiéru a teploty i relativní vlhkosti vzduchu v exteriéru dosahuje podobné přesnosti jako komerčně dostupná meteostanice GARNI 657. U měření teploty v interiéru senzorem ADT7420 byla zjištěna odchylka od skutečné hodnoty vlivem oteplení desky plošných spojů přípravku *Nexys4* využitého jako řídicí jednotka meteostanice.

Meteostanici by bylo možné dále vylepšit přidáním dalších senzorů pro měření jiných meteorologických veličin. Vhodná by byla výroba samostatné části pro měření v exteriéru s možností bezdrátového přenosu naměřených fyzikálních veličin. Senzor pro měření vnitřní teploty vzduchu by měl být pro zlepšení přesnosti měření nahrazen jiným neumístěným na přípravku *Nexys4*.

Všechny zdrojové soubory pro programování hradlového pole a program pro zpracování naměřených dat v počítači jsou uloženy na přiloženém CD.

Díky této práci jsem se seznámil s přípravkem *Nexys4* a s jeho ovládáním pomocí jazyka VHDL. V tomto programovacím jazyce jsem získal mnoho nových zkušeností a velmi jsem se v něm v průběhu práce zdokonalil. Dále jsem získal nové znalosti s komunikací s digitálními senzory pomocí různých komunikačních sběrnic.

7. Literatura

- [1] ASHENDEN, Peter J. *Digital design: an embedded systems approach using VHDL*. 2008. vyd. Amsterdam: Elsevier, c2008, 573 s. ISBN 978-0-12-369528-4.
- [2] KAFIG, William. *VHDL 101: everything you need to know to get started*. Burlington, MA: Newnes/Elsevier, 2011, 200 p. ISBN 18-561-7704-1.
- [3] PINKER, Jiří a Martin POUPA. *Číslicové systémy a jazyk VHDL*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 349 s. ISBN 80-730-0198-5.
- [4] KRÁL, Jiří. *Řešené příklady ve VHDL: Hradlová pole FPGA pro začátečníky*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010, 127 s. ISBN 978-807-3002-572
- [5] ŠŤASTNÝ, Jakub. *FPGA prakticky: realizace číslicových systémů pro programovatelná hradlová pole*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010, 199 s. ISBN 978-80-7300-261-9.
- [6] DIGILENT, Inc. *Nexys4™ FPGA Board Reference Manual*. rev. B. 2014, 29 s. Dostupné z: https://digilentinc.com/Data/Products/NEXYS4/Nexys4_RM_VB2_Final_5.pdf
- [7] MAXIM INTEGRATED. *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. Rev 4. 2008, 22 s. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [8] AOSONG ELECTRONICS CO., Ltd. *Digital relative humidity & temperature sensor DHT11*. [2012], 6 s. Dostupné z: http://www.aosong.com/asp_bin/Products/en/Digital%20humidity%20and%20temperature%20sensor%20DHT11.pdf
- [9] ANALOG DEVICES, Inc., *ADT7420: ±0.25°C Accurate, 16-Bit Digital I2C Temperature Sensor Data Sheet*. 2. vyd. 2012, 24 s. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADT7420.pdf
- [10] UM10204: I2C-bus specification and user manual. NXP SEMICONDUCTORS. *NXP Semiconductors: Documentation Portal* [online]. Rev. 6. 4.4.2014 [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf
- [11] AOSONG ELECTRONICS CO., Ltd. *Temperature and humidity module AM2302 Product Manual*. [2012], 11 s. Dostupné z: http://www.dfrobot.com/image/data/SEN0137/AM2302_manual.pdf
- [12] APPLICATION NOTE 27: *Understanding and Using Cyclic Redundancy Checks with Maxim 1-Wire and iButton Products*. MAXIM INTEGRATED. Maxim Integrated: Analog, linear, and mixed-signal devices fr [online]. 2001 [cit. 2014-02-10]. Dostupné z: <http://www.maximintegrated.com/app-notes/index.mvp/id/27>
- [13] Java-simple-serial-connector: jSSC - java serial port communication library. *Google Code* [online]. 2014 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://code.google.com/p/java-simple-serial-connector/>
- [14] GARNI 657. GARNI. *Meteostanice, digitální teploměry a barometry - Garni* [online]. 2014 [cit. 2014-12-27]. Dostupné z: <http://www.garni-meteo.cz/cz/eshop/meteorologicke-stanice/domaci-stanice/113-garni-657.html>
- [15] GARNI: Jakou meteostanici koupit?. *GARNI* [online]. 2014 [cit. 2014-12-30].. Dostupné z: <http://www.garni-meteo.cz/cz/rady-pro-nakup/3-jakou-meteostanici-koupit/>

8. Seznam použitých zkratek

ACK	potvrzující bit (acknowledge)
CMOS	Complementary metal–oxide–semiconductor
COM	značení sériového portu v operačním systému Windows
CRC	Cyklický redundantní součet (Cyclic redundancy check)
csv	souborový formát - hodnoty oddělené čárkami (Comma-separated values)
EEPROM	Elektricky mazatelná paměť typu ROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)
FPGA	Programovatelné hradlové pole (Field-programmable gate array)
FSM	konečný automat (Finite-state machine)
I ² C	Inter-Integrated Circuit
LED	dioda emitující světlo (Light-Emitting Diode)
LFSR	Lineární zpětnovazební posuvný registr (Linear Feedback Shift Register)
LSB	Nejméně významný bit (Least significant bit)
MEMS	Mikro-elektricko-mechanické systémy (Microelectromechanical Systems)
MSB	Nejvýznamnější bit (Nejvýznamnější bit)
NACK	nepotvrzující bit (Non- acknowledge)
PC	počítač (Personal Computer)
PWM	Pulzně šířková modulace (Pulse-width modulation)
RD	čtení (read)
ROM	paměť pouze pro čtení (Read-Only Memory)
SCL	Serial Clock Line (hodinový signál sběrnice I ² C)
SDA	Serial Data Line (datový signál sběrnice I ² C)
SPI	sériové periferní rozhraní (Serial Peripheral Interface)
TTL	tranzistorově-tranzistorová logika (transistor-transistor-logic)
UART	Universal asynchronous receiver/transmitter
USB	Universal Serial Bus
UTP	nestíněná kroucená dvojlinka (Unshielded twisted pair cable)
VGA	Video Graphics Array
VHDL	VHSIC Hardware Description Language
WR	zápis (write)
XOR	Exkluzivní disjunkce (Logical exclusive-OR)

9. Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1.1 - Blokové schéma meteostanice	9
Obr. 3.1 - Přípravek <i>Nexys4</i> [6, str. 1].....	13
Obr. 3.2 - DS18B20 - blokové schéma - Figure 1. [7, str. 3].....	14
Obr. 3.3 - Inicializace senzoru DS18B20 - Figure 13. [7, str. 15]	15
Obr. 3.4 - Čtení a zápis dat - DS18B20 - Figure 14. [7, str. 16]	15
Obr. 3.5 - Inicializace senzoru DHT11 [8, str. 3].....	16
Obr. 3.6 - Časová struktura dat vysílaných senzorem DHT11 [8, str. 4].....	17
Obr. 3.7 - ADT7420 -Blokový diagram - Figure 1. [9, str. 1]	18
Obr. 3.8 - Časový diagram zápisu do registru senzoru ADT7420 - Figure 14. [9, str. 18].....	19
Obr. 3.9 - Časový diagram čtení z registru senzoru ADT7420 - Figure 16. [9, str. 19]	19
Obr. 3.10 - Inicializace senzoru DHT22 [11, str. 7].....	20
Obr. 4.1 - Modul <i>DS18B20</i>	22
Obr. 4.2 - Stavový diagram modulu DS18B20	23
Obr. 4.3 - Modul <i>DHT11</i>	23
Obr. 4.4 - Stavový diagram modulu <i>DHT11</i>	24
Obr. 4.5 - Modul <i>DHT22</i>	25
Obr. 4.6 - Modul <i>ADT7420</i>	25
Obr. 4.7 - Stavový diagram modulu <i>ADT7420</i>	26
Obr. 4.8 - Modul <i>CRC</i>	27
Obr. 4.9 - LFSR generátor CRC pro 1-wire	27
Obr. 4.10 - Modul <i>temp_conv</i>	28
Obr. 4.11 - Význam 0. a 1. bajtu paměti scratchpad senzoru DS18B20 - Figure 2. [7, str. 4] 28	
Obr. 4.12 - Modul <i>temp_conv2</i>	29
Obr. 4.13 - Modul <i>humidity_conv</i>	30
Obr. 4.14 - Modul <i>humidity_conv2</i>	31
Obr. 4.15 - Modul <i>divider</i> a <i>divider1MHZ</i>	32
Obr. 4.16 - Modul <i>display</i>	33
Obr. 4.17 - Sedmisegmentový displej - Figure 18 [6, str. 19].....	33
Obr. 4.18 - Modul <i>transmitter</i>	34
Obr. 4.19 - Blokové schéma submodulu <i>UART</i>	35
Obr. 4.20 - Stavový diagram submodulu <i>UART_transmitter</i>	36
Obr. 4.21 - Submodul <i>transmitController</i>	37
Obr. 4.22 - Hlavní okno programu „Meteostanice <i>Nexys4</i> “	38
Obr. 4.23 - Stavový diagram funkce programu „Meteostanice <i>Nexys4</i> “	39
Obr. 5.2 - Graf vnitřní teploty a relativní vlhkosti vzduchu.....	42
Obr. 5.3 - Graf oteplení senzoru ADT7420	43
Tab. 2.1 - Porovnání senzorů teploty	11
Tab. 2.2 - Porovnání senzorů relativní vlhkosti vzduchu.....	12
Tab. 3.1 - Struktura dat ze senzoru DHT11	16
Tab. 4.1 - Struktura výstupních dat modulu <i>temp_conv</i>	29
Tab. 4.2 - Význam jednotlivých čísel chyb modulu <i>temp_conv</i>	29
Tab. 4.3 - Struktura výstupních dat modulu <i>humidity_conv</i>	30
Tab. 4.4 - Význam jednotlivých čísel chyb modulu <i>humidity_conv</i>	30
Tab. 5.1 . Parametry domácí meteostanice GARNI 657	42

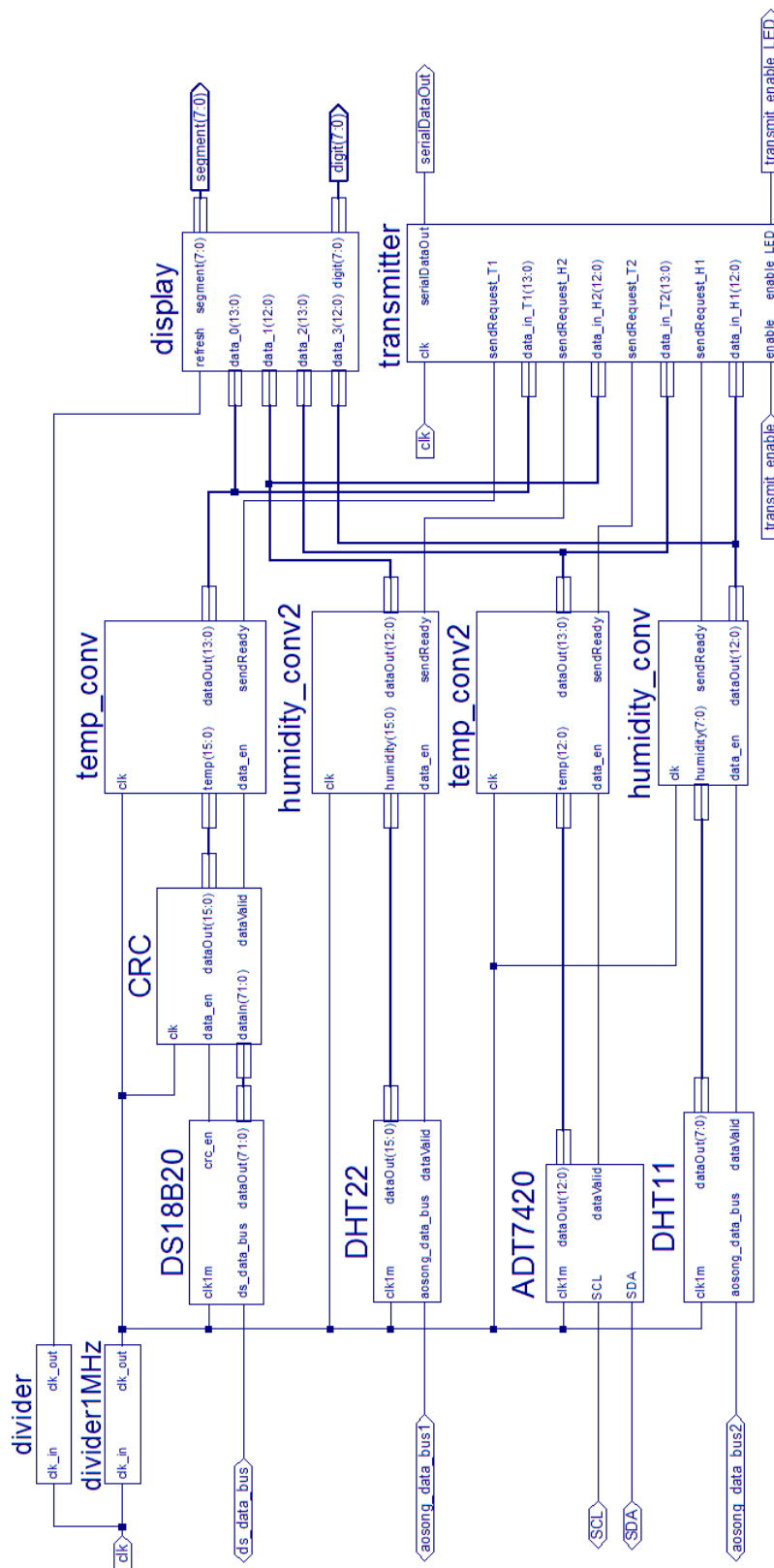
10. Přílohy

Seznam příloh

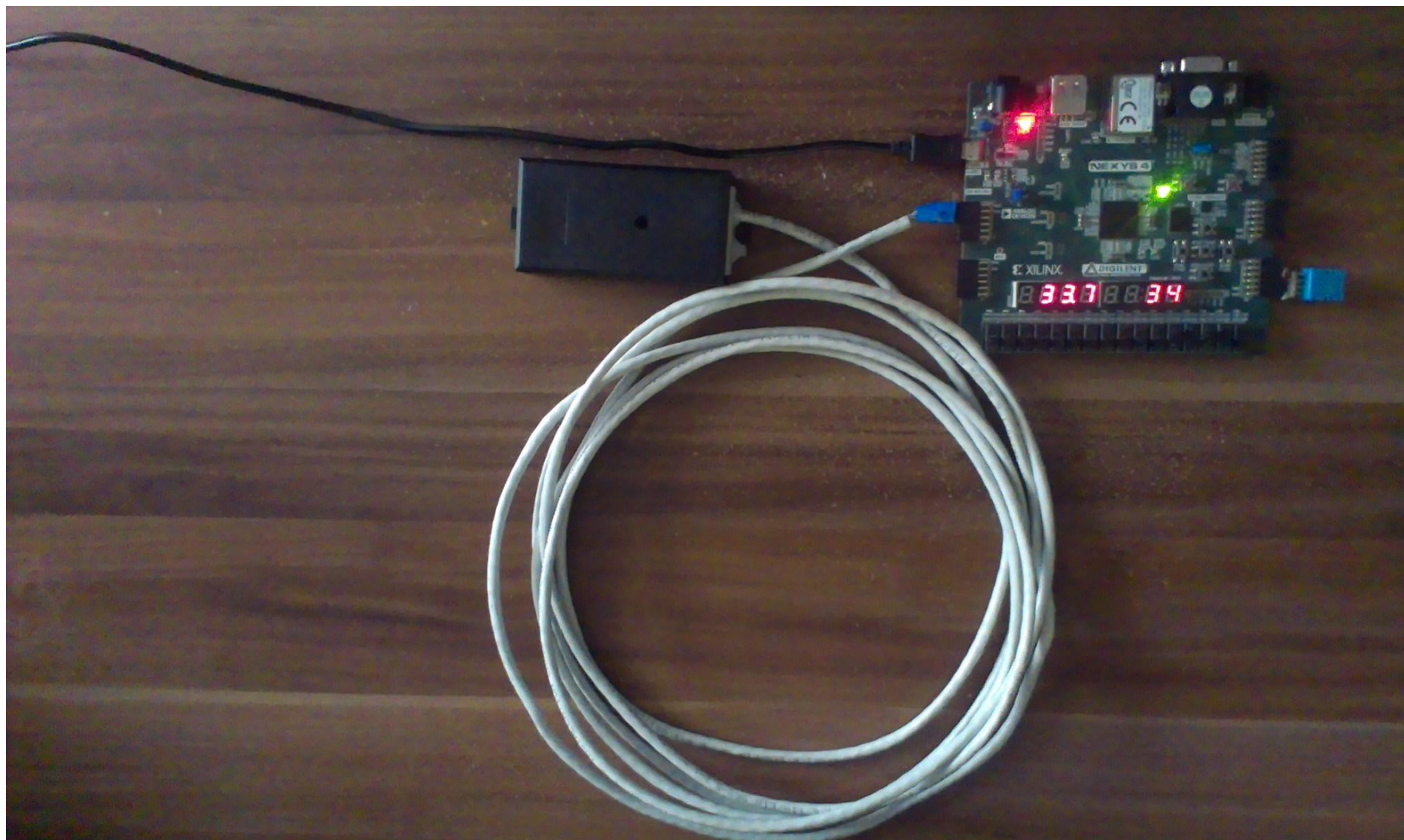
Příloha 1 - Blokové schéma meteostanice.....	50
Příloha 2 - Výsledná realizace domácí meteostanice - foto	51
Příloha 3 - Detail krabičky s externími senzory - foto	52

Obsah přiloženého CD

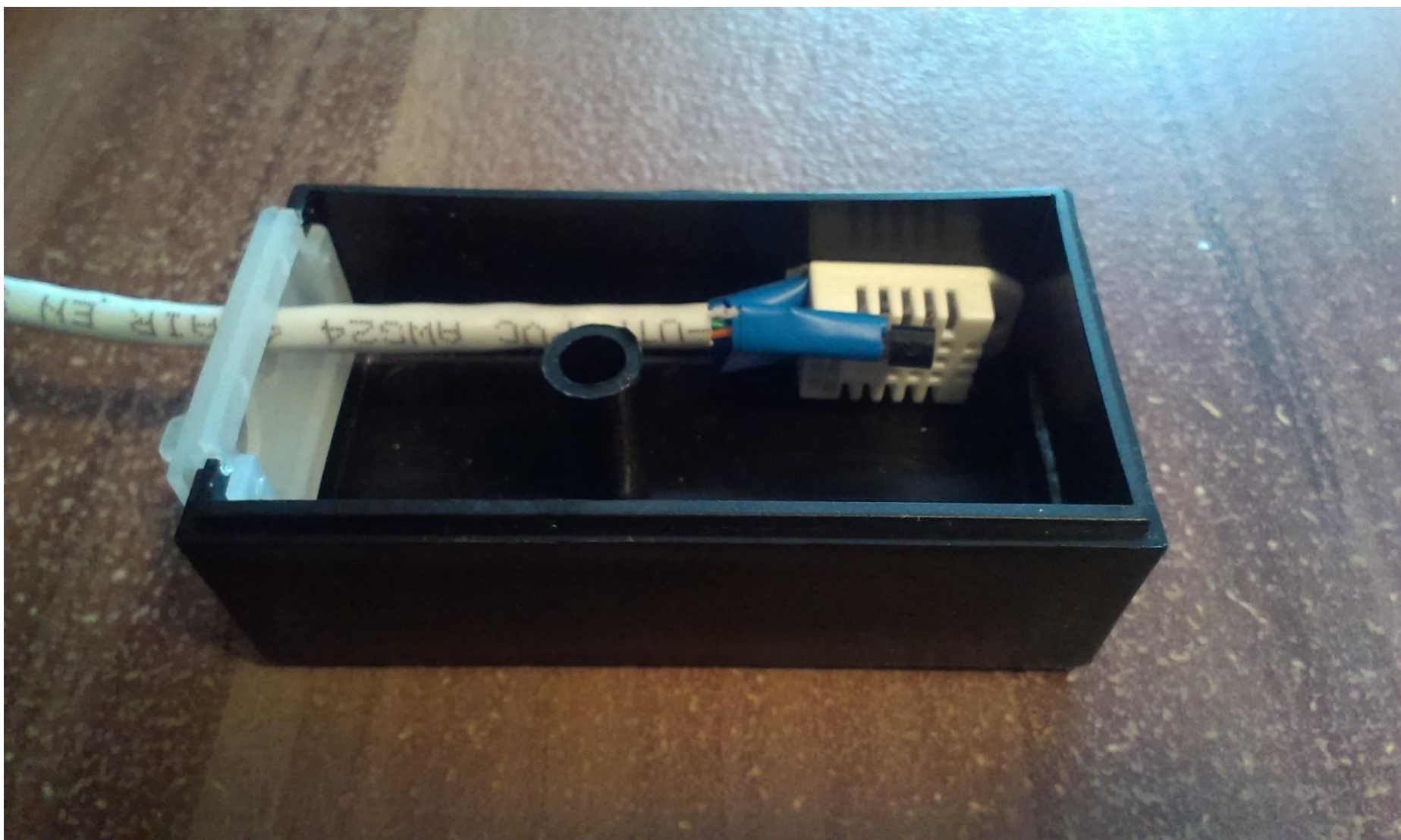
Gregar_Pavel.pdf	- text této práce
Datasheets	- složka s použitými katalogovými listy
Ovladače	- složka s potřebnými ovladači
- jSSC-2.8.0-Release	- složka s kompletní knihovnou jSSC
- CDM v2.12.00	- ovladač pro virtualizaci sériového rozhraní pro OS Windows
Meteostanice_PC	- složka s programem pro PC
- Meteostanice_Nexys4.jar	- program „Meteostanice Nexys4“
- lib	- složka s knihovnou jSSC
- Projekt.rar	- archiv s projektem pro <i>Netbeans</i>
- README.txt	- popis programu „Meteostanice Nexys4“
Meteostanice_VHDL	- složka s programem pro přípravu <i>Nexys4</i>
- Meteostanice_SPI.mcs	- konfigurační soubor pro paměť QSPI
- schematic.bin	- konfigurační soubor pro hradlové pole
- Projekt.rar	- archiv s projektem pro <i>Xilinx ISE 14.7</i>
Naměřené hodnoty	- složka s naměřenými hodnotami z testovacího režimu v <i>csv</i> souborech



Příloha 1 - Blokové schéma meteostanice



Příloha 2 - Výsledná realizace domácí meteostanice - foto



Příloha 3 - Detail krabičky s externími senzory - foto

