



**Fakulta Elektrotechnická**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Bakalářská práce**

# **Komunikace se senzory typu 1-Wire připojenými k přípravku DE10-Lite v jazyce VHDL**

**Stanislav Knaizl**

**Studijní program:**  
**Elektronika a komunikace (BP77)**

**Vedoucí práce:**  
**Ing. Pavel Lafata, Ph.D.**

**Praha, 2023**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Knaizl** Jméno: **Stanislav** Osobní číslo: **498873**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Komunikace se senzory typu 1-Wire připojených k přípravku DE10-Lite v jazyce VHDL**

Název bakalářské práce anglicky:

**1-Wire Sensor Communication Using DE10-Lite Kit in VHDL**

Pokyny pro vypracování:

Nastudujte komunikační sběrnici typu 1-Wire, její parametry a seznamte se zejména se senzory pro měření teploty, tlaku a vlhkosti, např. DS18B20, DHT11 a DHT22 apod. Navrhněte a realizujte připojení alespoň 2 těchto senzorů k přípravku DE10-Lite s FPGA MAX10. V jazyce VHDL vytvořte knihovny a moduly pro komunikaci s těmito senzory s využitím sběrnice typu 1-Wire. Využijte další prvky přípravku – tlačítka, přepínače a segmentové displeje pro ovládání senzorů a vyčítání naměřených hodnot, které vhodně zobrazujte pomocí segmentových displejů na přípravku. K přípravku připojte jednoduchý piezo měnič a využijte jej jako jednoduchý alarm pro případ, že dojde k překročení hodnoty měřené veličiny mimo nastavený interval (např. teploty apod.).

Seznam doporučené literatury:

- [1] Lafata, P. - Hampl, P. - Pravda, M.: Digitální technika. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2011. 164 s. ISBN 978-80-01-04914-3.  
[2] Pinker, J. - Poupá, M.: Číslicové systémy a jazyk VHDL. Praha : BEN - technická literatura, 2006. 349 s. ISBN 80-7300-198-5.  
[3] Ashender, P., J.: The VHDL Cookbook [online]. Dostupné z:  
<https://tams-www.informatik.uni-hamburg.de/vhdl/doc/cookbook/VHDL-Cookbook.pdf>.  
[4] Terasic: DE10-Lite User Manual [online]. Dostupné z:  
<https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/portal/dsn/42/doc-us-dsnbk-42-2912030810549-de10-lite-user-manual.pdf>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Pavel Lafata, Ph.D. katedra telekomunikační techniky FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **27.01.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

Ing. Pavel Lafata, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



## **ANOTACE**

Práce se zabývá komunikací s digitálními senzory teploty a vlhkosti za pomoci FPGA. Cílem bylo navrhnout a vytvořit systém pro komunikaci se senzorem teploty DS18B20 po sériové sběrnici 1-Wire a senzorem teploty a vlhkosti DHT11. Komunikace s oběma senzory byla realizována na vývojovém kitu pro FPGA MAX10 DE10-Lite s využitím jazyka VHDL. Změřené hodnoty jsou zobrazovány pomocí 7segmentových displejů a v případě překročení stanovených hodnot teploty nebo vlhkosti je systém vybaven alarmem v podobě piezoelektrického bzučáku.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

MAX10 DE10-Lite, VHDL, FPGA, DS18B20, DHT11, sběrnice 1-Wire, digitální senzory



## **ABSTRACT**

The topic of this thesis is communication with digital sensors using FPGA. The goal was to design and implement a system for communication with the DS18B20 temperature sensor on the 1-Wire bus and the DHT11 temperature and humidity sensor. The system was implemented on an FPGA development kit MAX10 DE10-Lite in VHDL. The measured data is being displayed on 7 segment displays and the system is equipped with a piezoelectric buzzer alarm in case of the temperature or humidity exceeding the set values.

## **KEYWORDS**

MAX10 DE10-Lite, VHDL, FPGA, DS18B20, DHT11, 1-Wire bus, digital sensors





## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce, Ing. Pavlu Lafatovi, Ph.D., za vedení práce, konzultace a poskytnutí materiálů. Dále bych chtěl poděkovat svým nejbližším za podporu a zázemí při studiu a hlavně při psaní této práce.



## PROHLÁŠENÍ

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

V Praze dne 20. května 2023

---

Stanislav Knaizl



# Obsah

<b>Seznam obrázků</b>	<b>XV</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>XVII</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 FPGA</b>	<b>3</b>
<b>3 MAX10 DE10-Lite</b>	<b>5</b>
<b>4 Jazyk VHDL</b>	<b>7</b>
<b>5 DS18B20</b>	<b>9</b>
5.1 Sběrnice 1-Wire . . . . .	10
<b>6 DHT11</b>	<b>13</b>
6.1 Sběrnice DHT11 . . . . .	14
<b>7 Použitý software a nástroje</b>	<b>15</b>
<b>8 Komunikace se senzorem DS18B20</b>	<b>17</b>
8.1 Příkazy pro komunikaci s DS18B20 . . . . .	18
8.2 Komponenty pro komunikaci s DS18B20 . . . . .	18
8.2.1 Zápis na sběrnici . . . . .	18
8.2.2 Řízení komunikace . . . . .	19
8.2.3 Ukládání teploty . . . . .	19
8.3 Testování komunikace s DS18B20 . . . . .	20
8.4 Výstup senzoru DS18B20 . . . . .	21
<b>9 Komunikace se senzorem DHT11</b>	<b>23</b>
9.1 Komponenty pro komunikaci s DHT11 . . . . .	24
9.1.1 Časování komunikace . . . . .	24
9.1.2 Ukládání dat . . . . .	24
9.2 Testování komunikace s DHT11 . . . . .	25
9.3 Výstup senzoru DHT11 . . . . .	25
<b>10 Spojení systému</b>	<b>27</b>
10.1 Hodinový signál . . . . .	28
10.2 Zobrazování na 7segmentových displejích . . . . .	28
10.2.1 Převod binárních dat na BCD . . . . .	28
10.2.2 Zobrazení BCD na 7segmentových displejích . . . . .	29
10.3 Alarm . . . . .	30

<b>11 Závěr</b>	<b>31</b>
<b>Použité zdroje</b>	<b>33</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>35</b>

## Seznam obrázků

2.1	Struktura PLA. Převzato z [1]. . . . .	3
3.1	Blokové schéma vývojového kitu MAX10 DE10-Lite. Převzato z [3]. . . . .	5
5.1	Parazitní napájení senzoru DS18B20. Převzato z [5]. . . . .	10
5.2	Struktura SRAM paměti senzoru DS18B20. Převzato z [5]. . . . .	10
5.3	Princip sběrnice s otevřeným kolektorem . . . . .	11
6.1	Časový diagram komunikace se senzorem DHT11. Převzato z [7]. . . . .	14
8.1	Blokové schéma systému pro komunikaci s DS18B20. . . . .	17
8.2	Průběh komunikace se senzorem DS18B20. . . . .	17
8.3	Simulace komunikace s DS18B20. . . . .	20
8.4	Záznam komunikace s DS18B20. . . . .	20
8.5	Zobrazení změřené teploty ze senzoru DS18B20. . . . .	21
9.1	Blokové schéma systému pro komunikaci s DHT11. . . . .	23
9.2	Průběh komunikace s DHT11. . . . .	23
9.3	Záznam komunikace se senzorem DHT11. . . . .	25
9.4	Zobrazení změřené teploty a relativní vlhkosti ze senzoru DHT11. . . . .	25
10.1	Blokové schéma systému pro komunikaci se senzory. . . . .	27
10.2	Schéma zapojení. . . . .	27
10.3	Převod binární hodnoty na BCD. . . . .	29
10.4	7segmentový displej. Převzato z [3] . . . . .	30





## Seznam tabulek

5.1	Parametry měření senzoru DS18B20 [5] . . . . .	9
6.1	Parametry měření senzoru DHT11 [7] . . . . .	13
10.1	Pravdivostní tabulka převodníku BCD na 7segmentový displej . . . . .	30



## Seznam zkratek

**A/D** Analogově-Digitální.  
**ASIC** Application Specific Integrated Circuit.  
**BCD** Binary Coded Decimal.  
**CRC** Cyclic Redundancy Check.  
**D/A** Digitálně-Analogový.  
**DSP** Digital Signal Processing.  
**FPGA** Field Programmable Gate Array.  
**GPIO** General Purpose Input/Output.  
**IEEE** Institute of Electrical and Electronic Engineers.  
**LUT** Look Up Table.  
**NTC** Negative Temperature Coefficient.  
**PLA** Programmable Logic Array.  
**PLL** Phase-Locked Loop.  
**RH** Relative Humidity.  
**SRAM** Static Random Access Memory.  
**VGA** Video Graphics Array.  
**VHDL** VHSIC Hardware Description Language.  
**VHSIC** Very High Speed Integrated Circuits.



# 1 Úvod

FPGA (angl. *Field Programmable Gate Array*) je jedním z hlavních nástrojů pro prototypování a testování digitálních systémů. Tato práce se zabývá realizací komunikace mezi FPGA a digitálními senzory teploty a vlhkosti po sériových sběrnících.

Cílem této práce bylo navrhnout a vytvořit systém pro komunikaci se senzorem teploty DS18B20, který komunikuje po sériové sběrnici 1-Wire, a se senzorem teploty a vlhkosti DHT11, který využívá své vlastní sériové komunikace. Dále měl být tento systém vybaven alarmem v podobě piezoelektrického bzučáku pro případ překročení měřených hodnot mimo stanovený interval. Systém měl být realizován na vývojovém kitu pro FPGA MAX10 DE10-Lite s využitím jazyka VHDL a měl využívat prvky tohoto kitu jako 7segmentové displeje pro zobrazení naměřených hodnot.

V teoretické části jsou popsány základy fungování FPGA, výbava použitého kitu DE10-Lite a základy jazyka VHDL. Dále jsou zde rozebírány vlastnosti senzorů DHT11 a DS18B20 a jejich příslušných sběrnic. V praktické části jsou pak znalosti z teoretické části využity pro realizaci zadání. Jsou zde popisovány realizace komunikace s jednotlivými senzory, zobrazování na 7segmentových displejích a funkce alarmu.

Výstupem praktické části této práce jsou knihovny pro komunikaci s jednotlivými senzory v jazyce VHDL. Ty lze pak využít např. pro začlenění senzorů do systému pro internet věcí na kitu DE10-Lite.



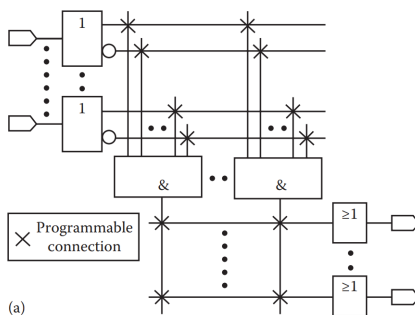
## 2 FPGA

FPGA neboli programovatelné hradlové pole je typem programovatelného logického obvodu. Slouží k návrhu a realizaci hardwarové implementace logických funkcí. Mohou být využita jako prototypovací platforma pro aplikačně specifické integrované obvody (ASIC), ale i jako konkrétní řešení pro zabudované systémy.

Dle [1] stojí využití FPGA v zabudovaných systémech tam, kde je potřeba nízká spotřeba a vysoká výkonnost jako u ASIC, ale zároveň je vyžadována flexibilita obdobná softwarovému řešení, kde se používají obecné procesory. Obvody FPGA tyto podmínky splňují, protože jde o hardwarové řešení, které lze optimalizovat z hlediska spotřeby a zároveň je možné je překonfigurovat za běhu jako u softwarového řešení.

Předchůdcem FPGA byly obvody PLA (angl. *Programmable Logic Array*), které byly dle [1] tvořeny maticemi logických hradel a propojek. Konfigurace PLA pak probíhala vypalováním propojek mezi jednotlivými vodiči tak, aby byla vytvořena potřebná logická funkce. Tato zařízení mohla být tedy nakonfigurována pouze jednou. Struktura obvodu PLA je naznačena na obrázku 2.1.

Funkce FPGA je dle [2] založena na odlišném principu. Základní myšlenkou je definice logické funkce za pomoci paměťových bloků. Tyto paměťové bloky se nazývají LUT (angl. *Look Up Table*) neboli vyhledávací tabulka a představují univerzální logické bloky. Dále může FPGA obsahovat i speciální logické bloky jako násobičky, multiplexory, klopné obvody, atd. Logické bloky jsou pak vzájemně propojeny systémem sběrnic, které jsou vedené mezi těmito bloky a jejich propojení je ovládáno pomocí maticových přepínačů. Dále mají FPGA dle [1] často integrované další periferie jako A/D a D/A převodníky, bloky DSP (angl. *Digital Signal Processing*) a bloky pro správu hodinového signálu, např. fázové závěsy.



**Obr. 2.1:** Struktura PLA. Převzato z [1].



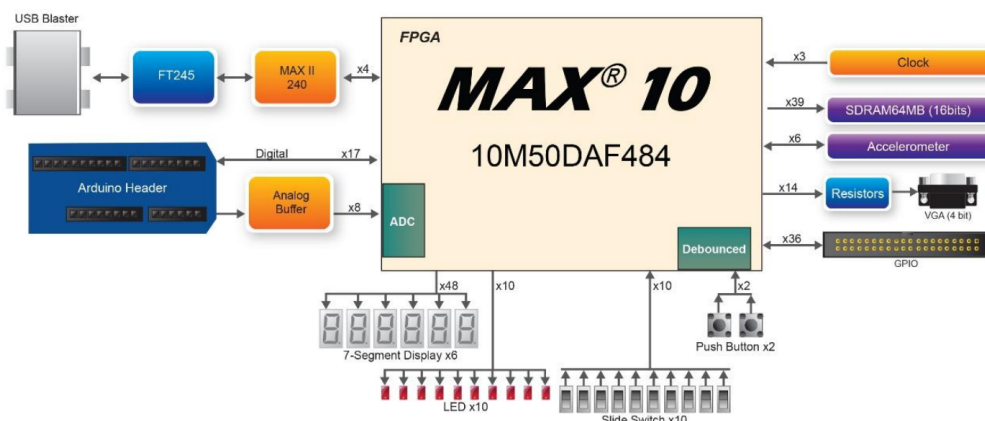


### 3 MAX10 DE10-Lite

MAX10 DE10-Lite je vývojový kit od výrobce Terasic. Jeho hlavní částí je FPGA MAX10 10M50DAF484C7G od firmy Altera. Toto FPGA je dle [3] vybaveno 50000 logických buněk, 2 integrovanými A/D převodníky, 4 fázovými závěsy (PLL) a dalšími integrovanými periferiemi.

Kit je vybaven 40 GPIO (angl. *General Purpose Input/Output*) konektory, rozhraním pro připojení Arduino UNO R3, 4bitovým A/D převodníkem pro VGA (angl. *Video Graphics Array*) a příslušným konektorem. Na kitu je také osazen tříosý akcelerometr a zdroj hodinových signálů 24 MHz pro USB, 10 MHz pro A/D převodníky a 2 50MHz signály pro uživatelskou logiku.

Z hlediska uživatelského rozhraní je kit vybaven 10 LED, 10 přepínači, 2 tlačítky s potlačením záchvěvů (angl. *bouncing*) a 6 7segmentovými displeji. K programování tohoto kitu je na něm umístěn port USB typu B. Na obrázku 3.1 je uvedeno blokové schéma s danými periferiemi.



Obr. 3.1: Blokové schéma vývojového kitu MAX10 DE10-Lite. Převzato z [3].



## 4 Jazyk VHDL

Jazyk VHDL (angl. *VHSIC Hardware Description Language*) je jazyk sloužící k popisu struktury a funkce digitálních integrovaných obvodů a také k jejich simulaci. Dále se používá pro programování programovatelných hradlových polí. Dle [4] vznikl v 80. letech 20. století v USA v rámci programu VHSIC (angl. *Very High Speed Integrated Circuits*) a následně pro něj vznikla i norma IEEE (angl. *Institute of Electrical and Electronic Engineers*).

Omezením jazyka VHDL je podmínka tzv. syntetizovatelnosti. Ta je dle [2] dána tím, že překladač musí být schopný převést kód na zapojení pomocí logických hradel. Další omezení přináší vlastnosti hardwaru, pro který je kód psaný. Ačkoli by měl být univerzální, nemusí být realizovatelný na kterémkoli FPGA. Výjimkou z podmínky syntetizovatelnosti jsou dle [2] testovací programy (angl. *testbench*), které slouží k simulaci vstupních signálů a vyhodnocování výstupních signálů, protože vzhledem k tomu, že slouží pouze k simulaci, je není třeba hardwarově realizovat.

Výsledkem syntézy kódu v jazyce VHDL je tzv. netlist, který obsahuje seznam použitých hradel a logických buněk a jejich zapojení.



## 5 DS18B20

DS18B20 je digitální senzor teploty komunikující po sběrnici 1-Wire. Dle [5] ukládá hodnotu teploty s rozlišením 9–12 bitů podle uživatelského nastavení, kde první bit je znaménkový, následuje 7 bitů pro celočíselnou část teploty a zbylé bity obsahují neceločíselnou část teploty. Podle nastavení rozlišení se pak mění doba převodu. Parametry měření teploty jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Senzor lze napájet napětím 3–5,5 V, případně přímo ze sběrnice. V případě napájení ze sběrnice jde o tzv. parazitní napájení, kde není potřeba využívat vnější napájecí zdroj. Příklad využití parazitního napájení je uveden na obrázku 5.1, kde tranzistor spíná v době převodu teploty do digitální podoby.

Mezi další funkce tohoto senzoru patří alarm, který se spustí po překročení uživatelem nastavené minimální či maximální hodnoty teploty. Hranice pro alarm jsou 8bitové hodnoty, kde první bit je znaménkový. Dle [5] jsou uloženy spolu s nastavením rozlišení v napětově nezávislé paměti, zůstanou tedy uloženy i po odpojení napájecího napětí.

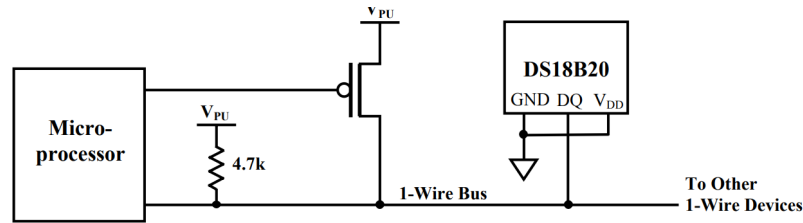
Senzor pro kontrolu správného převzetí dat generuje CRC (angl. *Cyclic Redundancy Check*) podle polynomu:

$$CRC = X^8 + X^5 + X^4 + 1. \quad (5.1)$$

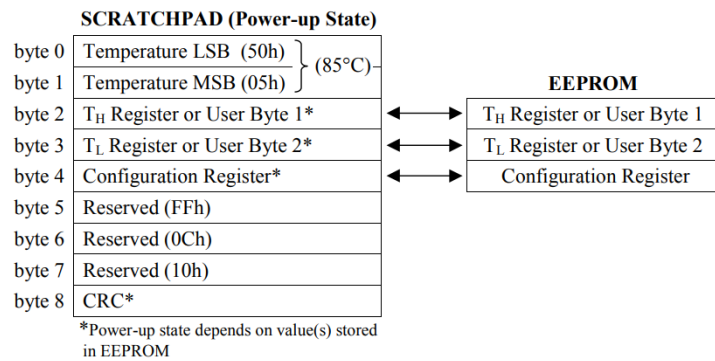
Tato hodnota je dle [5] uložena spolu s hodnotou teploty v 9bytové paměti typu SRAM (angl. *Static Random Access Memory*), kterou senzor postupně vypisuje při čtení. Dále jsou do této paměti při zapnutí senzoru předány hodnoty hranic pro alarm a nastavení rozlišení, aby uživatel mohl tyto hodnoty vyčíst. Struktura SRAM paměti senzoru DS18B20 je uvedena na obrázku 5.2.

**Tab. 5.1:** Parametry měření senzoru DS18B20 [5]

Rozsah měření	-55–125 °C
Přesnost v rozsahu -10–85 °C	±0,5 °C
Maximální doba převodu pro rozlišení 12 bitů	750 ms



Obr. 5.1: Parazitní napájení senzoru DS18B20. Převzato z [5].



Obr. 5.2: Struktura SRAM paměti senzoru DS18B20. Převzato z [5].

## 5.1 Sběrnice 1-Wire

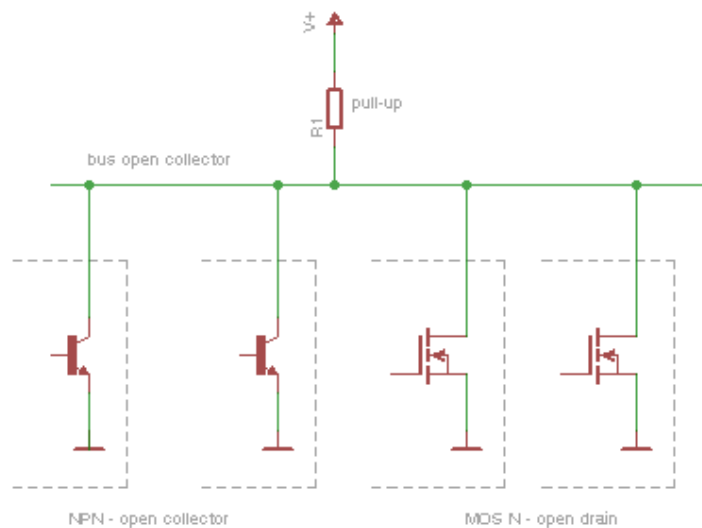
Sběrnice 1-Wire je sériová sběrnice navržená firmou Dallas Semiconductor. Jedná se o tzv. sběrnici s otevřeným kolektorem. Sběrnice s otevřeným kolektorem se vyznačuje tím, že je pomocí rezistoru připojena na napájecí napětí a je tedy v klidovém stavu nastavena do logické 1 viz obrázek 5.3. Komunikace pak probíhá tak, že zařízení na této sběrnici nastavují stav sběrnice do logické 0 po definovanou dobu.

Na sběrnici je vždy jedno zařízení, které dává příkazy ostatním připojeným zařízením. Toto zařízení se nazývá master. Další připojená zařízení příkazy pouze přijímají a případně odesílají svou odpověď. Tato zařízení se nazývají slave.

Dle [6] je možné na sběrnici připojit až 200 zařízení a maximální délka sběrnice je 150 m pro liniovou topologii. Při připojení více slave zařízení na sběrnici je třeba využít adresace. Každé zařízení má dle [7] výrobcem danou 64bitovou adresu, kde prvních 8 bitů je kód rodiny zařízení, dalších 48 bitů je unikátní kód zařízení a posledních 8 bitů je CRC. Pomocí adres může pak master oslovovat jednotlivá zařízení na sběrnici.

Sběrnice 1-Wire dle [5] rozlišuje 5 typů signálů.

- **Resetovací signál**, který se odešle tak, že master nastaví stav sběrnice do logické 0 po dobu delší než 470  $\mu\text{s}$ .
- **Prezenční pulz**, kdy slave nastaví sběrnici do logické nuly po dobu 60  $\mu\text{s}$  v časovém oknu po resetovacím pulzu.
- **Odeslání logické 1**, kdy master nastaví sběrnici do logické 0 po dobu kratší než 15  $\mu\text{s}$ .
- **Odeslání logické 0**, kdy master nastaví sběrnici do logické 0 po dobu 60  $\mu\text{s}$ .
- **Časové okno pro čtení**, kdy master nastaví sběrnici do logické 0 po dobu kratší než 15  $\mu\text{s}$  a následně slave buď převezme držení logické 0 po dobu 60  $\mu\text{s}$ , čímž odešle logickou 0, nebo ponechá sběrnici, aby se vrátila do klidového stavu, čímž odešle logickou 1.



Obr. 5.3: Princip sběrnice s otevřeným kolektorem





## 6 DHT11

DHT11 je digitální senzor teploty a relativní vlhkosti. Dle [7] využívá k měření vlhkosti odporový prvek a k měření teploty NTC (angl. *Negative Temperature Coefficient*) termistor. Hodnoty teploty a vlhkosti jsou měřeny celočíselně a jsou uloženy v podobě 8bitového čísla. Jednotkou pro teplotu je °C a pro vlhkost % RH (angl. *Relative Humidity*). Parametry pro měření jednotlivých veličin jsou uvedeny v tabulce 6.1. Senzor lze napájet napětím 3–5,5 V.

**Tab. 6.1:** Parametry měření senzoru DHT11 [7]

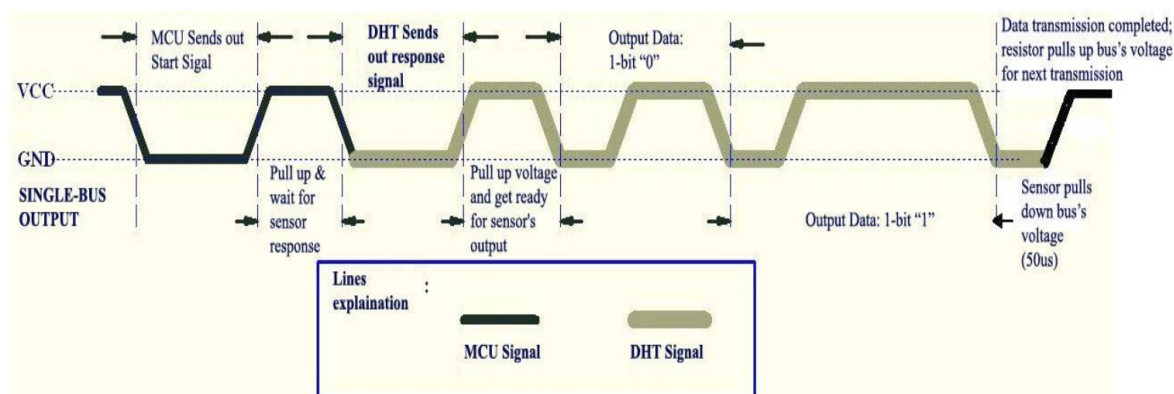
Měření vlhkosti	
Rozsah měření	20–90 %RH
Přesnost při 25 °C	±5 %RH
Doba odezvy při 25 °C	6 s
Měření teploty	
Rozsah měření	0–50 °C
Přesnost	±2 °C
Doba odezvy	6 s

## 6.1 Sběrnice DHT11

Pro odesílání změřených hodnoty využívá DHT11 obousměrné sériové master-slave sběrnice s otevřeným kolektorem. Dle [7] může tato sběrnice dosahovat 20 m při použití pull-up rezistoru o velikosti 5 k $\Omega$ .

Komunikace po této sběrnici je inicializována tím, že master, např. mikrokontrolér, nastaví sběrnici do logické 0 po dobu delší než 18 ms a poté následuje odpověď senzoru. Senzor nejprve odešle prezenční pulz, kde nastaví sběrnici do logické 0 po dobu 80  $\mu$ s a dalších 80  $\mu$ s ji ponechá v logické 1. Po prezenčním pulzu odešle senzor 40 datových bitů počínaje nejvyšším bitem. Každému bitu předchází nastavení logické 0 po dobu 50  $\mu$ s a poté ponechá sběrnici v logické 1 po dobu 26–28  $\mu$ s pro odeslání 0 nebo 70  $\mu$ s pro odeslání 1. Časový diagram této komunikace je zobrazen na obrázku 6.1.

Datové bity při komunikaci jsou uspořádány tak, že prvních 8 bitů je hodnota relativní vlhkosti, následuje 8 nulových bitů, následuje 8 bitů hodnoty teploty, následuje 8 nulových bitů a posledních 8 bitů je kontrolní součet.



Obr. 6.1: Časový diagram komunikace se senzorem DHT11. Převzato z [7].

## 7 Použitý software a nástroje

Hlavním softwarovým nástrojem pro realizaci praktické části byl Quartus Prime Lite. Jde o volně dostupný program od firmy Intel, který umožňuje psaní kódu v jazyce VHDL, syntézu kódu a také simulaci. Quartus Prime Lite byl zvolen zejména proto, že obsahuje přímou podporu vývojového kitu DE10-Lite a zajišťuje tedy, že syntetizovaný kód bude s kitem kompatibilní. Ze simulačních programů podporovaných v Quartus Prime Lite byl pro simulace zvolen Modelsim od firmy Altera, protože je volně dostupný.

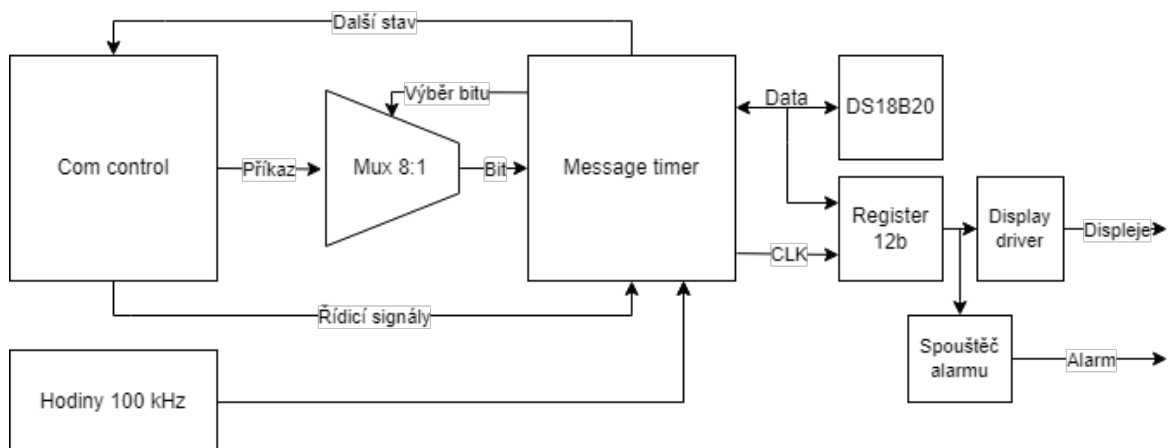
K pořízení záznamů komunikace na sběrnících byl použit USB osciloskop OWON VDS1022 připojený k počítači.



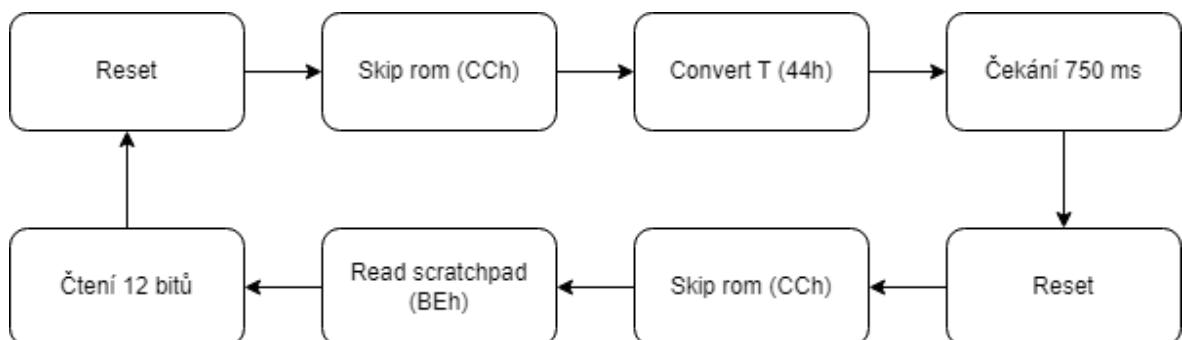
## 8 Komunikace se senzorem DS18B20

Hlavním problémem pro realizaci komunikace se senzorem DS18B20 bylo správné časování šířky pulzů a mezer mezi nimi, dále pak správné řazení bitů a příkazů potřebné pro protokol sběrnice 1-Wire. Samotné čtení dat bylo pro realizaci jednoduché, protože časové okno uvádí vždy master a pro přečtení hodnoty bitu stačí ve správný okamžik vzorkovat sběrnici.

Systém pro komunikaci se senzorem DS18B20 je popsán blokovým schématem na obrázku 8.1. Jednotlivé komponenty budou popsány v následujících podkapitolách. Průběh komunikace s jedním senzorem je popsán blokovým schématem na obrázku 8.2. Jednotlivé příkazy jsou popsány v podkapitole 8.1.



Obr. 8.1: Blokové schéma systému pro komunikaci s DS18B20.



Obr. 8.2: Průběh komunikace se senzorem DS18B20.

## 8.1 Příkazy pro komunikaci s DS18B20

Příkazy, použité pro komunikaci s jedním senzorem jsou *skip rom*, *convert T* a *read scratchpad*. Další příkazy a jejich popis je uveden v datasheetu výrobce [5].

Příkaz *skip rom* (CC hexadecimálně) přeskočí část komunikačního protokolu, kdy se vyčítá a zapisuje obsah paměti senzoru. Ta obsahuje například adresu senzoru, nastavení rozlišení atd. Tento příkaz se je možné použít pouze při použití jednoho senzoru na sběrnici a usnadňuje komunikaci. V případě použití více senzorů je třeba využít adresace.

Příkaz *convert T* (44 hexadecimálně) zahájí převod teploty senzoru do digitálního tvaru.

Příkaz *read scratchpad* (BE hexadecimálně) zahájí čtení teploty z paměti senzoru, po něm následují časová okna na čtení.

## 8.2 Komponenty pro komunikaci s DS18B20

### 8.2.1 Zápis na sběrnici

Hlavní komponentou pro komunikaci se senzorem DS18B20 je *message timer*. Její hlavní funkcí je zápis pulzu požadované délky na sběrnici. Tedy zápisu logické 1 nebo uvedení časového okna pro čtení v podobě pulzu délky 10  $\mu$ s, zápisu logické 0 v podobě pulzu délky 60  $\mu$ s nebo odeslání resetovacího signálu. V jádru jde tedy o děličku frekvence, jejíž střída je ovládána na základě řídicích signálů z komponenty *com control* a vstupního bitu.

Další funkcí této komponenty je přepínání bitu po úspěšném zápisu předchozího bitu, vydání pokynu k přepnutí stavu komponenty *com control* po dokončení aktuálního stavu a předání signálu k aktualizaci zobrazovaných dat po ukončení čtení. Dále také poskytuje hodinový signál pro 12bitový posuvný registr *register 12b* tak, aby vzorkoval sběrnici ve správný čas v případě, že dochází ke čtení dat ze senzoru.

### ■ 8.2.2 Řízení komunikace

Komunikace je řízena pomocí komponenty *com control*. Jde o stavový automat, který obsahuje řídicí signály pro message timer a příkazy pro zápis na sběrnici. Stavy, ve kterých se může tento stavový automat nacházet, jsou reset, zápis příkazu, čekání na konverzi teploty a čtení ze sběrnice.

Ve stavu reset dojde k odeslání resetovacího pulzu a následuje časové okno pro prezenční pulz. Ve stavu zápisu příkazu je příkaz ve formátu 8bitového logického vektoru přiveden na vstup multiplexoru *mux*, který jej pak bit po bitu dává na vstup komponenty message timer. Ve stavu čekání na konverzi teploty je po dobu 750 ms pozastavena činnost systému, než proběhne převod teploty v senzoru. Ve stavu čtení ze sběrnice je postupně čteno 12 bitů ze senzoru.

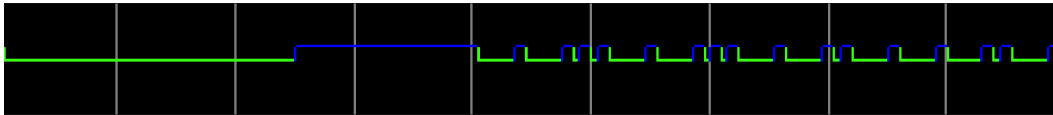
### ■ 8.2.3 Ukládání teploty

Teplota vyčtená ze senzoru se bit po bitu ukládá do posuvného registru *register 12b*. Ten je tvořený 12 klopnými obvody typu D uspořádanými tak, aby data přijímaná ze senzoru od nejnižšího bitu byla po přijetí správně seřazena. Tedy na sběrnici je připojen klopný obvod představující nejvyšší bit registru.

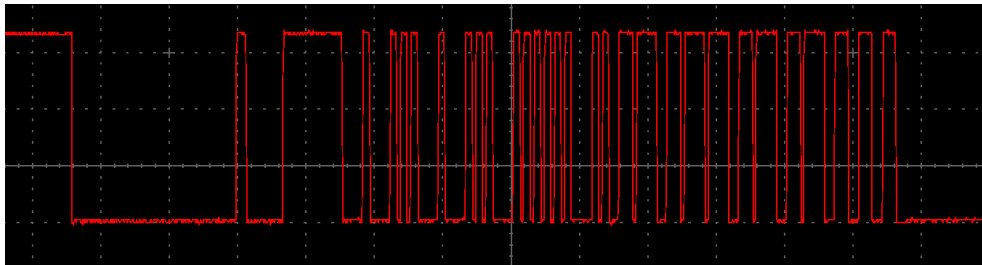
### 8.3 Testování komunikace s DS18B20

Testování systému probíhalo nejprve pomocí simulátoru Modelsim v prostředí Quartus Prime Lite, kde byl simulován průběh výstupu systému. Část simulovaného průběhu je uvedena na obrázku 8.3, kde modrá část znamená stav vysoké impedance, tedy sběrnice je ponechána v klidovém stavu, a zelená část jsou pulzy, kdy je výstup nastavován do logické 0. V daném průběhu je simulována první polovina komunikačního cyklu, tedy resetovací pulz, příkaz *skip rom* (11001100) a příkaz *convert T* (01000100).

Testování po úspěšné simulaci probíhalo pomocí osciloskopu OWON VDS1022 připojenému k počítači. Na obrázku 8.4 je zobrazen časový průběh napětí na sběrnici v druhé polovině komunikačního cyklu s DS18B20. Vlevo začíná resetovací pulz, následuje příkaz *skip rom* (11001100), dále příkaz *read scratchpad* (10111110) a nakonec 12 časových oken pro čtení bitů ze senzoru i s odpovědí senzoru (000101011010). Délka jednoho dílku je 200  $\mu$ s.



Obr. 8.3: Simulace komunikace s DS18B20.

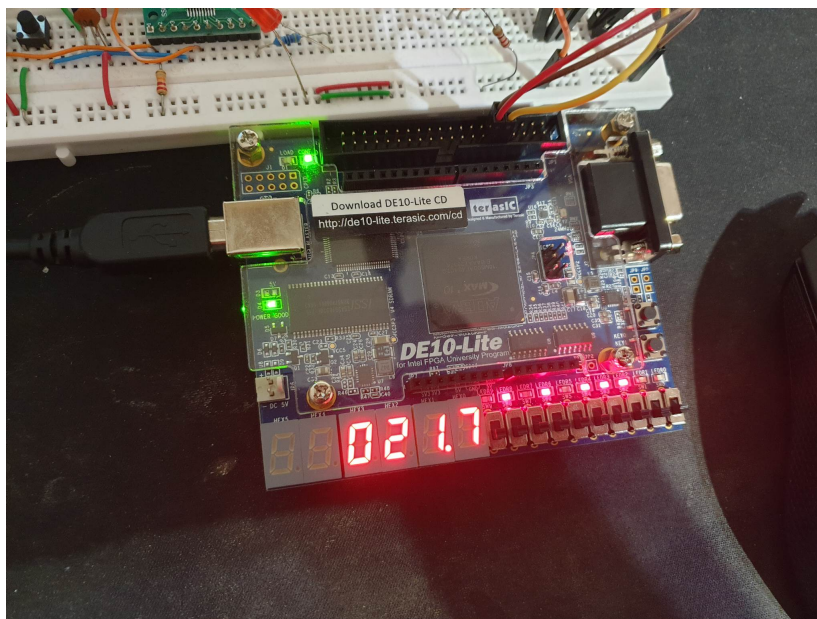


Obr. 8.4: Záznam komunikace s DS18B20.



## 8.4 Výstup senzoru DS18B20

Výstupem senzoru je 12bitová hodnota teploty ve formátu s pevnou desetinnou čárkou. Ta je zobrazena na 7segmentových displejích s rozlišením na 1 desetinné místo. Na obrázku 8.5 je zobrazen výstup na 7segmentové displeje. Pátý displej je rezervovaný pro znaménko v případě, že teplota je záporná. V tomto případě je na LED nad spínači zobrazena hodnota v binární podobě pro kontrolu převodu binární hodnoty na zobrazované číslo.



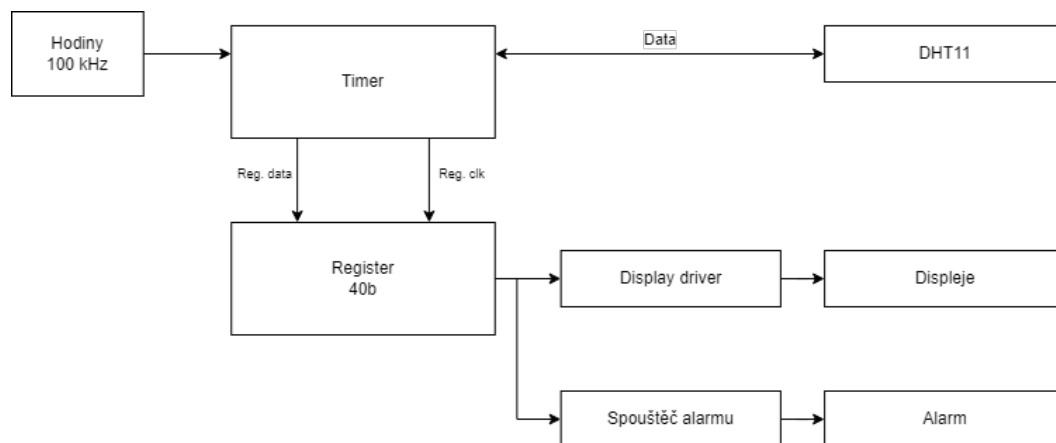
Obr. 8.5: Zobrazení změřené teploty ze senzoru DS18B20.



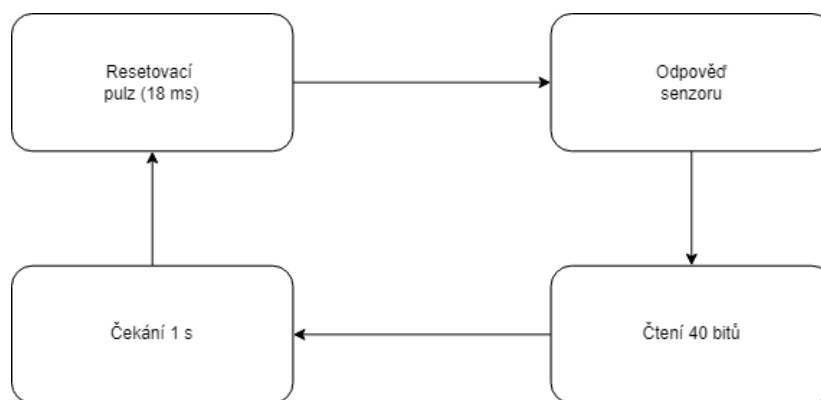
## 9 Komunikace se senzorem DHT11

Hlavním problémem pro komunikaci se senzorem DHT11 bylo čtení dat ve formě pulzů dané délky. Časování bylo potřeba nastavit tak, aby bylo možné reagovat na příchozí data, protože narozdíl od senzoru DS18B20 nemá senzor DHT11 pevnou délku časových oken pro jednotlivé bity, ale odesílá celý obsah registru najednou a za běhu je třeba vyhodnotit délku pulzu a převést ji na datový bit.

Blokové schéma systému pro komunikaci s DHT11 je uvedeno na obrázku 9.1. Jednotlivé komponenty jsou popsány v následujících podkapitolách. Průběh komunikace se senzorem DHT11 je uveden v blokovém schématu na obrázku 9.2.



Obr. 9.1: Blokové schéma systému pro komunikaci s DHT11.



Obr. 9.2: Průběh komunikace s DHT11.

## 9.1 Komponenty pro komunikaci s DHT11

### 9.1.1 Časování komunikace

Komponenta *timer* je nejdůležitější částí systému, protože zajišťuje správné časování komunikace. Její hlavní funkcí je zápis a čtení ze sběrnice. Jejím jádrem jsou hlavní a vedlejší čítač, hlavní čítač slouží k obecnému časování komunikace, vedlejší čítač pak k měření délky pulzů.

Ve stavu komunikace, kdy dochází k odeslání resetovacího pulzu, nastavuje sběrnici do logické 0 po dobu 18 ms. Následuje očekávání odezvy senzoru. Pokud není senzor detekován, vrátí se do stavu odesílání resetovacího pulzu. V těchto stavech je aktivní pouze hlavní čítač.

V případě úspěšné detekce senzoru přechází do stavu čtení dat. V tomto stavu se střídá aktivita čítačů. Pokud je sběrnice v logické 1, je hlavní čítač nulován a vedlejší čítač měří šířku příchozího pulzu. Pokud je sběrnice v logické 0, je aktivní hlavní čítač, dojde k vyhodnocení délky příchozího pulzu a vedlejší čítač je vynulován. Po vyhodnocení šířky pulzu je na datové propojení s posuvným registrem přivedena příslušná logická hodnota a je vyslán hodinový pulz pro registr. Toto se opakuje dokud nedojde k přečtení všech 40 bitů ze senzoru.

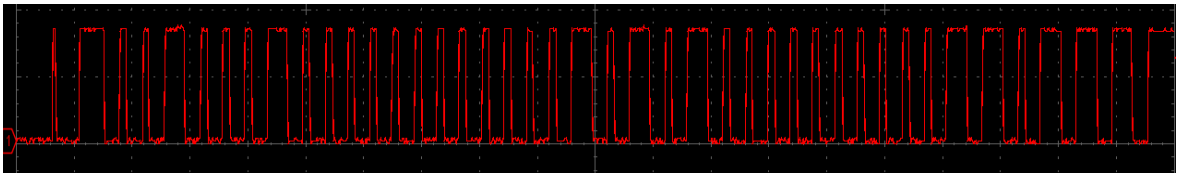
Ve stavu čekání je pak vydán příkaz k přivedení dat uložených v registru na vstup ovladače displejů a aktualizaci zobrazovaných dat.

### 9.1.2 Ukládání dat

K ukládání dat slouží 40bitový posuvný registr *register 40b*. Ten je tvořený 40 klopnými obvody typu D, které jsou uspořádány tak, že na datový vstup je připojen klopný obvod reprezentující nejnižší bit, protože senzor DHT11 odesílá data od nejvyššího bitu. Tento registr je také vybaven třístavovým výstupem, tedy uložená data se na výstupu aktualizují až po vydání příkazu k jejich předání.

## 9.2 Testování komunikace s DHT11

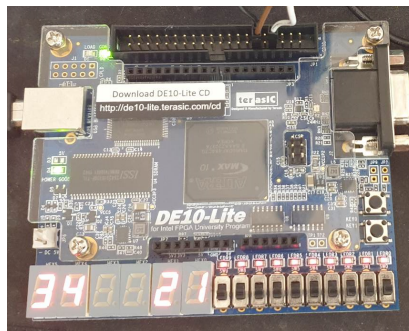
Vzhledem k charakteru komunikace se senzorem DHT11, kdy master aktivně odesílá pouze resetovací pulz, nebylo možné systém simulovat a probíhalo testování pouze měřením průběhu komunikace na sběrnici osciloskopem. Pro testování byl systém nastaven tak, aby proběhl pouze jeden cyklus komunikace a následně byl porovnán naměřený průběh na osciloskopu se zobrazenými hodnotami. Takto byly postupně odstraněny chyby ve vyhodnocení délky pulzu a v počtu čtených bitů. Záznam průběhu komunikace z osciloskopu je uveden na obrázku 9.3. V záznamu je zleva konec resetovacího pulzu, odpověď senzoru, 8 bitů pro hodnotu vlhkosti (00100010), 8 nulových bitů, 8 bitů pro hodnotu teploty (00010101), 8 nulových bitů a 8 paritních bitů (00110111). Délka jednoho dílku je 200  $\mu$ s.



Obr. 9.3: Záznam komunikace se senzorem DHT11.

## 9.3 Výstup senzoru DHT11

Výstupem senzoru DHT11 jsou 8bitové celočíselné hodnoty teploty a relativní vlhkosti. Ty jsou zobrazovány na 7segmentových displejích. Na obrázku 9.4 je zobrazen výstup na 7segmentové displeji. Na prvních 2 je zobrazena hodnota relativní vlhkosti a na posledních 2 je zobrazena hodnota teploty.

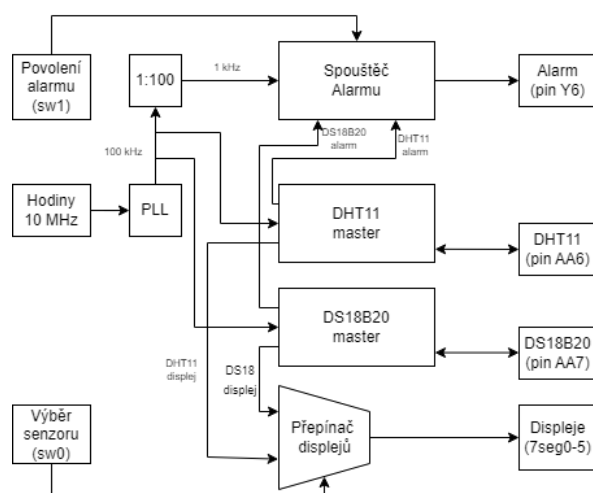


Obr. 9.4: Zobrazení změřené teploty a relativní vlhkosti ze senzoru DHT11.

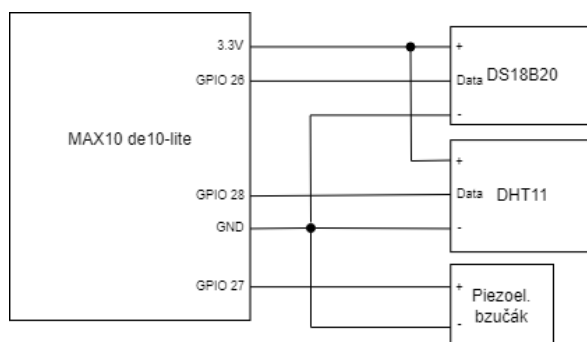


## 10 Spojení systému

Blokové schéma zapojení systému pro komunikaci s DS18B20 a DHT11 je uvedeno na obrázku 10.1. Pomocí přepínače sw0 lze přepínat, ze kterého senzoru jsou zobrazována data, přepínačem sw1 lze povolit nebo vypnout funkci alarmu. Data jsou zobrazována na 7segmentových displejích osazených na kitu DE10-Lite. Funkce hodinového obvodu, zobrazování na 7segmentových displejích a alarmu jsou popsány v dalších podkapitolách. Schéma zapojení součástek ke kitu je uvedeno na obrázku 10.2.



Obr. 10.1: Blokové schéma systému pro komunikaci se senzory.



Obr. 10.2: Schéma zapojení.

## 10.1 Hodinový signál

Vzhledem k době trvání jednotlivých signálů sběrnice 1-Wire popsaných v podkapitole 5.1 a k časování sběrnice DHT11 popsaném v podkapitole 6.1 byl zvolen hodinový signál s periodou  $10\ \mu\text{s}$  a tedy frekvencí 100 kHz. Všechny signály na těchto sběrnicích už jsou v násobcích  $10\ \mu\text{s}$  nebo velmi blízké. Pro přesné časování pak stačí pouze čítat náběžné hrany 100kHz hodinového signálu.

Vývojový kit DE10-Lite obsahuje oscilátory s frekvencí 10 MHz a 50 MHz. Pro účel komunikace byl zvolen oscilátor s frekvencí 10 MHz a na cílovou frekvenci 100 kHz byl upraven pomocí fázového závěsu (PLL), který je poskytován jako knihovná komponenta v prostředí Quartus Prime.

## 10.2 Zobrazování na 7segmentových displejích

Pro zobrazení dat ze senzorů na displejích je třeba nejprve binární hodnotu uloženou v příslušném registru převést na BCD (angl. *Binary Coded Decimal*) a každou z číslic kódovanou pomocí BCD je pak možné kombinační logikou zobrazit na 7segmentových displejích.

### 10.2.1 Převod binárních dat na BCD

Převod binárních dat na BCD probíhá v cyklu. Každá pozice zobrazované hodnoty je reprezentována 4bitovým číslem. V cyklu je pak porovnáváno vstupní číslo s danou pozicí, pokud je vstupní číslo vyšší, odečte se od něj násobek 10 odpovídající dané pozici a cyklus pokračuje. Pokud je vstupní číslo menší, pokračuje se nejbližší nižší pozici a cyklus pokračuje, dokud není vstupní číslo menší než nejnižší pozice. Příklad kódu pro konverzi je uveden na obrázku 10.3, kde *int1* je vstupní číslo, *int1converted* značí konec převodu vstupního čísla a *digit1*, *digit10* a *digit100* jsou čísla odpovídající příslušným pozicím.

Vzhledem k tomu, že senzor DHT11 měří teplotu i vlhkost v celočíselném tvaru, není třeba tyto hodnoty nijak upravovat a lze je přímo převést na BCD. Hodnotu teploty ze senzoru DS18B20 je třeba před převodem rozdělit na první znaménkový bit, 7 bitů pro celočíselnou část a 4 bity pro desetinnou část. Celočíslnou část lze převést přímo na BCD, desetinnou část je před převodem potřeba vynásobit konstantou  $\frac{100}{16}$  a následně je možné ji převést jako celé číslo.



```

if int1 >= 100 then -- integer part conversion
digit100 <= std_logic_vector(unsigned(digit100)+1);
int1 <= int1 - 100;
elsif int1 >= 10 then
digit10 <= std_logic_vector(unsigned(digit10)+1);
int1 <= int1 - 10;
elsif int1 >= 1 then
digit1 <= std_logic_vector(unsigned(digit1)+1);
int1 <= int1 - 1;
else
int1converted <= '1';
end if;

```

Obr. 10.3: Převod binární hodnoty na BCD.

## ■ 10.2.2 Zobrazení BCD na 7segmentových displejích

Na vývojovém kitu jsou osazeny 7segmentové displeje se společnou anodou. Pro rozsvícení segmentu je tedy třeba na daný segment přivést logickou 0 a pro zhasnutí segmentu logickou 1. Pro převod BCD na 7segmentový displej pak lze zhotovit pravdivostní tabulku 10.1, kde N je zobrazované číslo, a, b, c, d jsou bity BCD a s0-s6 jsou segmenty displeje očíslované podle obrázku 10.4. Další kombinace vstupních bitů nejsou uvedeny, protože pro funkci převodníku nejsou důležité a jejich výstupem je neznámý stav. Z této pravdivostní tabulky je pak možné odvodit logické funkce pro každý segment:

$$\begin{aligned}
s0 &= \overline{a \wedge \bar{b} \wedge \bar{c} \wedge \bar{d} \wedge \bar{a} \wedge \bar{b} \wedge c} \\
s1 &= \overline{a \wedge \bar{b} \wedge c \wedge \bar{a} \wedge b \wedge c} \\
s2 &= \overline{\bar{a} \wedge b \wedge \bar{c}} \\
s3 &= \overline{a \wedge \bar{b} \wedge \bar{c} \wedge \bar{d} \wedge \bar{a} \wedge \bar{b} \wedge c \wedge a \wedge b \wedge c} \\
s4 &= \overline{\bar{a} \wedge \bar{b} \wedge c} \\
s5 &= \overline{a \wedge \bar{b} \wedge a \wedge \bar{c} \wedge \bar{d} \wedge b \wedge \bar{c} \wedge \bar{d}} \\
s6 &= \overline{\bar{b} \wedge \bar{c} \wedge \bar{d} \wedge a \wedge b \wedge c}
\end{aligned}$$



Obr. 10.4: 7segmentový displej. Převzato z [3]

Tab. 10.1: Pravdivostní tabulka převodníku BCD na 7segmentový displej

N	d	c	b	a	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
3	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
4	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0
5	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
6	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
7	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0

## 10.3 Alarm

Alarm je realizován pomocí piezoelektrického bzučáku buzeného obdélníkovým signálem o frekvenci 1 kHz. Frekvence 1 kHz byla zvolena vzhledem k vyšší hlasitosti použitého bzučáku na této frekvenci. Této frekvenci bylo dosaženo pomocí děličky frekvence 1:100 ze vstupního hodinového signálu o frekvenci 100 kHz.

Alarm je aktivován, pokud je nastaven některý z alarmových signálů do logické 1. Alarmové signály jsou generovány v jednotlivých komponentách pro komunikaci se senzory. To nastává v případě, kdy hodnota uložená v registrech pro teplotu nebo vlhkost překročí předem stanovenou celočíselnou hodnotu. Ta byla pro účely testování nastavena na 27 °C pro teplotu a 50 % pro relativní vlhkost. Aby nedocházelo k aktivaci vlivem posouvání hodnot v posuvných registrech, je alarm deaktivován v době, kdy jsou načítány nové hodnoty ze senzorů. Alarm je také možné deaktivovat přepínačem sw1 umístěným na kitu DE10-Lite.

## 11 Závěr

Zadáním práce bylo seznámit se s digitálními senzory DS18B20 a DHT11 a s jejich způsoby komunikace. Cílem bylo narhnut a realizovat systém pro připojení těchto senzorů k vývojovému kitu pro FPGA MAX10 DE10-Lite a vytvořit knihovny a moduly pro komunikaci na jednotlivých sběrnících. Dalším úkolem bylo využít prvky kitu jako 7segmentové displeje a přepínače a připojit piezoelektrický bzučák jako alarm pro překročení stanovených hodnot měřených veličin.

V teoretické části této práce byly shrnuty základy funkce FPGA, byl představen vývojový kit MAX10 DE10-Lite použitý pro realizaci zadání a jazyk VHDL. Dále byly shrnuty vlastnosti senzoru teploty DS18B20 a sběrnice 1-Wire, kterou sensor DS18B20 využívá, a vlastnosti senzoru teploty a vlhkosti DHT11 a jeho příslušné sběrnice.

V praktické části byly detailně popsány systémy pro komunikace s jednotlivými senzory a funkce jejich komponent. Je popsán způsob, jakým byly jednotlivé systémy testovány, a jejich finální výstup. Dále bylo popsáno propojení obou systémů dohromady, způsob, jakým byla zobrazována data ze senzorů na 7segmentových displejích, a funkce alarmu s piezoelektrickým bzučákem.

Zadání práce se zcela podařilo splnit. Systémy pro komunikaci s jednotlivými senzory fungují a za pomoci přepínače sw0 je možné přepínat zobrazení hodnoty teploty ze senzoru DS18B20 nebo hodnot teploty a vlhkosti ze senzoru DHT11. Dále je systém vybaven alarmem pro překročení nastavených hodnot teploty a vlhkosti s piezoelektrickým bzučákem, který je možné vypnout nebo zapnout pomocí přepínače sw1.

Budoucím rozšířením by například mohlo být připojení mikrokontroléru s připojením k internetu a zapojení tohoto systému do internetu věcí.



## Použité zdroje

1. ANDINA, Juan Jose Rodriguez; TORRE ARNANZ, Eduardo de la; VALDES, Maria Dolores. *FPGAs: Fundamentals, Advanced Features, and Applications in Industrial Electronics*. 1st edition. CRC Press, 2017. ISBN 978-0367656249.
2. LAFATA, Pavel; HAMPL, Petr; PRAVDA, Michal. *Digitální technika*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04914-3.
3. TERIC INC. *DE10-Lite User Manual* [online]. 2020. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English%5C&CategoryNo=234%5C&No=1021%5C&PartNo=4>.
4. ASHENDEN, Peter J. *The VHDL Cookbook: First Edition* [online]. 1. vyd. Dept. Computer Science University of Adelaide South Australia, 1990 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://tams-www.informatik.uni-hamburg.de/vhdl/doc/cookbook/VHDL-Cookbook.pdf>.
5. DALLAS SEMICONDUCTOR. *DS18B20 datasheet* [online]. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/230838/DALLAS/DS18B20.html>.
6. Information about the 1-wire bus, area of application, benefits, installation. *ElabNET* [online]. 2020 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://shop.elabnet.de/en/info/1-wire>.
7. MOUSER ELECTRONICS. *DHT11 Humidity & Temperature Sensor* [online]. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>.



## Seznam příloh

Kódy pro komunikaci se senzory:

- BCDto7.vhd
- com\_control.vhd
- DHT11\_com2.vhd
- DHT11\_display\_driver.vhd
- display\_driver.vhd
- DS18B20\_com.vhd
- freq\_div.vhd
- mem\_bit.vhd
- message\_timer.vhd
- mux.vhd
- pll.vhd
- register\_8b.vhd
- register\_12b.vhd
- register\_40b.vhd
- sensor\_com.vhd

