VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

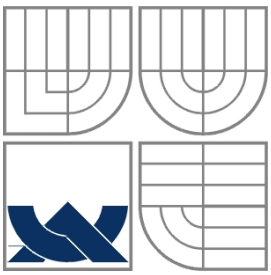
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

SYSTÉM ŘÍZENÍ VYTÁPĚNÍ OBJEKTU KOMUNIKUJÍCÍ PŘES ZIGBEE

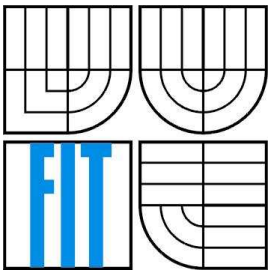
DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE BC. LUKÁŠ MIČULKA
AUTHOR

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

SYSTÉM ŘÍZENÍ VYTÁPĚNÍ OBJEKTU KOMUNIKUJÍCÍ PŘES ZIGBEE

BUILDING HEATING SYSTÉM CONTROLLER USING ZIGBEE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. LUKÁŠ MIČULKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. RICHARD RŮŽIČKA PH.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav počítačových systémů Akademický rok 2009/2010

Zadání diplomové práce

Řešitel: **Mičulka Lukáš, Bc.**
Obor: Počítačové systémy a sítě
Téma: **Systém řízení vytápění objektu komunikující přes Zigbee**
Building Heating System Controller Using Zigbee
Kategorie: Vestavěné systémy

Pokyny:

1. Seznamte se s běžně používanými systémy vytápění objektů a možnostmi jejich regulace.
2. Navrhněte systém vytápění modelového rodinného domu s kotlem na plynná paliva, krbovými kamny s výměníkem a ohřev teplé užitkové vody. Systém by měl umožnit regulaci teploty nezávisle v jednotlivých místnostech na základě vyhodnocení místní teploty, nastaveného programu a stavu systému. Moduly systému by měly umožnit bezdrátovou komunikaci s ústřednou.
3. Navrhněte vhodné hardwarové řešení s využitím dostupných mikrokontrolérů, modulů a technologií pro vestavěné systémy.
4. Navrhněte software a firmware pro systémy navržené v bodu 3.
5. Systém realizujte a ověřte jeho funkčnost.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího.

Při obhajobě semestrální části diplomového projektu je požadováno:

- Splnění bodů 1 - 2 zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování diplomové práce naleznete na adrese http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/

Technická zpráva diplomové práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap, které byly vyřešeny v rámci ročníkového a semestrálního projektu (30 až 40% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Růžička Richard, Ing., Ph.D.**, UPSY FIT VUT
Datum zadání: 21. září 2009
Datum odevzdání: 26. května 2010

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav počítačových systémů a sítí
612 66 Brno, Božetěchova 2

L. S.

doc. Ing. Zdeněk Kotásek, CSc.
vedoucí ústavu

Abstrakt

Zaměřením této práce je návrh a realizace systému řízení vytápění modelového domu. Z hlediska návrhu je kladen důraz na jednoduchost, efektivnost a škálovatelnost systému. Implementovaný systém řízení zahrnuje centrální řídicí jednotku a moduly, které jsou rozmístěné po modelovém domě a mohou plnit několik funkcí – měření teploty, ovládání akčních členů či bezdrátové propojení odlehlých částí. Tato práce popisuje kompletní vývoj od počátečního návrhu systému přes vytvoření hardwaru všech prvků, firmwaru pro jednotlivé typy modulů až po implementaci ovládacího programu běžícího v řídicí jednotce. Jsou zde popsány možnosti komunikace jednotlivých prvků systému. Zvolené řešení vhodně kombinuje drátové a bezdrátové propojení přesně podle toho, jak je to z hlediska modelového domu ideální. Celý systém s funkčními prototypy byl otestován a dosažené výsledky shrnuty v závěru.

Abstract

This thesis is focused on the design and implementation of heating controller system of the model house. In terms of design is the emphasis on simplicity, efficiency and scalability. Implemented heating controller system includes a central controller unit and modules that are placed around the model house and can perform several functions - temperature measurement, control actuators or remote parts of the wireless link. This thesis describes the complete development from the initial system design through assembly of all elements of hardware, firmware implementations for each module type and a control program running in the control unit. It also describes the communication between system elements. Suitably chosen solution combines wired and wireless connections, depending on how it is ideal in terms of the model house. The whole system of functional prototypes was tested and the results were summarized in the conclusion.

Klíčová slova

Řízení vytápění, systémy vytápění, ZigBee, RS-485

Keywords

Heating controller, heating systems, ZigBee, RS-485

Citace

Mičulka Lukáš, Bc.: Systém řízení vytápění objektu komunikující přes ZigBee, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2010

Systém řízení vytápění objektu komunikující přes ZigBee

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Richarda Růžičky Ph.D.
Další informace mi poskytli Ing. Václav Šimek a Ing. Josef Strnadel Ph.D.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

……
Bc. Lukáš Mičulka
21.5.2010

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Richardu Růžičkovi za odbornou pomoc, podnětné připomínky a konzultace. Dále bych rád poděkoval Ing. Václavu Šimkovi, Ing. Josefu Strnadelovi Ph.D. a Ing. Františku Ščuglíkovi Ph.D. za pomoc a konzultace týkající se ZigBee části.

© Bc. Lukáš Mičulka, 2010.
Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1 Úvod 3
2 Systémy používané k vytápění objektů a možnosti jejich regulace 5
2.1 Prvky systému vytápění 5
2.1.1 Kotel 5
2.1.2 Krbová kamna 6
2.1.3 Zásobník teplé užitkové vody 6
2.1.4 Solární ohřev vody 7
2.1.5 Rozvody tepla 7
2.2 Řízení systému vytápění 8
2.2.1 Autonomní řízení 9
2.2.2 Komunikativní řízení 9
2.2.3 Individuální řízení vytápění místností 10
3 Návrh systému řízení vytápění 11
3.1 Řídicí jednotka 12
3.2 Moduly 12
3.3 Komunikace mezi řídicí jednotkou a moduly 13
3.3.1 RS-485 14
3.3.2 ZigBee 15
4 Návrh hardware 19
4.1 Modul se senzory a efektory 19
4.1.1 Mikrokontrolér 21
4.1.2 Zapojení výstupů 22
4.1.3 Teplotní senzory 22
4.1.4 RTC obvod 23
4.1.5 Převodník rozhraní RS-232 na RS-485 24
4.1.6 LCD displej 24
4.1.7 Tlačítka 25
4.2 Bezdrátový modul ZigBee 25
4.2.1 ZigBee transceiver a komunikace 27
4.2.2 Anténa 29
4.3 Převodník mezi sběrnicí RS-485 a RS-232 29
5 Implementace firmware 30
5.1 Programování mikrokontroléru 30
5.1.1 Programátor BiProg 2.1 31
5.1.2 Programátor ASIX Presto 31
5.2 Knihovny pro jednotlivé prvky modulů 32
5.2.1 EEPROM 32
5.2.2 Sběrnice One Wire 33
5.2.3 Teplotní senzory DS18x20 34
5.2.4 Two Wire Interface (I^2C) 34
5.2.5 RTC obvod 37
5.2.6 LCD displej 37
5.2.7 Tlačítka 38
5.2.8 MC13192 39
5.2.9 Sběrnice RS-485 40

5.3 Implementace komunikace mezi řídicí jednotkou a moduly 40
5.4 Modul se senzory a efektory 42
5.4.1 Firmware pro modul s funkcí regulace teploty v místnosti 42
5.4.2 Firmware pro modul určený pro řízení efektorů 43
5.5 Bezdrátový ZigBee modul 43
5.5.1 Firmware pro ZigBee modul master 44
5.5.2 Firmware pro ZigBee modul slave 44
6 Implementace ovládacího programu pro řídicí jednotku 45
6.1 Řízení systému 45
6.2 Správa systému s grafickým uživatelským rozhraním 46
7 Realizace a testování 49
7.1 Realizovaný prototyp systému 49
7.2 Testování 50
8 Závěr 52
9 Literatura 53

1 Úvod

Systém pro řízení vytápění objektu je důležitý prvek pro snižování energetické náročnosti objektů.

To je důležité nejen z důvodu odolávání krátkodobějším energetickým nákladům, ale i jako účinná zbraň proti možnému nedostatku fosilních paliv v budoucnosti a také zhoršování životního prostředí. Každé opatření, které je učiněno v souvislosti s regulací vytápění, musí být nejen okamžitě účinné, ale i dlouhodobě udržitelné.

V dnešní době je ideálním řešením nasazení inteligentních systémů řízení vytápění, které neustálým měřením, sběrem dat a jejich vyhodnocováním dovolují optimalizovat běh technologických zařízení, které vyrábí a distribuují teplo v objektu [1]. Tímto dokážou uspořit značnou část provozních nákladů při zachování požadované tepelné pohody. S tím souvisí i zvýšení komfortu uživatelů, kteří mohou ovládat celou otopnou soustavu z jednoho řídicího centra, ke kterému se většinou lze připojit i vzdáleně pomocí sítě či mobilního zařízení.

Mezi nejdůležitější úkoly inteligentních systému řízení patří sladění chodu všech zdrojů energie takovým způsobem, aby pracovaly navzájem optimálně a zároveň co nejekonomičtěji. Dalším typickým úkolem je udržování teploty v místnostech a dalších prvcích, kde je to nutné, podle skutečné potřeby v čase. O toto se stará síť modulů s akčními členy, které dokážou měnit stav jednotlivých prvků soustavy, dále senzory, které dávají systému zpětnou vazbu, a řídicí jednotka, která sbírá data ze senzorů a podle nastavené funkce a daného algoritmu dává příkazy akčním členům. Další důležitou součástí je sběr dat, jejich zpracování a prezentace uživateli, který má možnost modifikovat nastavení celého systému. Tuto činnost vykonává centrální řídicí jednotka.

Jelikož například i pokles teploty o 1°C v místnosti dokáže v dlouhodobém měřítku snížit náklady na vytápění o několik procent, je investice do systému, který efektivně řídí otopnou soustavu, nejrychleji návratná investice ze všech investic do úspory energií [2]. Při neustálém růstu cen energií se doba návratnosti stále snižuje. S optimalizací běhu technologických zařízení pro výrobu a distribuci tepla souvisí další pozitivní efekt, kterým je zvýšená životnost a tedy i nižší náklady na údržbu.

Tato práce si klade za cíl, navrhnout a realizovat ideální systém řízení vytápění pro modelový rodinný dům. Poté bude ještě následovat ověření funkčnosti celého systému. Jako modelový dům poslouží dvougenerační rodinný dům s typickými prvky otopné soustavy: kotel na plynná paliva, krbová kamna s výměníkem, zásobník s ohřevem teplé užitkové vody, solární panely s ohřevem vody pro venkovní bazén.

Celá soustava je nyní řízena autonomně, z čehož plyne, že je velmi neefektivní. Například kotel na plynná paliva je řízen vlastním termostatem a ohřívá vodu, i když to není zrovna nutné. Toto zapojení je potřebné nahradit takovým, aby mezi jednotlivými součástmi existovala vazba a bylo možné nastavit jeden prvek na základě stavu ostatních. Zároveň bude ale také zachována jistá míra autonomie díky použití principu individuálního ovládání topení, kdy bude v každé místnosti nastavována teplota zvlášť.

V navrženém řešení bude každému prvku otopné soustavy přiřazen určitý modul, který bude měnit stav zařízení a zjišťovat údaje o jeho stavu (například modul, který bude spínat ohřev vody v kotli a měřit její teplotu). Tyto moduly budou navzájem propojeny sběrnicí a připojeny k centrální řídicí jednotce, která bude jakýmsi mozkem a bude řídit celý systém. S touto řídicí jednotkou bude možné komunikovat vzdáleně z vnějšího prostředí prostřednictvím ethernetové sítě. Jednotlivé moduly budou moci být připojeny prostřednictvím bezdrátové sítě standardu ZigBee či sběrnice RS-485.

Vzhledem k aplikaci na předem daný rodinný dům bude systém nastaven přímo na míru. Nicméně díky zvolené strategii, kdy je základem centrální řídicí jednotka a k ní jsou sběrnicí

připojovány další moduly, jej bude možné použít pro libovolný objekt. Celý systém bude možné jednoduše rozšířit přidáním dalších modulů.

Pro řízení modulu bude použito mikrokontroléru, který v dnešní době představuje ideální možnost pro řízení jednotlivých obvodů a integrovaných prvků v zapojení. Z široké škály produktů lze vybrat mikrokontroléry, které se přesně hodí pro danou funkci. Pro toto zapojení je zapotřebí vybírat z těch, které mají dostatečný výkon, dostatečnou paměť pro data, ideální počet vstupně výstupních portů a hlavně nízkou spotřebu. Ta bude důležitá zejména v těch modulech, které budou k sběrnici připojeny bezdrátově a budou moci být napájeny baterií.

V následujících dvou kapitolách bude představen modelový dům, prvky sloužící k vytápění a distribuci tepla a také navržený systém řízení vytápění, včetně návrhu rozmístění jednotlivých modulů a centrální řídicí jednotky. V kapitole 4 potom bude popsáno hardwarové řešení všech částí systému včetně konkrétních obvodů, zapojení a součástek. Kapitoly 5 a 6 se zabývají programem pro uživatele k ovládání celého systému a také popisem implementace firmwaru jednotlivých použitých mikrokontrolérů. V kapitole 7 bude uvedeno, jak byl celý systém realizován v praxi a jak se poté chová v reálných podmínkách provozu.

2 Systémy používané k vytápění objektů a možnosti jejich regulace

V této kapitole budou popsány prvky, které se běžně používají při vytápění objektů. Především bude věnována pozornost těm prvkům, které se nachází v modelovém domě. Jeho systém vytápění je pevně dán. Následně bude rozebráno několik způsobů, jak lze tyto systémy řídit z pohledu komunikace mezi jednotlivými prvky.

2.1 Prvky systému vytápění

Tato podkapitola popisuje prvky systému vytápění.

2.1.1 Kotel

Jedná se o základní zdroj tepla při ústředním vytápění domů a budov. Z něj se pomocí rozvodů přenáší teplo do otopných těles a do zařízení pro ohřev teplé užitkové vody. Ústřední vytápění pomocí kotle má řadu výhod oproti lokání topidlům v místnostech. Kromě jednodušší obsluhy, údržby a rovnoměrnější rozložení vnitřní teploty v místnosti je to vyšší provozní účinnost a jednodušší regulovatelnost. Ta musí být rychlá, což předpokládá, aby vytápěcí soustava byla co nejméně setrvačná. Důležitou vlastností je také co nejrychlejší zatopení.

Teplo v kotli vzniká při hoření paliva. Tím mohou fosilní paliva jako hnědé či černé uhlí nebo plyn ale také dřevo či biomasa. Stavba kotle se liší podle druhu paliva. Vždy obsahuje ale část, kde se vygenerované teplo předává teplonosnému médiu, které potom proudí v soustavě. Tímto médiem bývá nejčastěji voda nebo vzduch. To může v soustavě proudit samovolně nebo nuceně díky čerpadlu umístěnému v kotli (viz 2.1.5). Dále už se budeme zabývat pouze kotli na plynná paliva (zemní plyn), které předávají teplo do teplovodní soustavy.

V dnešní době existuje velké množství variant kotlů. Z hlediska provedení kotle je základní variantou samostatný kotel, který má jen jednu topnou větev pro ohřívání otopné vody. Alternativou je tzv. kombinovaný kotel pro přípravu otopné vody a ohřívání teplé užitkové vody (dále jen TUV). Ohřev TUV může probíhat buď průtokovým principem, nebo s využitím zásobníku teplé vody.

Kombinované průtočné kotle jsou vhodné zejména v menších bytech a při menší spotřebě teplé vody. Kotel obsahuje průtokový ohřívač, který ohřívá buď otopnou vodu anebo TUV. Platí zásada, že ohřívání užitkové vody má přednost před vytápěním. Jejich výhodou jsou minimální nároky na místo a rychlé dodání tepla při požadavku. Bývá standardně vybaveno oběhovým čerpadlem a regulací teploty teplé vody přímo na kotli. Nevýhodou je omezený průtok, který je dán výkonem zařízení.

Další varianta kombinovaného kotle využívá přídavný zásobník TUV. Ta je výhodná pro domy, kde je spotřeba teplé vody větší. Voda v zásobníku je nepřímo ohřívána pomocí otopné vody. Ta jím většinou protéká ve spirálovité trubce. Výhodou je použití osvědčené klasické konstrukce a možnost připojení více zásobníků o různých objemech. K nevýhodám patří především nároky na prostor pro zásobník TUV a možnost výskytu situace, kdy při vyčerpání veškeré teplé vody je nutné čekat na ohřátí dlouhou dobu.

Posledním typem jsou kotle s vestavěným zásobníkem TUV. Jsou kompromisem mezi výše zmíněnými typy. Kotel obsahuje menší zásobník TUV přímo v sobě. Objem se zpravidla pohybuje od 50 do 100 litrů [3]. Teplá voda je opět ohřívána nepřímo pomocí otopné vody. Pokud voda v zásobníku dojde, je kotel schopen dodávat teplou vodu pomocí průtočného ohřevu. Teplota vody jde regulovat přímo na kotli. Nevýhodou tohoto typu je větší velikost.

Kotle na plynná paliva mají velmi dobrou regulovatelnost výkonu bez snížení účinnosti či provozní spolehlivosti. Ta zpravidla dosahuje v rozmezí 30-100 % jmenovitého výkonu [4]. Regulovat lze většinou i teplotu, na kterou se má ohřát voda určená pro vytápění.

Co se týče energetické účinnosti, tak ta je v zásadě u všech plynových kotlů velmi vysoká a blíží se 90 % v širokém výkonovém rozmezí. Nové nízkoteplotní kotle dosahují ještě o několik procent vyšší efektivnosti díky provozu kotle na nižších teplotách otopné vody [4]. Zdaleka nejvyšší energetickou efektivnost pak dosahují kondenzační kotle. U nich je však předpokladem nízkoteplotní otopný systém, díky němuž je pak možné využít i latentní teplo spalin (díky kondenzaci vlhkosti obsažené ve spalinách).

U kotlů na plyn jsou velmi důležité ochranné prvky kvůli bezpečnosti. K těm patří třeba systém kontroly odvodu spalin, kdy při nedostatečném odvodu spalin dochází vypnutí kotle, elektronické snímání tlaku otopné vody, kdy je uživatel upozorněn při poklesu tlaku vody pod doporučenou hranici, a ochrana proti přehřívání, kde se při vyšší než nastavené teplotě zapíná čerpadlo a při překročení určité hranice kotel úplně vypne. Dalším prvkem je protimrazová ochrana, kdy se při poklesu teploty vody pod 10 °C zapne čerpadlo a při poklesu pod minimální hranici se kotel sám zapne a začne topit [4].

2.1.2 Krbová kamna

Krbová kamna v klasickém provedení se řadí k lokálním topidlům. Oproti klasickým krbům se vyznačují kompaktním provedení a dekorativností. Jsou vyráběny převážně z ocelových plechů či šedé litiny. Vevnitř obsahují šamotové tvarovky pro zvýšení akumulačních schopností. Kovové kamna dobře vyzařují teplo, jejich ohřátí trvá relativně krátkou dobu. Regulovat je lze pomocí klapky, která umožňuje ovládat přístup kyslíku a tím i intenzitu hoření paliva.

Kromě klasických existuje i varianta krbových kamen s výměníkem teplé vody. Výměník je umístěn v zadní části kamen a lze jej připojit k teplovodní soustavě. Díky tomu přestávají být krbová kamna pouze lokálním topidlem. S tím souvisí i zvýšení jejich účinnosti, protože využívají k ohřevu vody ve výměníku teplo, které by jinak bylo vypuštěno komínem ven [5].

Výměník je tlaková tlustostěnná nádoba. Spodní vývod slouží pro přívod studené vody a horní jako výstup ohřáté vody. V případě instalace teplovodního výměníku je vždy bezpodmínečně nutné zajistit, aby byl odběr tepla z kamen. Kvůli tomu k němu bývá ještě připojeno čerpadlo, které je při dostatečné teplotě vody uvnitř zapnuto. Z důvodu možného výpadku proudu je vhodné připojit k čerpadlu ještě záložní zdroj energie a přidat do soustavy pojistný ventil.

2.1.3 Zásobník teplé užitkové vody

Zásobník TUV se dá přirovnat k nádobě o určitém obsahu vody, která je v ní ohřívána poměrně dlouhou dobu malým množstvím tepla. Obsah zásobníků teplé vody bývá většinou od 100 litrů u menších až po 300 litrů u největších [3]. Voda v zásobníku může být ohřívána pomocí vnitřního ohřívače (elektrického či plynového), jehož výkon je regulován termostatem, který podle dosažené teploty vody zapíná či vypíná ohřev podle nastavené teploty. Druhou možností je ohřívání pomocí větve teplovodní soustavy. Zásobník TUV uchovává teplou vodu v zásobě a dodávají ji podle potřeby. Díky velkému objemu ji může dodávat okamžitě a při relativně stálém tlaku, i když je odebírána z několika míst současně. Po odebrání teplé vody dochází k průběžnému doohřevu na nastavenou teplotu.

Mezi hlavní výhody patří to, že jsou efektivnější proti průtokovým ohřívačům, poskytují dostatečný tlak vody, umožňují dodávku vody teplé až 85°C [3]. Nevýhodou je kromě velikosti dlouhá doba na ohřátí teplé vody, pokud již byla všechna vyčerpána.

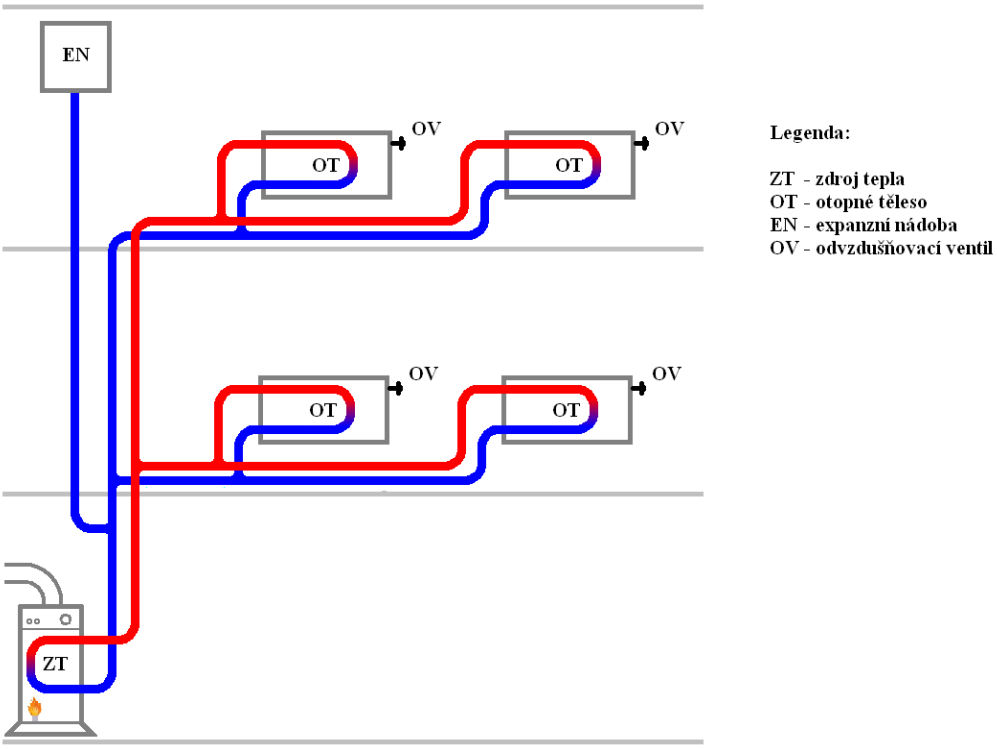
2.1.4 Solární ohřev vody

Využívání alternativních zdrojů energie může při správných podmínkách přispět k velkému snížení nákladů. Získávání tepla ze slunečních paprsků jedním z nejefektivnějších alternativních zdrojů. Mohou ušetřit až 80% celkové energie na vytápění [6]. Náklady na pořízení nejsou u solárních systémů proti ostatním tak vysoké (například proti tepelnému čerpadlu). Lze je používat celoročně, ale výkon se ale liší podle množství slunečního svitu. Využívají se přitom sluneční kolektory s vysokou účinností, odolností proti vysokým teplotám a dlouho životností. Umísťují se většinou na střechy s orientací na jih, kde je nejvíce svitu.

Solární kolektory se často používají v souvislosti s ohřevem vody v bazénech. Lze je jednoduše připojit do okruhu, kterým cirkuluje voda mezi bazénem a filtrací. Plocha kolektoru pro ohřev bazénové vody by měla být podle typu kolektorů 40 % až 70 % z plochy bazénu podle toho, zda se jedná o krytý či nekrytý bazén [6]. Podle způsobu ohřevu vody se rozlišují dva základní systémy, a to přímý a nepřímý ohřev vody, při kterém v kolektorech proudí otopná voda a až z ní se ve výměníku předává teplo do bazénové vody.

2.1.5 Rozvody tepla

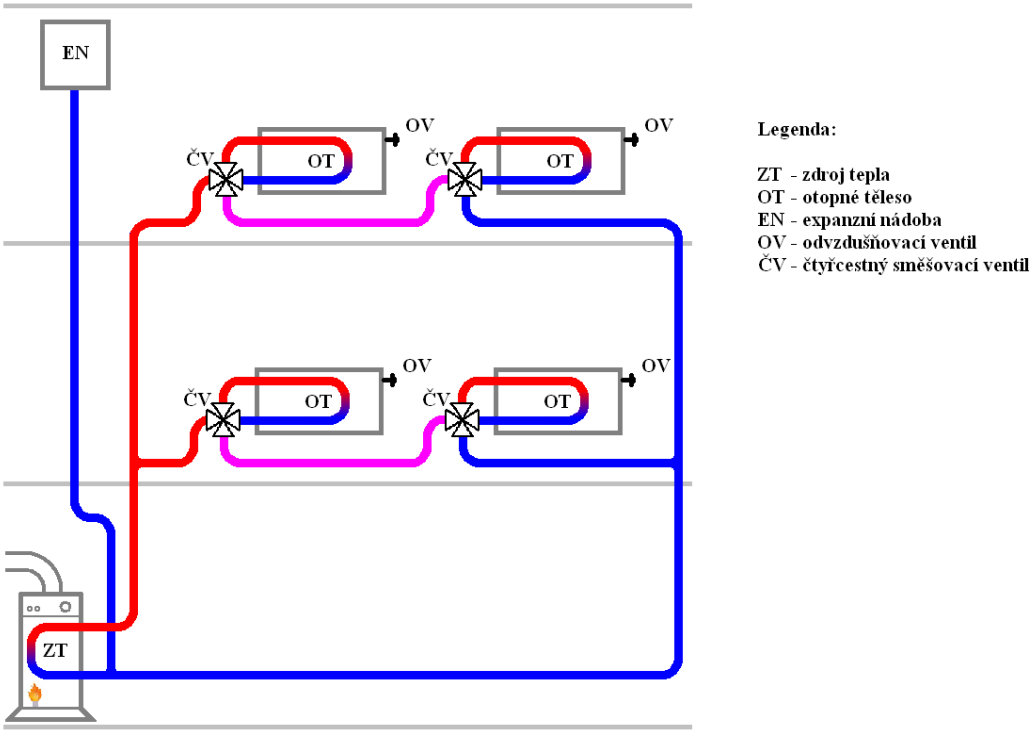
Distribuce tepla od zdrojů k otopným tělesům se provádí zpravidla pomocí vedení otopné vody v jedné či dvou trubkách s malým průměrem. Součástí otopné soustavy bývá expanzní nádoba, která slouží k doplňování otopné vody v soustavě, která kolísá v důsledku teplotní roztažnosti vody i jednotlivých prvků soustavy. Z toho důvodu by měla být umístěna nejvýš ze všech prvků. Příklady zapojení obou zmíněných soustav jsou vidět na obrázku 2.1 a 2.2.



Obrázek 2.1 – Dvoutrubková otopná soustava

Na obrázku 2.1 je vidět typické zapojení pomocí dvou trubek, na které jsou paralelně připojeny jednotlivé větve v každém poschodí a na ty opět paralelně otopná tělesa. Každé těleso obsahuje

odvzdušňovací ventil, který slouží k upuštění vzduchu, který se může v soustavě vyskytnout, a tím dosažení správného oběhu otopné vody.



Obrázek 2.2 – Jednotrubková otopná soustava

Obrázek 2.2 popisuje zapojení soustavy s jednou trubkou pro připojení otopného tělesa. Toto je pouze jedna z několika variant, jak toho lze docílit. Čtyřcestný ventil funguje tak, že v základní poloze dělí soustavu na dva okruhy. Při překlopení klapky okruhy spojí do jednoho tak, že otopná voda ze soustavy začne proudit přes otopné těleso.

Voda v soustavě může obíhat buď přirozeně, nebo nuceně. Přirozený oběh je umožněn díky rozdílné hustotě studené vody, která proudí od otopných těles, a teplé vody, která proudí od zdrojů tepla. Díky tomu studená voda působí na zdroj tepla vyšším tlakem a tím dává médium v soustavě do pohybu. K podmínkám správného fungování patří, že topidlo musí být umístěno nejníže ze všech prvků soustavy a soustava by měla být orientována vertikálně a nepříliš rozlehlá, kvůli možným ztrátám tlaku. Pro tento typ oběhu se používá dvoutrubková soustava.

Nucený oběh je zajišťován čerpadlem, které je vloženo do soustavy většinou v blízkosti kotle. Využívá se u budov a domů se složitější teplovodní soustavou. Díky čerpadlu je tento typ soustavy schopný překonat větší ztráty tlaku. Oproti přirozenému oběhu je zde také rychlejší reakce a menší setrvačnost systému. Jeho hlavní nevýhodou je závislost na napájení kvůli čerpadlu.

2.2 Řízení systému vytápění

Základním problémem, který je nutné před návrhem systému řízení vyřešit, je vybrat ideální typ vazby mezi systémovými prvky. Z tohoto hlediska lze systémy rozdělit na autonomní a komunikativní.

2.2.1 Autonomní řízení

U tohoto typu systému nedisponují jednotlivé prvky žádnou datovou vazbou na další zařízení. Neexistuje žádné spojení ať už hardwarové pomocí kontaktů či pomocí spojitých signálů přes sběrnici. Existuje pouze jediný a nepřímý způsob, jak lze získávat informace o stavu v místnosti se zkoumaným prvkem. Tím je zjišťování změny stavu prostředí po určité době. Například pro získání informace o tom, zda je v místnosti zapnuto otopné těleso, lze sledovat vratné parametry média (otopné vody v potrubí, které vede z dané místnosti). Tato varianta je obecně levnější, ale neumožňuje vytvoření systému řízení vytápění s pokročilými funkcemi.

Nejvíce názorným případem autonomního systému je řešení s ústředním vytápěním objektu při použití termostatických hlavic. Ty používají zabudovaný teplotní senzor, podle kterého s daným nastavením teploty a jistou hysterezí udržují správnou teplotu. Zde se poté nabízí několik variant pro snadnější ovládání uživatelem, jako například použití programovatelné hlavice s elektromotorickým či elektrotermickým pohonem. Dalším vylepšením hlavice může být oddělené čidlo teploty, které již není umístěno uvnitř hlavice, ale lze jej uložit dále od otopného tělesa tak, aby jeho blízkost nezpůsobovala chybu při měření průměrné teploty v místnosti.

Ač se může jevit tento systém se všemi vylepšeními jako ideální, není tomu tak. Základním problémem je chybějící komunikace mezi hlavicemi v místnostech a prvky dodávajícími do soustavy teplo. To způsobuje značnou neefektivitu, protože tyto prvky dodávají otopnému médiu teplo, i když to zrovna není potřeba a žádné otopné těleso nemá topit. Tento problém lze částečně řešit tak, že prvky dodávající teplo kontrolují úbytek tepla z média mezi výstupem a vstupem ze soustavy. Pokud je tento rozdíl větší, může to značit, že otopná tělesa potřebují dodat teplo. Ale i z tohoto řešení plyne další problém. Pokud systém obsahuje větší množství těles a delší rozvody s otopným médiem, může se stát, že nebude možné zjistit, zda úbytek tepla způsobily ztráty při vedení nebo jsou způsobeny jeho vyzařováním v několika málo otopných tělesech.

Dále se budeme zabývat již jen systémy, kde mezi jednotlivými prvky probíhá nějaká komunikace a chování prvků je navzájem nějakým způsobem vázané.

2.2.2 Komunikativní řízení

Pokud je soustava příliš složitá, uživatel požaduje přesné řízení všech prvků na dálku nebo je požadováno, aby chování jednoho prvku bylo nastaveno podle stavů ostatních prvků, není jiná možnost než zvolit tento způsob řízení. Komunikativní řízení může mít několik podob.

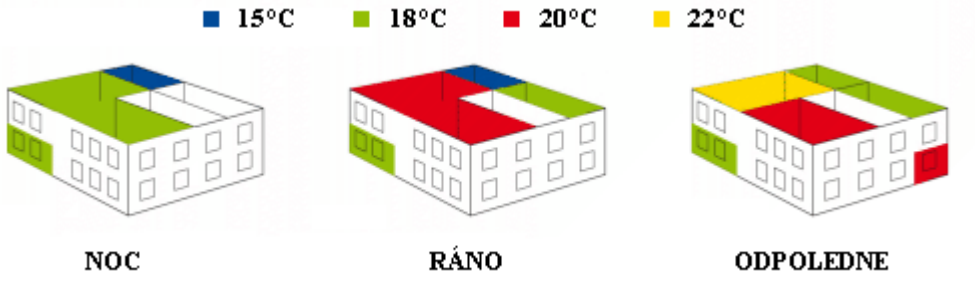
Jedním z možných členění je rozdělení podle způsobu, kterým probíhá komunikace. Existují varianty, kdy jednotlivé akční prvky jsou spojeny přímo pomocí datových vodičů a neobsahují tedy žádnou inteligenci, která by byla sama schopna řídit daný segment systému. Příkladem může být teplotní senzor a elektromechanicky ovládaná hlavice otopného tělesa v místnosti, odkud jsou všechny řídicí a datové vodiče vedeny do jednoho místa, kam jsou stejným způsobem připojeny i ostatní prvky systému z jiných místností. Tento systém je jednodušší a levnější kvůli absenci složitých obvodů. Má ovšem mnoho nevýhod. Klade velké výkonové nároky na řídicí jednotku, která navíc musí mít dostatečný počet vstupů a výstupů. Z toho plyne omezení na malý počet připojených členů. Dalším problémem je nutnost vést z velké množství vodičů k řídicí jednotce a také maximální možná délka vodičů pro vedení signálů, která bývá omezená a při jejím překročení dochází k chybám.

Protipólem může být systém, který je modulární a ve větší či menší míře distribuovaný. Tento systém se většinou sestává z řady modulů, které jsou umístěny blíže k akčním prvkům systému (senzorům, přestavitelným hlavicím otopného tělesa apod.). Tyto moduly mohou být potom spojeny sběrnicí, point-to-point spojením nebo bezdrátově. Může se zde vyskytovat i centrální řídicí stanice, která má ale podstatně méně práce než u předchozí varianty. S tím souvisí i další bod. Jelikož tyto moduly provádí minimálně prvotní zpracování dat ze vstupů (například vypočítání teploty z dat od

senzorů), vyhodnocení stavů a jejich odeslání na výstupy, není již nutné posílat po sběrnici velké množství surových dat. Modul může obsahovat obvody s takovou inteligencí, aby byl schopen autonomně řídit svůj daný segment systému, a komunikovat s ostatními moduly nebo řídicí stanicí jen výjimečně v případě potřeby. Tím může být nastavení nových parametrů nebo chování.

2.2.3 Individuální řízení vytápění místností

Tato podkapitola popisuje způsob vytápění, kdy je programově řízeno topení podle individuálních požadavků pro danou místnost. Tento princip je velmi účinný z hlediska úspor energie a při zachování tepelné pohody tam, kde je to potřeba. Je vhodný zejména pro objekty, kde se vyskytují místnosti, které mají být vytápěny jen za určitých okolností. Příkladem takových objektů mohou být školy, administrativní objekty, hotely apod. Ovšem tento systém nalezne uplatnění, i když třeba v menším měřítku, také v každém rodinném domě. I zde existují místnosti, kde se nezávislé řízení vytápění v místnostech dá využít. Příklad toho je vidět na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3 – Rozdílné teploty v místnostech v různém čase

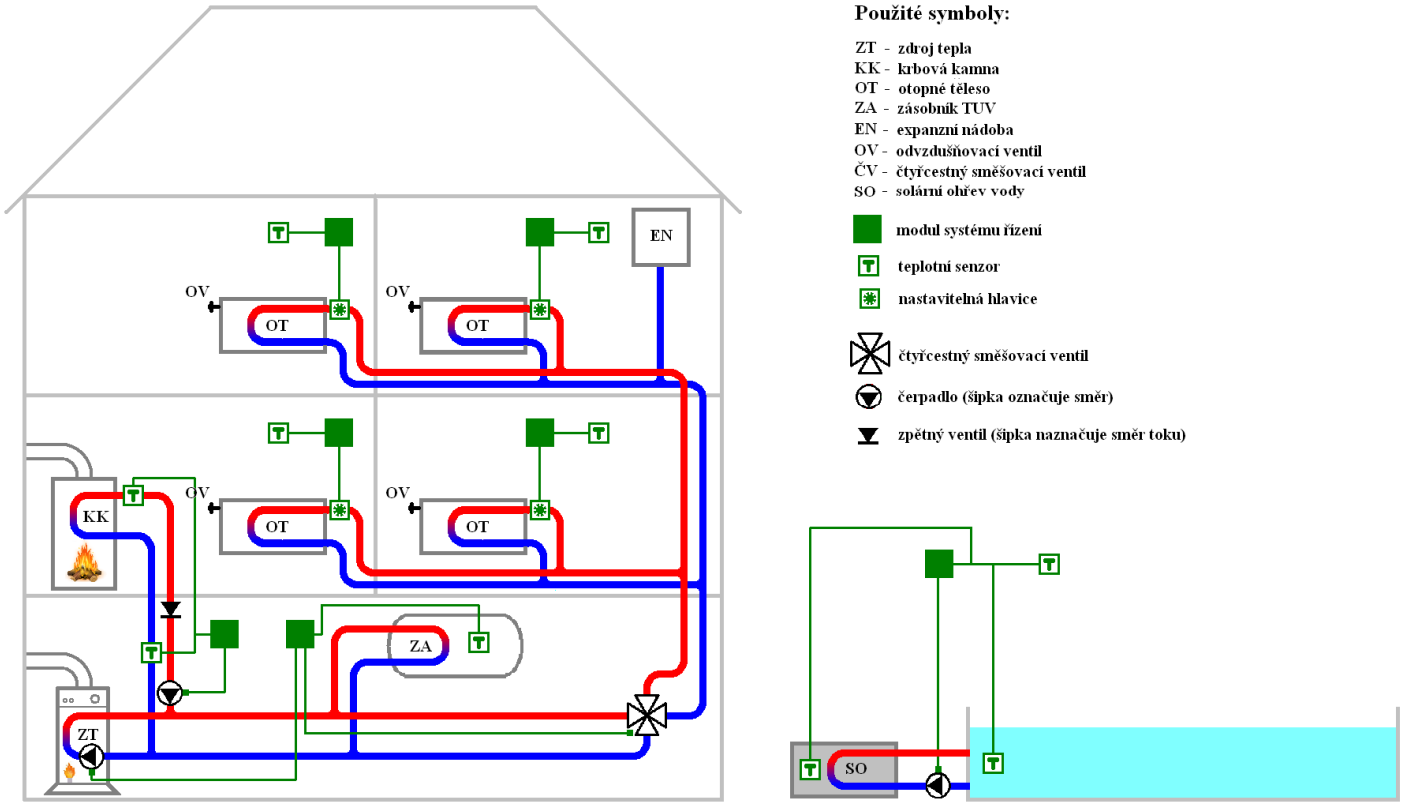
Nastavení teploty se provádí v závislosti na čase. Pro každou místnost tedy existuje jistý časový rozvrh, který určuje teplotu podle času. Tento rozvrh se pak může měnit například v případě, že do místností vstoupí člověk.

Pokud je možné ovládat vytápění každé místnosti zvlášť, je tento systém ideální z ekonomického i ekologického hlediska. Úspory mohou dosahovat až desítek procent, jelikož jsou vytápěny jen ty místnosti, které jsou skutečně používány. Samozřejmě je nutné správné nastavení teplotního rozvrhu a jeho případné upravení, pokud dojde ke změnám ve využívání místnosti.

3 Návrh systému řízení vytápění

Systém řízení vytápění byl navržen pro modelový dům, jehož systém vytápění je pevně určen. Úkolem tedy bylo, připojit jednotlivé regulovatelné prvky systému vytápění do systému řízení vytápění, který se dělí na jednotlivé podčásti (moduly), a s pomocí informací z teplotních senzorů, které byly do systému přidány, je efektivně řídit. Návrh takového systému je vidět na obrázku 3.1.

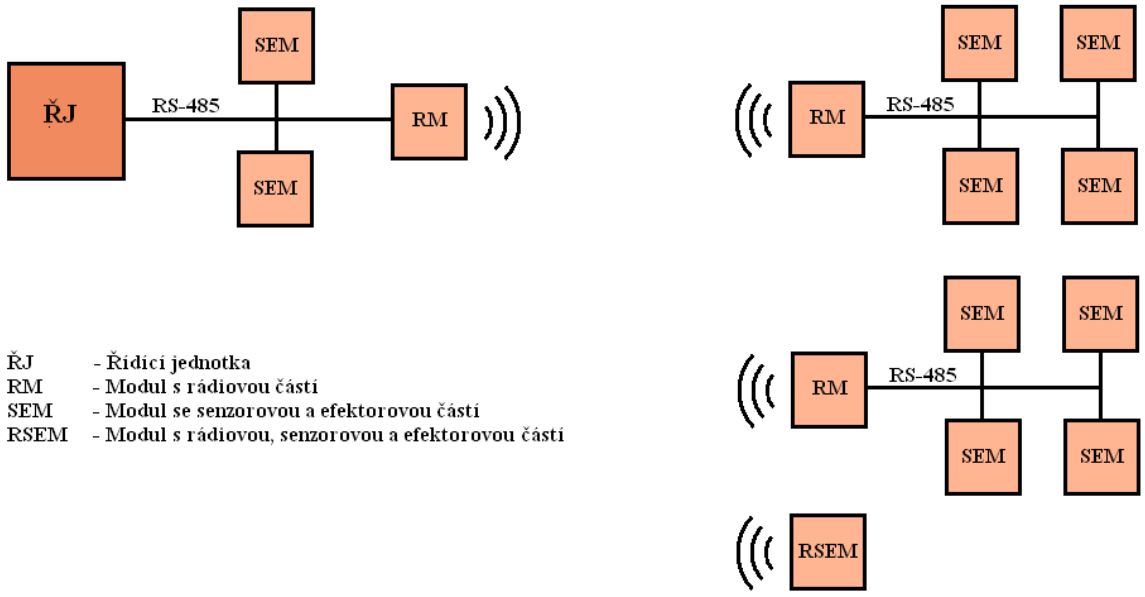
Jsou zde vidět všechny prvky použité v systému vytápění a připojení jejich regulovatelných částí k modulům systému řízení vytápění. Obrázek není přesným zákresem všech prvků v modelovém domě. Počet místností s otopnými tělesy a jejich umístění se může lišit. Na obrázku z důvodu přehlednosti není znázorněno bezdrátové či sběrnicové spojení modulů. Toto bude uvedeno dále.



Obrázek 3.1 – Systém vytápění objektu včetně navržené možnosti řízení

V domě se nachází dvoutrubková otopná soustava, jejíž základním zdrojem tepla je kotel na zemní plyn s čerpadlem. Kotel lze regulovat pomocí zaslání signálu, zda má topit do soustavy či nikoliv. Dále jsou k soustavě paralelně připojena krbová kamna s výměníkem. Voda z výměníku může proudit do soustavy v případě zapnutého čerpadla, které je umístěno na této větvi soustavy. Ta je navíc opatřena zpětným ventilem pro zaručení správného toku otopné vody. K větvi s kotlem je pomocí čtyřcestného ventilu připojena větev s otopnými tělesy. Čtyřcestný ventil při otevření obě větve spojí, a tak prochází otopná voda od kotle a kamen až k jednotlivým otopným tělesům. V případě uzavřeného ventilu zůstávají obě větve oddělené a uzavřené. Další paralelní větví je k soustavě připojen také zásobník TUV. Užitková voda je v něm ohřívaná zejména při uzavřeném ventilu. Otopná voda jim proudí na úkor větve přes ventil především díky nižšímu odporu kvůli širším trubkám. V případě otevřeného čtyřcestného ventilu není voda v zásobníku téměř vůbec ohřívána, protože širší průměry trubek větve k otopným tělesům způsobují, že otopná voda se pohybuje především touto větví.

K tomuto systému vytápění byl navrhnut systém řízení, který obsahuje řídicí jednotku, ke které budou sběrnicí a bezdrátově připojeny jednotlivé moduly systému. Stavba modulu se může lišit podle toho, k jaké funkci je určen. Příklad systému řízení s řídicí jednotkou, různými druhy modulů a komunikace mezi nimi je uveden na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2 – Příklad zapojení systému řízení

3.1 Řídicí jednotka

Systém řízení vytápění obsahuje řídicí jednotku, která má na starosti komunikaci s moduly, kterým odesílá aktuální pokyny, co mají provádět. Od nich naopak má získávat aktuální informace o jejich stavu a ty zpracovávat. Řídicí jednotka slouží také pro nastavení systému uživatelem. Prostřednictvím programu s grafickým uživatelským rozhraním bude možné změnit chování či zjistit aktuální údaje o systému. Řídicí jednotka umožňuje připojení k veřejné síti a díky tomu bude možné systém ovládat vzdáleně.

Jako ideální se jeví použití speciální PC sestavy, která bude optimalizovaná tak, aby měla minimální odběr a rozměry, a specializovaného softwaru, který bude systém řídit. Důvodem, proč byla zvolena varianta univerzálního PC před specializovaným hardwarovým řešením, jsou především nižší náklady na vývoj systému a větší variabilita. Počítač orientovaný na nízkou spotřebu může dnes dosahovat takové parametry, že není potřeba implementovat speciální hardware.

PC sestava by se měla skládat z nízkopříkonového procesoru, základní desky s vývodem na sériový port a flash pamětí. Jako ideální se jeví procesory řady Intel Atom, které mají dostatečný výkon, nízkou spotřebu, nevyžadují chlazení ventilátorem a jejich cena je nízká. Základní deska pro ně může být velikosti mini-ITX, jejíž velikost je velmi malá (17 cm x 17 cm). Při dobré volbě operačního systému jej bude možné spustit v RAM paměti. Po startu počítače se tam nakopíruje z flash paměti. Tím odpadá potřeba pevného disku, který by příliš zvýšil odběr počítače.

3.2 Moduly

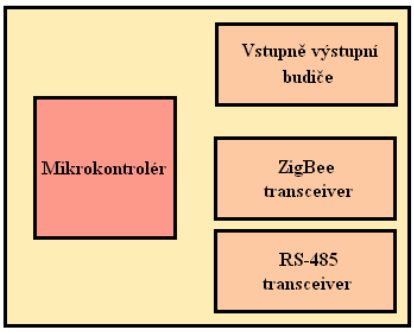
Moduly tvoří základní prvek systému. Moduly lze do systému jednoduše přidávat či odebírat. Jejich úkolem je řízení určité části systému podle nastavení, které bylo do modulu dodáno z řídicí jednotky.

Každý modul má své jednoznačné identifikační číslo, s jehož pomocí s ním řídicí jednotka komunikuje. Moduly jsou diferenciované podle funkce. Existují základní 3 varianty: modul se senzorovou a efektorovou částí, modul s rádiovou částí a modul s rádiovou, senzorovou a efektorovou částí.

Modul bez rádiové časti bude připojený ke sběrnici RS-485 a komunikovat pouze prostřednictvím jí. K vstupně výstupním portům budou připojeny senzory či efektorové prvky (například relé). Modul bude vykonávat řízení na základě vstupů ze svých senzorů a dat od řídicí jednotky tak, že bude podle své funkční tabulky nastavovat výstupy

Čistě rádiový modul slouží jako převodník mezi sběrnicí RS-485 a bezdrátovým přenosem ZigBee. K jeho úkolům také patří připojování dalších ZigBee modulů. S jejich pomocí bude snaha o vytvoření stromové topologie ZigBee sítě (viz část 3.3.2).

Posledním typ modulu obsahuje rádiovou i senzorově efektorovou část. Tento modul vykonává řízení své části systému na základě vstupů ze senzorů a komunikuje s řídicí jednotkou prostřednictvím ZigBee sítě. Neobsahuje převodník na sběrnici RS-485.



Obrázek 3.3 – Blokové schéma modulu se všemi volitelnými částmi

Na obrázku 3.3 lze vidět blokové schéma modulu se všemi možnými částmi. Základem každého modulu je mikrokontrolér, který vykonává řídicí program. Při jeho výběru by měl být kladen důraz na dostatečnou výkonnost, velikost RAM paměti a dostatečný počet vstupně výstupních portů, protože bude nutné k němu připojit všechny ostatní části modulu.

Budiče vstupně výstupních portu obsahuje modulu z důvodu, že bude nutné spínat součástky, na které by výstupní proud vývodů mikrokontroléru nestačil. Další částí je přijímač a vysílač sběrnice RS-485, přes který může mikrokontrolér komunikovat s okolím. Tato část se sestává z třístavového budiče, který je připojen k SCI jednotce mikrokontroléru. Poslední částí je přijímač a vysílač ZigBee. Srdcem této části bude RF čip, který bude schopen vysílat a přijímat data pomocí integrované antény.

3.3 Komunikace mezi řídicí jednotkou a moduly

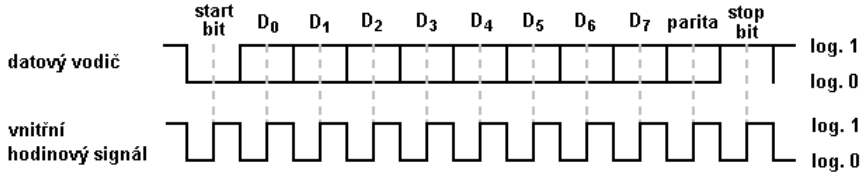
Jako základní sběrnicí, která je použita pro připojení modulů k systému, byla vybrána RS-485. Jedná se o velmi používanou a osvědčenou sběrnici, která vyžaduje pouze 2 až 3 vodiče a její maximální délka (přes 1 km) je bohatě dostačující. Snaha o využití této sběrnice na úkor bezdrátové technologie ZigBee je dána tím, že moduly v některých místnostech musí být kvůli příkonu napájeny ze sítě. Z praktických důvodů pak není vhodné napájet každý modul ze sítě v každé místnosti. Proto je mezi některými moduly nutné použít vodiče pro napájení a tím pádem není problém využít dva vodiče pro sběrnici RS-485. Moduly bez rádiové části pro ZigBee jsou navíc levnější. Naopak tam, kde je to nutné, například pro překonání větší vzdálenosti, je použita bezdrátová technologie ZigBee.

3.3.1 RS-485

RS-485 je specifikace pro poloduplexní sériovou sběrnici. Vychází z velmi známého a používaného zapojení sériového portu RS-232. Na sběrnici může být připojeno až 32 přijímačů a vysílačů [7]. Vysílat může v jeden okamžik pouze jeden vysílač, avšak všechny připojené přijímače mohou naslouchat. Funkčnost sběrnice je zaručena díky tomu, že všechny přijímače i neaktivní vysílače se v klidu musí nacházet ve stavu vysoké impedance a tedy nijak neovlivňovat komunikující zařízení. Specifikace RS-485 neříká nic o tom, jakým způsobem se budou zařízení vzájemně domlouvat. Veškeré řízení přenosu i arbitráž sběrnice je ponechána na protokolu vyšší vrstvy.

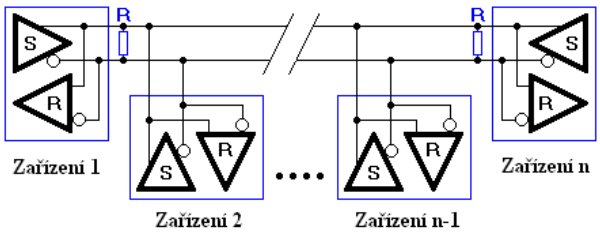
Sběrnice RS-485 využívá při vysílání diferenciálního kódování dat, kdy určitá polarita představuje logickou jedničku a obrácená polarita pak logickou nulu. Rozdíl mezi oběma napěťovými potenciály musí dosahovat hodnoty minimálně 0,2 Voltů, typicky se však používají mnohem vyšší rozdíly, například 5 V, 7 V či 12 V [7].

Jelikož zde není hodinový signál, musí být všechna propojená zařízení dohodnuta na rychlosti přenášení, která se udávají v bitech za sekundu, a na synchronizačních a kontrolních bitech. Ty se přidají k přenášeným datům a vytvoří rámec (viz obrázek 3.4). Počet datových bitů je nutno také předem dohodnout, jelikož kromě běžně používaných 8 se může přenášet i 6 či 7 bitů. Mezi synchronizační bity patří start bit, což je nulový bit, který předchází datovým bitům v rámci a upozorňuje příjemce na příchozí data, a jeden až dva stop bity, které rámec ukončují. Pro jednoduchou kontrolu dat slouží paritní bit umístěný mezi daty a stop bity. Parita je jednoduchým kontrolním mechanizmem nenáročným na výkon. Vysílací zařízení spočítá počet log. 1 v datových bitech a doplní paritní bit tak, aby zůstal v součtu s ním počet jedničkových bitů podle nastavení buď sudý nebo lichý. Parita není ovšem povinná. Posledním parametrem přenosu, který je nutno nastavit, je řízení toku dat. Řízení slouží jako hand-shaking. To se u sběrnice RS-485 nevyužívá, takže bývá trvale vypnuté.



Obrázek 3.4 – Rámec s vnitřním hodinovým signálem zařízení

Připojování zařízení ke sběrnici je znázorněno na obrázku 3.5. Přijímače i vysílače jsou připojeny prostřednictvím třístavových budičů, aby je bylo možné v čase, kdy nevysílají, možné přepnout do stavu vysoké impedance a tím nechat sběrnici volnou pro vysílání ostatních zařízení. Na koncích vedení jsou umístěny rezistory, které mají zabránit nechtěným odrazům signálů.



Obrázek 3.5 – Připojení zařízení ke sběrnici RS-485 [8]

3.3.2 ZigBee

Technologie ZigBee byla postavena na standardu IEEE 802.15.4., který je platný teprve od listopadu 2004 [8]. Využití nachází především u zařízení s nízkým výkonem. Spadá do bezdrátových sítí PAN (Personal Area Network), které jsou určeny pro komunikaci na malé vzdálenosti do 75 metrů. Ovšem díky multiskokovému ad-hoc směrování je možné rozsah rozšířit i mezi zařízení bez přímé rádiové viditelnosti. Primárně je ZigBee využívána v průmyslu pro tvorbu senzorových sítí. Pracuje v bezlicenčních pásmech 868 MHz, 902 až 928 MHz a 2,4 GHz [8]. Nejvyšší možná poskytovaná přenosová rychlost dosahuje 250 kbit/s.

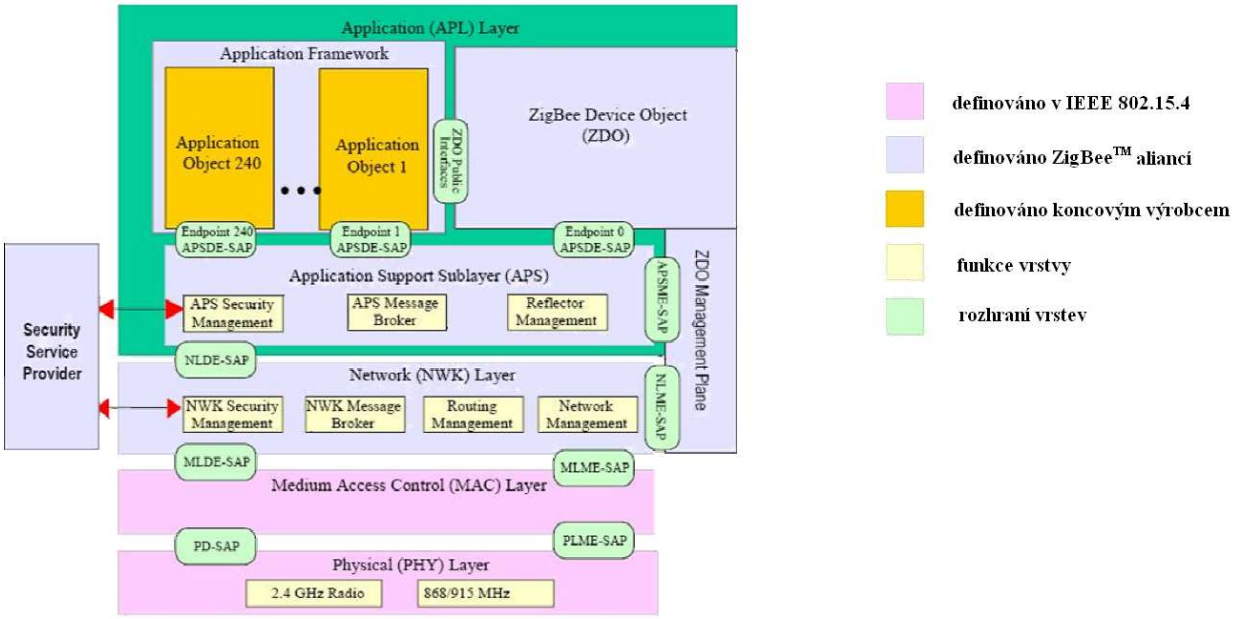
Bezdrátový standard ZigBee byl vytvořen především pro účely v průmyslu, kde technologie Bluetooth byla nedostačující zejména kvůli jejím příkonovým potřebám. Je to flexibilní technologie pro tvorbu jednoduchých i rozsáhlejších bezdrátových sítí, u nichž není požadován přenos velkého objemu dat. Hlavními rysy jsou spolehlivost, jednoduchá implementace, velmi nízká spotřeba a příznivá cena.

Standard podporuje tři základní režimy přenosu:

- periodický přenos
- nepravidelné přenosy
- opakující se přenosy s požadavkem na malé zpoždění

3.3.2.1 Struktura komunikačního standardu

Protokol je tvořen třemi vrstvami. Vrstva standardu IEEE 802.15.4., síťová vrstva (NWK) a aplikační vrstva (APL). Standard IEEE 802.15.4. definuje vrstvu fyzickou a linkovou (MAC) [8]. Obě vrstvy specifikují přístup na médium. Síťová vrstva realizuje připojení k síti a směrování paketů. Aplikační vrstva pak zajišťuje požadované služby spjaté s konkrétní aplikací.



Obrázek 3.6 – ZigBee model [9]

Fyzická vrstva

Pro fyzickou vrstvu definuje standard několik pásem kvůli pro využití v různých zemích, za účelem splnění všech požadovaných norem. Vrstva využívá QPSK modulaci a přenos prostřednictvím DSSS. Pro přístup k fyzickému médiu využívá CSMA/CA.

MAC vrstva

MAC vrstva definuje komunikační protokol založený na přenosu datových rámců.
Existují čtyři typy rámců:

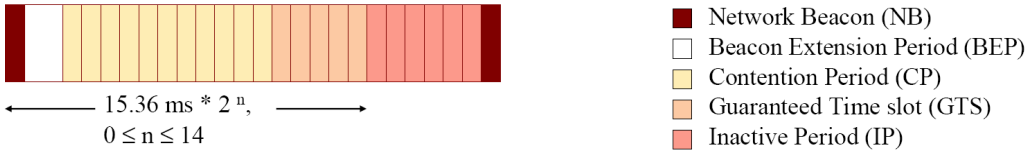
- Data Frame – pro přenos užitečných dat
- Acknowledgement Frame – pro potvrzování komunikace
- Beacon Frame – pro uspání koncových zařízení koordinátorem
- MAC Command Frame – pro nastavování a řízení

Koordinátor uspává koncová zařízení z důvodu snížení spotřeby energie. Synchronizace zařízení probíhá pomocí beacon rámců. Koncová zařízení jsou periodicky probouzena a vyzývána k datovým přenosům. Koordinátor pak data přenese k zařízení, pro které jsou určena. V případě, že nejsou používány beacon sekvence, zařízení periodicky kontaktují koordinátora.

K zasílání se zpráv se využívá tzv. super-rámec, který obsahuje několik bloků.
Mezi typy bloků patří:

- Network Beacon (NB) – využívá se pro časovou synchronizaci mezi uzly
- Beacon Extension Period (BEP) – interval před soupeřením o časové sloty, kdy nejsou přenášena žádná data
- Contention Period (CP) – doba soupeření uzlů o garantované časové sloty
- Guaranteed Time Slot (GTS) – garantovaný časový slot pro přenos mezi uzly
- Inactive Period (IP) – uzly jsou na nějakou dobu uspány (až 4 minuty)

Ukázka super-rámce je vidět na obrázku 3.7.



Obrázek 3.7 – Super-rámec [9]

Síťová vrsta

Síťová struktura ZigBee obsahuje nejméně jeden koordinátor a jedno nebo několik koncových zařízení. Koordinátor je plně funkční zařízení (FFD), které přebírá zodpovědnost za interní funkcionalitu sítě. Jeho úkolem je nastavit síť s daným PAN identifikátorem a umožnit koncovým zařízením připojení do sítě. FFD zařízení implementují kompletní protokolový rámec. Koncová zařízení jsou typicky zařízení s omezenou funkcí (RFD) a implementují pouze nezbytné protokolové knihovny. V síti dále mohou existovat směrovače realizované FDD zařízeními.

Každému zařízení je koordinátorem přidělena 64bitová adresa nebo zkrácená 16bitová adresa. Každá síť je sestavena koordinátorem a identifikována 16bitovou adresou (PAN ID). Síťová vrstva zajišťuje synchronizaci, směrování a zabezpečení. K zabezpečení využívá SSP (Security Services Provider) vrstvu, která zabezpečuje a kontroluje odchozí i příchozí rámce. Používá algoritmus AES v módu CCM. Vyšší vrstvy se starají o nastavení SSP.

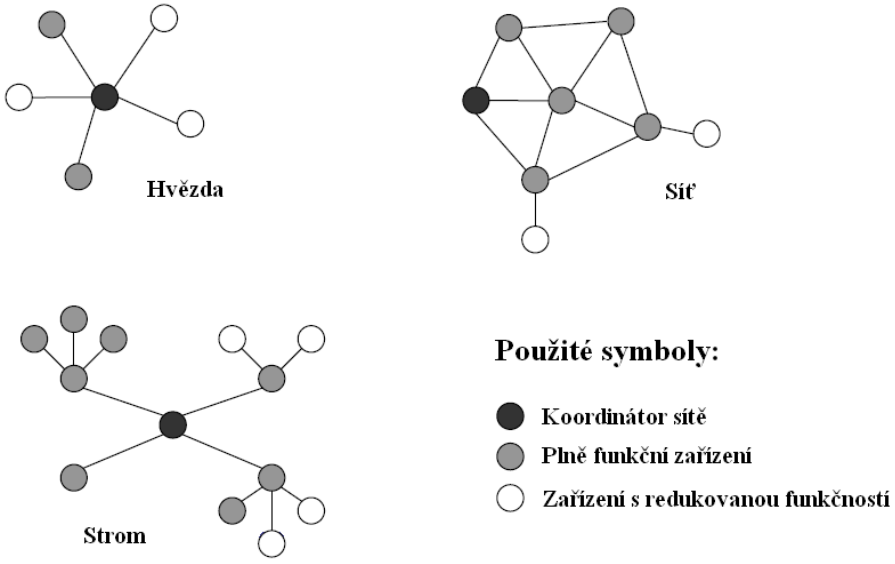
Aplikační vrstva

Aplikační vrstva se skládá z pomocné aplikační APS podvrstvy, ZigBee objektů (ZDO) a definovaných aplikačních objektů. APS vrstva slouží k párování zařízení. ZDO objekt určuje typ zařízení v rámci sítě (koordinátor, směrovač, koncové zařízení), slouží k vyhledávání nových zařízení a zodpovídá za zabezpečení. Uživatelské aplikační objekty pak implementují konkrétní požadavky aplikace.

3.3.2.2 Topologie ZigBee sítí

Standard ZigBee podle standardu IEEE 802.15.4 definuje tři základní topologie sítě. Jako základní je klasická hvězdicovitá topologie (star), ve které hraje jeden uzel roli koordinátora a ostatní uzly jsou k němu připojeny. Dalším typem je stromová struktura (tree), která dovoluje spojovat menší shluky s hvězdicovou topologií do jedné sítě tak, že neobsahuje cykly. Poslední typem je síť (mesh), kdy je možná redundance některých spojení a tak lze vytvářet síť libovolného uspořádání. Přehled topologií je uveden na obrázku 3.8.

Zařízení se podle funkčnosti ve standardu ZigBee dělí na zařízení plně funkční a zařízení s redukovanou funkčností. V plně funkčních zařízeních je kompletní protokolový rámec a zajišťují veškeré služby, které standard ZigBee stanovuje. Jedině z nich se může rekrutovat koordinátor sítě. V zařízeních s omezenou funkčností jsou kvůli požadavkům na minimální hardwarové nároky implementovány pouze nezbytné protokolové knihovny, proto se mohou vyskytnout jen na okraji jako koncová zařízení a komunikovat pouze s koordinátorem sítě.



Obrázek 3.8 – Příklady různých topologií ZigBee sítí: hvězda, strom a síť [9]

3.3.2.3 Zabezpečení

Bezpečnost ZigBee sítí je založena na AES algoritmu. Délka klíčů může být 32, 64 nebo 128 bitů [8]. ZigBee specifikace určuje zabezpečení na MAC, síťové i aplikační vrstvě. Převážně je implementována na síťové vrstvě a zajišťuje změnu klíčů, jejich transport, ochranu rámců a správu zařízení.

Zabezpečení na jednotlivých vrstvách:
fyzická vrstva – bezpečnost pomocí spolehlivého přenosu dat
linková vrstva – spolehlivý přenos, číslo rámců a sekvenční číslo
síťová vrstva – bezpečné odesílání a příjem rámců
aplikační vrstva – bezpečný přenos dat, správa klíčů

Bezpečnost v je ZigBee síti pomocí bezpečnostních režimů. Těmi mohou být:

- nezabezpečený režim – neposkytuje žádné ochranné prvky
- režim s přístupovými seznamy – použití access control listu (ACL), který obsahuje seznam uzlů, se kterými je možné komunikovat, nejedná se o kryptografickou ochranu
- zabezpečený režim – použití AES šifrování a daného operačního režimu šifry (AES-CTR, AES-CCM, AES-CBC), zajišťuje důvěrnost, integritu, aktuálnost přenosu dat a řízení přístupů

ACL tabulka

Tento seznam, který může obsahovat až 255 položek, obsahuje každé zařízení v síti. Pro každý záznam je uvedena adresa a cíle a stupeň zabezpečení. Umožňuje vyjmenovat všechny zařízení nacházející se na síti a ostatní tím odfiltrovat. Děje se tak na MAC vrstvě. Zařízení mohou komunikovat jen s těmi, které jsou uvedeny v seznamu.

Trust centrum

Bezpečnost je implementována pomocí Trust centra. To je na síti právě jedno. Je zodpovědné za autentifikaci zařízení, které se chtějí připojit k síti, distribuci síťového klíče všem uzlům a jeho údržbu a za propojení dvou koncových aplikací a umožnění bezpečného přenosu mezi dvěma zařízeními (distribuce master a linkových klíčů).

Typy klíčů

Používají se 3 základní klíče:

- hlavní klíč – tento druh klíče je volitelný a nepoužívá se přímo na šifrování rámců, používá se při proceduře výměny klíčů
- linkový klíč – je odvozený z hlavního klíče a představuje aktuální zabezpečení mezi dvěma uzly, které spolu komunikují. Může se periodicky měnit nebo být přednastaven z výroby
- síťový klíč – pracuje na síťové vrstvě a chrání před útoky z venku. Pro všechny zařízení v ZigBee síti je tento klíč stejný.

4 Návrh hardware

Celý systém se skládá z modulů připojených pomocí metalického vedení či bezdrátově, řídící jednotky, kterou obstarává univerzální počítač, a převodníku mezi interní sběrnicí systému RS-485 a rozhraním počítače RS-232. Z hlediska návrhu hardware budou v této kapitole rozebrány všechny uvedené části kromě univerzálního počítače.

Moduly se dělí na dva základní typy. Prvním je modul se senzory a efektory (dále označován i jako senzorový modul), který slouží k řízení teploty v místnosti, a bezdrátového ZigBee modulu, jehož hlavní funkci je bezdrátové propojení odlehlých částí systému. Tyto typy jsou dále podrobně popsány v části 4.1 a 4.2.

Pro oba typy modulů byl vytvořen společný návrh plošného spoje. Je to umožněno použitím stejných stavebních bloků. Části, které jeden či druhý typ modulu neobsahuje, nejsou osazeny součástkami. Tento způsob byl vybrán z důvodu levnější výroby desky plošných spojů.

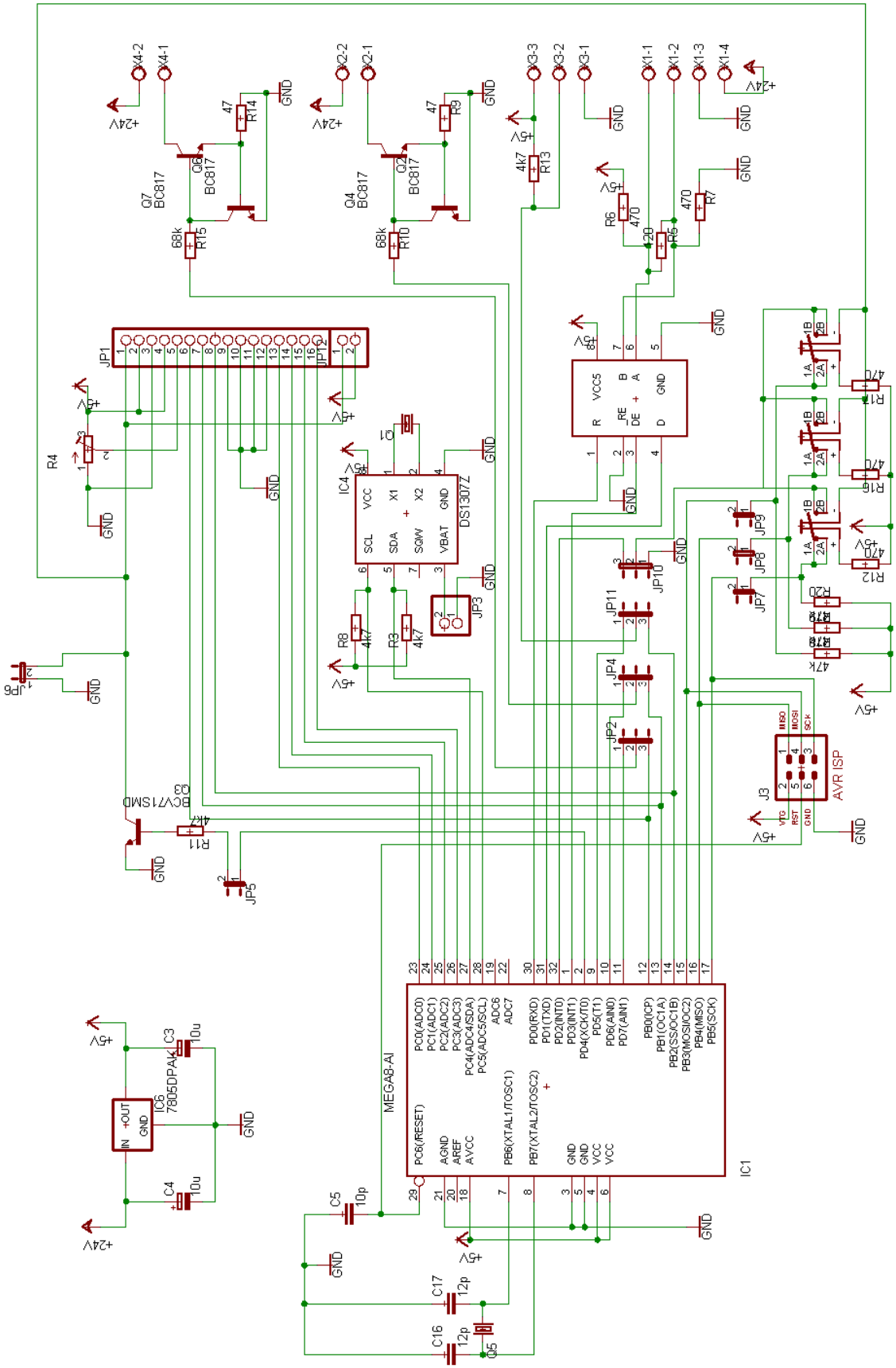
Oba typy modulů se liší v základním napájecím napětí. Je to způsobeno dostupností a cenou některých součástek a jejich tolerance pro určitá napájecí napětí. Problém způsobuje především ZigBee transceiver MC13192, který pracuje s napájecím napětím od 2 do 3,4V (doporučená hodnota), a LCD displej s řadičem, který musí být napájen 5V. Jelikož je každá z těchto součástek z výše uvedených důvodů těžko nahraditelná a každá je obsažena v jiném typu modulu, byly tyto moduly navrženy s odlišným napájecím napětím. Ostatní součástky mohou pracovat s oběma napětími. Kromě tohoto pracovního napětí se v modulech pracuje i s napětím 24V, které slouží v zapojení pro zdroj proudu pro výstupy (typicky pro regulovatelné hlavice otopných těles). Tímto napětím je modul napájen a nižší pracovní napětí je z něj získáváno pomocí stabilizátorů (viz obrázky 4.1 a 4.5).

Moduly jsou osazeny na oboustranné desce plošných spojů s prokovy a s použitím masky. DPS pro převodník je jednostranná.

4.1 Modul se senzory a efektory

Základem modulu je mikrokontrolér Atmega88 od firmy Atmel řídící veškerou činnost. K němu jsou připojeny funkční bloky, ke kterým patří obvod reálného času, LCD displej s řadičem, ovládací tlačítka, převodník rozhraní RS-232 na RS-485, ovládání výstupů se zdrojem proudu a připojení 1-Wire sběrnice se senzory.

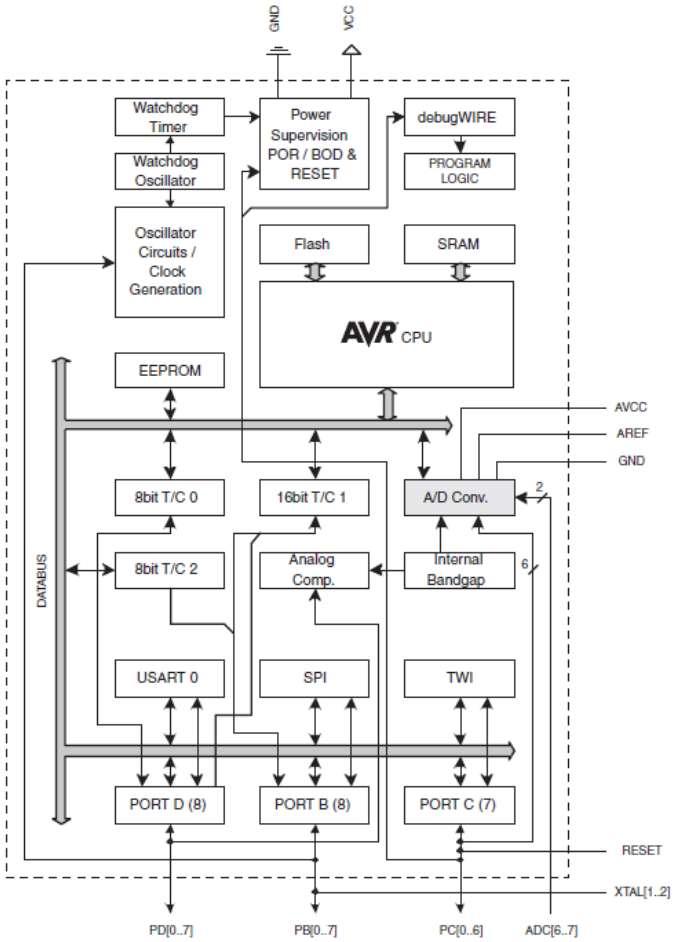
Návrh zapojení toho modulu je na obrázku 4.1. Mikrokontrolér je zde označen jako IC1. Dále se v zapojení objevuje RTC obvod jako IC4, stabilizátor napětí jako IC6 a transceiver RS-485 jako IC5. Zapojení těchto obvodů bude popsáno v další části.



Obrázek 4.1 – Schéma zapojení modulu se senzory a efektory

4.1.1 Mikrokontrolér

Pro řízení modulu byl vybrán mikrokontrolér Atmega88 společnosti ATMEL z řady AVR v SMD provedení v pouzdře TQFP32 [10]. Důvodem k výběru tohoto typu byl fakt, že se jedná o rychlý a cenově dostupný mikrokontrolér, ke kterému existuje kvalitní freeware vývojové prostředí a lze jej jednoduše programovat. Jeho blokový diagram je uveden na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2 – Blokové schéma Atmega88 [10]

4.1.1.1 Vybavení a vlastnosti

Zde je shrnuta v bodech základní charakteristika Atmega88 [10]:

- vysoce výkonný a nízkopříkonový 8-bitový mikrokontrolér
- RISC architektura (131 instrukcí, při frekvenci 20MHz hodinového taktu až 20 MIPS)
- 8kB Flash paměti pro program, až 10000 programovacích cyklů
- 512B EEPROM s možnými 100000 zápisy
- 1kB SRAM pro proměnné
- napájecí napětí od 2,7 do 5,5V
- hodinový kmitočet až 20MHz
- umožňuje programování ve dvou módech: „sériový download“ nebo „paralelní download“
- „zámky“ (lock bits) pro ochranu firmware
- nastavení chování a povolování funkcí při programování pomocí „pojistek“ (fuses)
- dva 8-bitové a jeden 16-bitový čítač/časovač
- 6 PWM kanálů
- 10-bitový ADC převodník

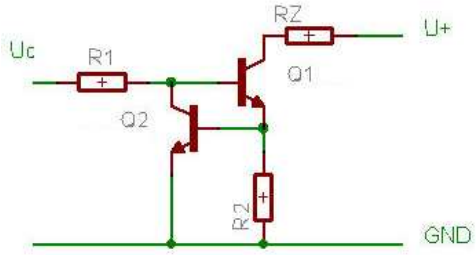
- USART a SPI rozhraní
- dvouvodičové sériové rozhraní kompatibilní s I^2C rozhraní Philips
- Watchdog obvod, Brown-out Detection obvod
- 5 úsporných režimů
- 23 vstupně/výstupních linek rozdělených do 4 portů

4.1.2 Zapojení výstupů

Modul má jako jednu z funkcí ovládání nějakého efektoru. Jelikož výstup mikrokontroléru dokáže poskytovat jen omezený proud, je nutno k ovládání použít externí obvod jako například zdroj proudu. Zdroj proudu byl zvolen z důvodu zajištění vyšší bezpečnosti a spolehlivosti, neboť v případě zkratu v obvodu efektoru dojde k omezení proudu na přibližně 30 mA, což je dostatečný proud pro sepnutí termostatické hlavice, ale na druhou stranu nepříliš velký, aby ohrozil napájecí zdroj a tím i funkci celého systému.

Zapojení zdroje proudu je vidět na obrázku 4.3. U_C zde označuje spínací napětí, kterým je napětí na výstup mikrokontroléru. U+ je napětí potřebné pro napájení efektoru, který je ve schématu uveden jako R_Z. V případě použití efektoru, který vyžaduje pro svou činnost větší proud, je možno provést úpravu hodnoty rezistoru R2.

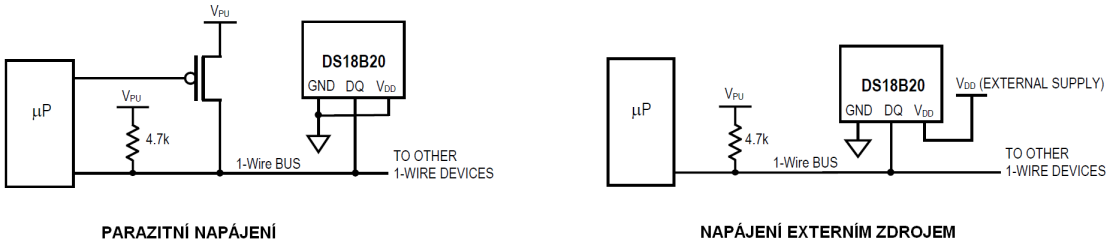
Modul obsahuje dva takové výstupy. První z nich, který je využíván k ovládání efektoru, je vyveden na svorkovnici X4. Druhý je vyveden na X2 a je záložní, s jeho využitím je počítáno do budoucna. Prozatím je na jeho výstupu negovaná logická úroveň z prvního výstupu.



Obrázek 4.3 – Spínaný zdroj proudu

4.1.3 Teplotní senzory

Jako teplotní senzory slouží digitální programovatelné teploměry DS18B20 od společnosti Dallas [11], které umožňují komunikaci po sběrnici s pouhým jedním datovým vodičem. Toto připojení je výrobcem označováno jako One Wire (někdy i 1-Wire). Senzory na sběrnici mohou být napájeny dvěma způsoby. Prvním je připojení k externímu zdroji a druhým je napájení tzv. parazitním napájením. To využívá vysoké úrovně na datovém vodiči DQ a napájí z něj celý senzor. Zároveň během toho nabíjí vnitřní kondenzátor C_{PP}, který slouží k napájení během doby, kdy je signál DQ na nízké úrovni. Při obou způsobech napájení je nutné připojit na datový vodič pull-up rezistor. Senzor může být napájen napětím od 3 do 5V.

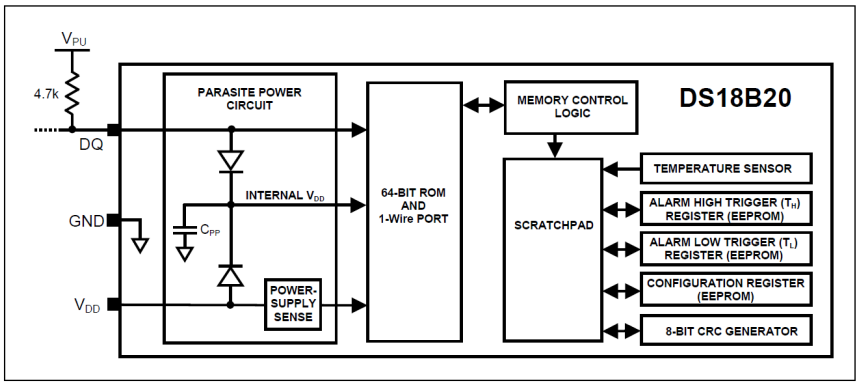


Obrázek 4.4 – Dva způsoby napájení senzorů na 1-Wire sběrnici [11]

Rozsah měřitelných teplot tímto senzorem se pohybuje od -55°C do +125°C. Rozlišení teplotního senzoru je nastavitelné od 9 do 12 bitů. Citlivost teplotního čidla je ±0.5°C na rozsahu teplot od -10°C do +85°C pro rozlišení na 9 bitech a ±0.0625°C při rozlišení na 12 bitech. Celý proces zjištění teploty a zapsání příslušných hodnot do registrů trvá maximálně 750ms.

Každý teplotní snímač této řady obsahuje unikátní 64bitový kód umístěný v ROM, díky němuž je možné jej na sběrnici adresovat. Prvních 8 bitů z tohoto kódu označuje typ senzoru (pro DS18B20 28h), dalších 48 určuje jednoznačné sériové číslo a posledních 8 bitů je určeno pro CRC, které je spočítáno z předchozích 56 bitů.

Protokol a postup pro měření teploty bude popsán dále v části 5.2.2.

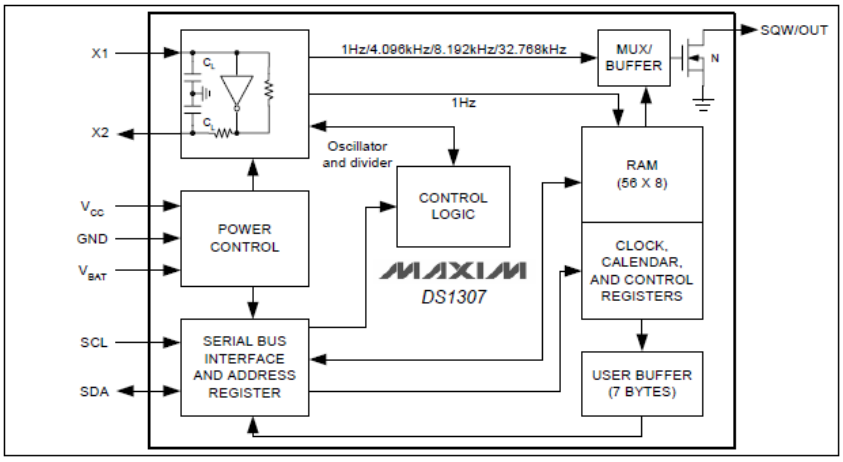


Obrázek 4.5 – Blokové schéma senzoru DS18B20 [11]

K modulu mohou být zapojeny 1 až 2 senzory podle toho, jakou funkci modul plní. Jsou napájeny pracovním napětím modulu. Napájení a datový vodič jsou vyvedeny na svorkovnici X3.

4.1.4 RTC obvod

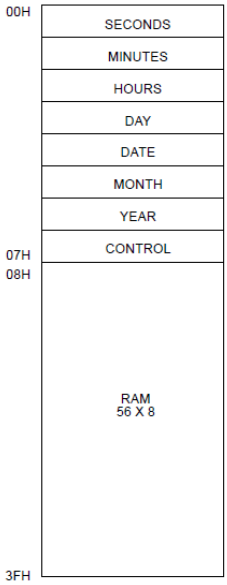
Do zapojení byl přidán také RTC obvod, protože bylo nutné znát pro správnou funkci programu údaje o čase. Samotný mikrokontrolér sice obsahuje jednoduchý RTC obvod, který ovšem nepostačuje. Vybraný externí obvod navíc dovoluje připojení baterie a možnosti uchování aktuálního času i během výpadku hlavního napájení. Toto je pro správnou funkci nezbytné.



Obrázek 4.6 – Blokové schéma obvodu DS1307Z [12]

Obvod Dallas DS1307Z [12], který byl vybrán, komunikuje prostřednictvím I^2C sběrnice. Tu lze přímo připojit k mikrokontroléru Atmega88, který ji přímo podporuje. Obvod poskytuje údaje o čase v sekundách, minutách, hodinách, dnech v týdnu, datu, měsících a rocích. Obsahuje také alarm, který při aktivaci aktivuje přerušení SQW (obrázek 4.6). V případě výpadku napájení

zabudovaný hlídací obvod automaticky přepne na záložní bateriové napájení. Pro oscilátor je použit krystal přesného času.



Obrázek 4.7 – Mapa paměti obvodu DS1307Z [12]

4.1.5 Převodník rozhraní RS-232 na RS-485

Mikrokontrolér Atmega88 je vybaven sériovým rozhraním (RS-232), které slouží ke komunikaci mezi dvěma zařízeními. Navrhovaný systém se ovšem skládá z více komunikujících modulů a pro jejich propojení je proto nutné použít sběrnici. V tomto případě se jeví jako ideální použití sériové sběrnice RS-485 (viz část 3.3.1), která využívá sériového portu a jednoho řídícího vodiče. Pro převod mezi rozhraním sériového portu a zvolené sběrnice slouží integrovaný obvod ST3485 [13]. Ke zmíněnému obvodu je připojen kromě rozhraní sériového kanálu (signálů RxD a TxD) ještě jeden výstupní signál, který ovládá stav vysoké impedance a tedy i čas, kdy modul vysílá data na sběrnici nebo je přijímá. Diferenciální výstupy RS-485 jsou vyvedeny na svorkovnici X1.

4.1.6 LCD displej

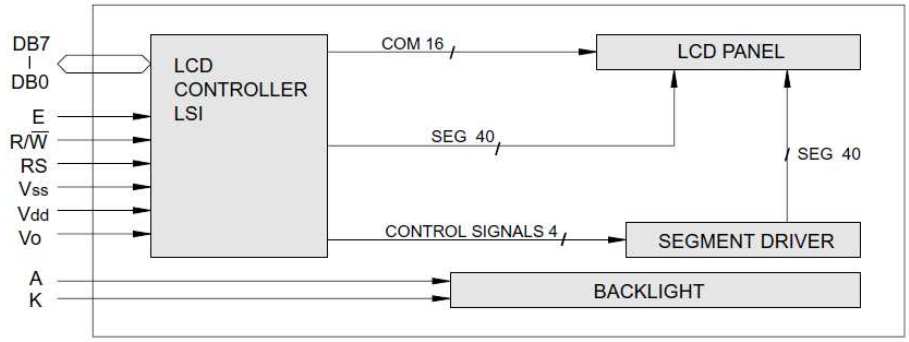
Pro moduly se senzory, které mají na starosti řízení teploty v jednotlivých místnostech, bylo navrženo připojení LCD displeje. Díky němu je možné zobrazovat uživateli aktuální údaje a s pomocí tlačítek některé i měnit.

V obvodu se používá LCD displej MC1602 [14]. Jedná se o dvouřádkový displej s 16 znaky na řádek v různých barevných kombinacích s LED podsvětlením. Zobrazování a komunikaci obstarává řadič HD44780 [15]. Ten obsahuje ve své ROM základních 128 ASCII a 128 národních znaků. Užitečnou vlastnosti je možnost definovat si v CGRAM 8 vlastních znaků.

K propojení s mikrokontrolérem je potřeba 4 nebo 8 datových vodičů, jeden na přepínání zápisu instrukcí / dat (RS) a další s hodinovým signálem (E). Pro případné čtení obsahu displeje je třeba připojit ještě jeden (R/W), který je jinak trvale uzemněn. Komunikace probíhá po 8bitech, slovo se tedy v případě komunikace po 4 datových vodičích posílá nadvakrát.

Kromě zobrazování znaků umí řadič displeje ještě několik dalších funkcí jako zobrazení a automatický posun textu doprava či doleva.

Pro napájení displeje a podsvícení stejně jako pro komunikaci s ním je nutné napájení 5V. Kontrast zobrazených znaků lze nastavit pomocí trimru Y1. Podsvícení displeje může být připojeno na výstup mikrokontroléru pomocí propojky JP5, nebo trvale zapnuto pomocí propojky JP6.



Obrázek 4.8 – Schéma LCD displeje MC1602 [14]

4.1.7 Tlačítka

Pro možnost vytvořit interaktivní menu byly na modul umístěny 3 podsvícené tlačítka. První z nich plní funkci výběru či návratu do editačního módu, další dvě jsou určeny pro navigaci v menu a změnu hodnot údajů. Podsvícení tlačítek je spojeno s podsvícením displeje, je tedy možné jej ovládat mikrokontrolérem či trvale zapnout.

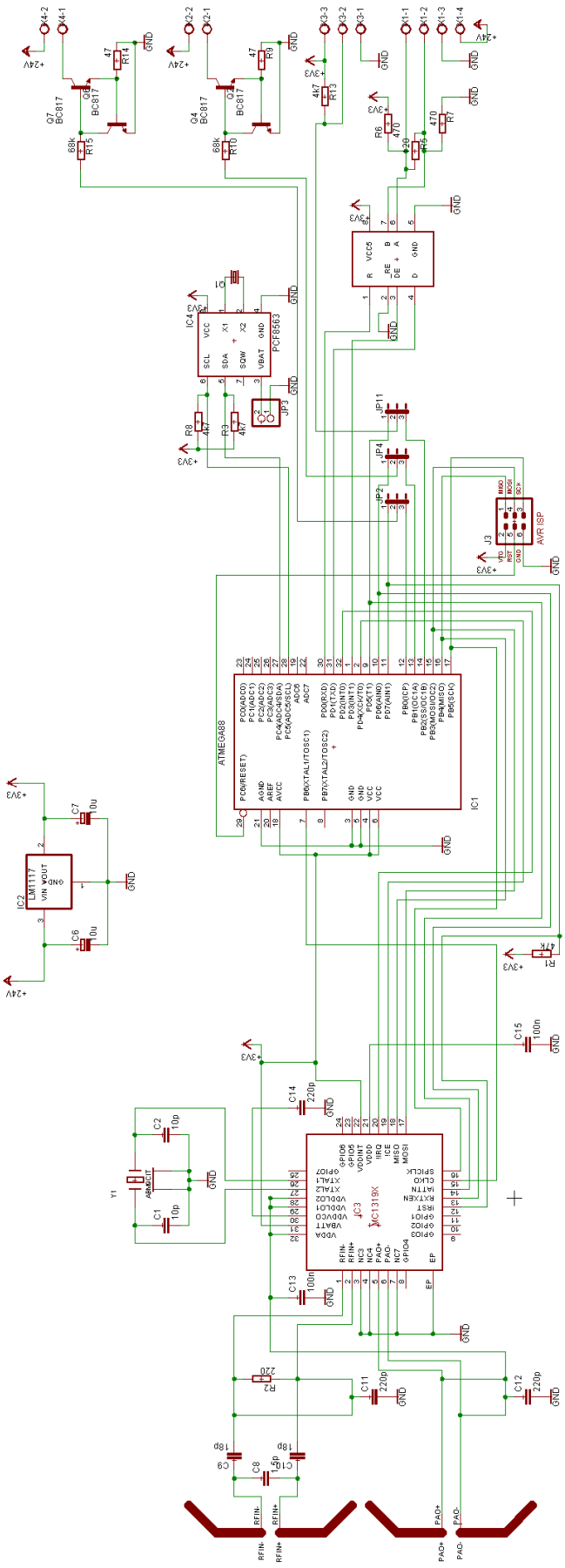
Připojení tlačítek k mikrokontroléru je možné pomocí propojek JP7 až JP10 nakonfigurovat dvěma způsoby. Prvním je klasické připojení pomocí společné země na jednom kontaktu tlačítka a připojení druhého kontaktu k vstupu mikrokontroléru s pull-up rezistorem. Další možností je připojení společného kontaktu k vstupu INT0 mikrokontroléru a využívání přerušení pro detekci stisknutého tlačítka.

4.2 Bezdrátový modul ZigBee

Bezdrátový modul má v systému funkci mostu mezi řídící jednotkou systému a jednotlivými částmi systému spojených prostřednictvím sběrnice RS-485 (viz obrázek 3.2). Ačkoliv plní jinou funkci než předchozí typ modulu, základní návrh zapojení i desky plošných spojů je podobný jako u modulu se senzory. Základem je opět mikrokontrolér Atmega88. K němu jsou připojeny některé výše uvedené funkční bloky jako převodník rozhraní RS-232 na RS-485 a volitelně také obvod reálného času, ovládání výstupů se zdrojem proudu a připojení sběrnice se senzory. V případě zapojení volitelných částí může modul plnit funkce obou typů modulů, tedy komunikovat bezdrátově a zároveň řídit teplotu v místnosti.

Návrh zapojení je vidět na obrázku 4.9. Mikrokontrolér je zde označen jako IC1, ZigBee transceiver MC13192 lze nalézt pod označením IC3. Modul je napájen napětím 3,3V, které zajišťuje stabilizátor označený jako IC2. Nechybí zde ani transceiver RS-485 (IC5).

Hodinový signál pro mikrokontrolér je získáván z výstupního signálu CLKO ZigBee transceiveru MC13192. Ten pracuje s oscilátorem o kmitočtu 8MHz.



Obrázek 4.9 – Schéma zapojení bezdrátového modulu

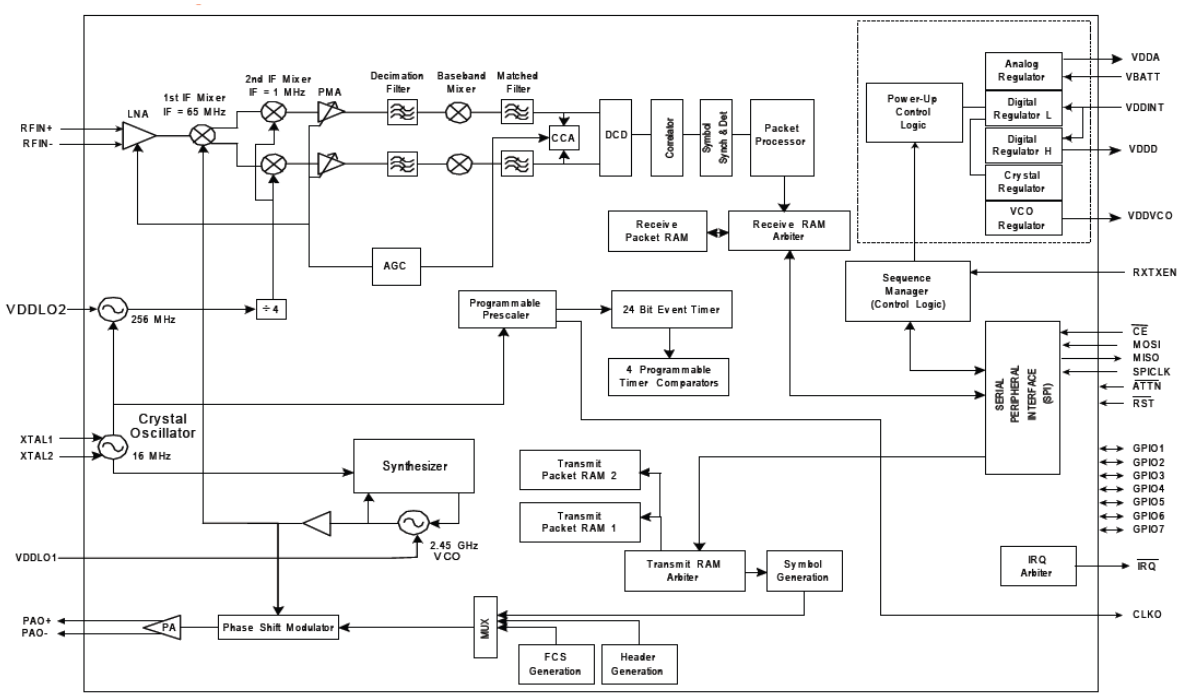
4.2.1 ZigBee transceiver a komunikace

Pro komunikaci podle protokolu ZigBee bylo zvoleno celkem netradiční spojení obvodu MC13192 od firmy Freescale [16] s mikrokontrolérem AVR od firmy Atmel. Toto zapojení je částečně převzato z projektu Anteeo [17], což je švédský ZigBee open source projekt. Toto spojení bylo vybráno z důvodu dostupnosti těchto obvodů na našem trhu a existujícího jednoduchého ZigBee stacku.

4.2.1.1 Obvod MC13192

Integrovaný obvod MC13192 funguje jako ZigBee transceiver. Kompletní modulátor a demodulátor se stará o fyzickou vrstvu podle standardu 802.15.4. Pracuje tedy v pásmu 2,4 GHz. O vyšší vrstvy protokolu ZigBee se stará mikrokontrolér či jiný řídicí obvod. Tento typ obvodu patřící k sérii MC1319x a dokáže pracovat kromě point-to-point i s hvězdicovitou topologií.

Transceiver obsahuje nízkošumový zesilovač (LNA), 1.0 mW zesilovač (PA), obvod fázového závěsu (PLL) s vnitřním napětím řízeným oscilátorem (VCO) a také řízení napájení, o které se sám stará. Používá kódování a dekódování v rozprostřeném spektru. Podporuje modulaci O-QPSK (Offset-Quadrature Phase Shift Keying) rychlostí 250 kbps ve 2 MHz kanálech s 5 MHz rozestupy mezi kanály. Pro přenos dat a řídících instrukcí využívá SPI rozhraní a přerušovací signály. Jednotlivé bloky transceiveru je možné vidět na obrázku 4.10.

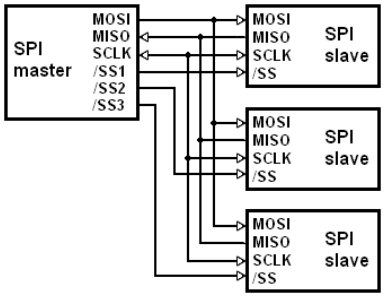


Obrázek 4.10 – Blokové schéma transceiveru MC13192 [16]

4.2.1.2 Komunikace s mikrokontrolérem pomocí SPI

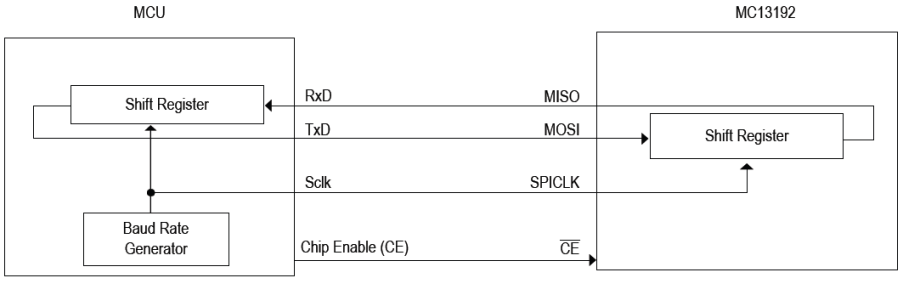
SPI (Serial Peripheral Interface) neboli sériové rozhraní slouží k přenosu dat mezi dvěma a více zařízeními. Přenos je synchronní a probíhá v plně duplexním módu. Zařízení pracují ve vztahu master-slave, kdy musí existovat vždy právě jedno zařízení typu master. Přenos dat probíhá po dvou datových vodičích. Vodič MOSI (master out, slave in) slouží pro přenos bitů z datového registru zařízení typu master do registru zařízení typu slave. Vodičem MISO (master in, slave out) se přenáší data v opačném směru. Přenos je synchronizován hodinovým signálem SCLK. Je možné nastavit, zda bude vzorkování dat probíhat s náběžnou či sestupnou hranou signálu. Povolování vysílání pro

zařízení typu slave se zajišťuje prostřednictvím dedikovaných signálů /SS (viz obrázek 4.11). [18][19]



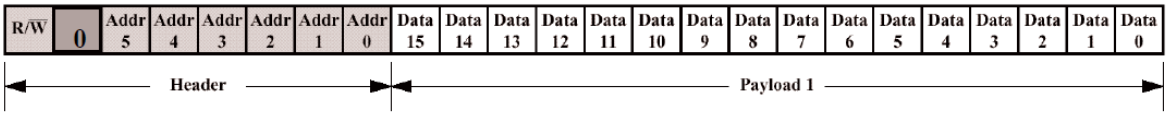
Obrázek 4.11 – Komunikace master-slave u SPI

Ke komunikaci mezi mikrokontrolérem a transceiverem je využito rozhraní SPI a některé další signály. Propojení signálů obou obvodů je zřejmé z obrázku 4.12. Signál /CE (Chip enable) slouží k povolování slave zařízení.



Obrázek 4.12 – Připojení transceiveru MC13192 k mikrokontroléru [16]

Mikrokontrolér přistupuje prostřednictvím SPI k řídícím a datovým programovatelným registrům transceiveru. Přistupovat může jen k těm, které jsou určeny pro čtení či pro zápis a čtení. Zápis či čtení probíhá výměnou rámců mezi oběma zařízeními. Takový rámec je rozdělen na hlavičku a data a jeho velikost je 24 bitů. Hlavička obsahuje bit R/W označující o jaký typ operace se jedná, dále nulový bit a 6 bitovou adresu registru, s kterým se na straně transceiveru pracuje. Datová část se skládá z 16 bitů. Struktura rámce je znázorněna na obrázku 4.13.



Obrázek 4.13 – Rámec SPI protokolu [16]

Pro přenos dat se využívají dvě metody. První je přenos po jednotlivých rámcích a druhou rekurzivní přístup pomocí skupiny rámců. Rekurzivní přenos se používá především k přístupu do RAM a k rychlému nakonfigurování transceiveru.

Začátek přenosu značí vynulování vstupu /CE. Poté následuje vyslání rámce. Ten musí mít vždy stejnou délku 24 bitů. Datové bity 0 - 15 jsou platné při zápisu na lince MOSI a při čtení z transceiveru na MISO. Hlavička je vždy posílána na MISO. Přenos rámce je ukončen nastavením signálu /CE na úroveň logické 1.

Rekurzivní přístup se používá pro čtení či zápis data v několika registrech s po sobě jdoucími adresami. Odpadá pak nutnost posílat neustále adresu a ukončovat a začínat přenos signálem /CE. Nejprve se vyšle kompletní rámec s hlavičkou prvního registru. Poté už může následovat více

nekompletních rámců bez hlavičky, po přečtení či zápisu 16 bitů datové části rámce následuje v transceiveru inkrementace adresy označující aktuální registr.

4.2.2 Anténa

Jednou z nejdůležitějších částí každého bezdrátového zapojení je anténa. Ta slouží k vysílání a příjímání dat prostřednictvím elektromagnetického vlnění.

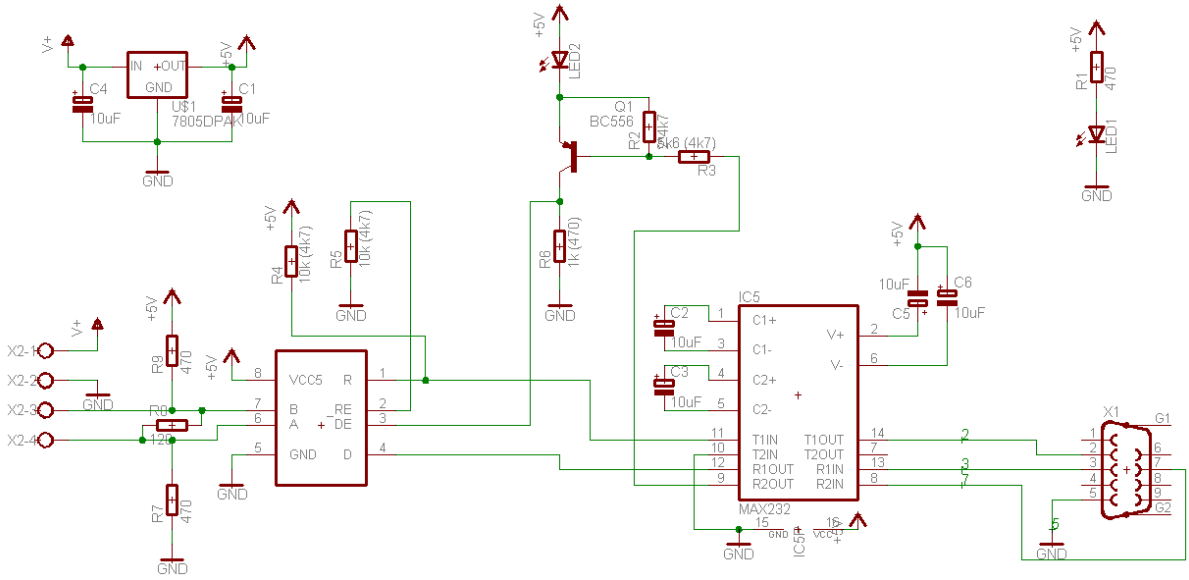
Pro ideální fungování v rádiovém rozsahu specifikace ISM (Industrial, Scientific, Medical), která pracuje v nelicencovaném pásmu 2,4GHz, je nutné uvažovat nad vysokofrekvenčními jevy při návrhu antény. Zejména musí být přívod k anténě impedančně přizpůsoben danému typu antény a musí splňovat předepsané útlumové charakteristiky. [20]

Anténu je možné realizovat jako leptanou, čipovou nebo externí připojenou pomocí konektoru SMA. Pro bezdrátový modul byla vybrána leptaná anténa, která by měla dostačovat a její návrh a realizace je nejsnadnější. Jelikož se jedná o vysokofrekvenční obvod, je nutné brát v úvahu i vlastnosti materiálu plošného spoje a to zejména ztráty a permitivitu substrátu PCB.

Použitý ZigBee transceiver pracuje se dvěma anténami. První slouží pro příjem a druhá pro vysílání. Obě antény mají stejné vlastnosti a jsou umístěny na PCB proti sobě každá z jiné strany (na jiné vrstvě). Vybraný dipólový tvar antény zajišťuje rozumné všesměrové pokrytí prostoru. Přívod k anténě a dodržení impedanční požadavků je zajištěno pomocí velmi tenkých leptaných cest.

4.3 Převodník mezi sběrnicí RS-485 a RS-232

V rámci systému bylo nutné použít i převodník mezi interní sběrnicí RS-485 a rozhraním RS-232 řídící jednotky (PC). Zapojení tohoto převodníku bylo převzato z [21]. Důležitou částí je zejména obvod MAX232 [22], který převádí napěťové úrovně sériové linky, které se pohybují od -15V do 15V, na TTL úrovně. Za něj je zapojen obvod SN75176 [23], který slouží jako RS-485 transceiver. K přenosu dat se využívají signály RxD, TxD a RTS rozhraní RS-232. Signál RTS slouží k ovládání stavu vysoké impedance na sběrnici RS-485.



Obrázek 4.14 – Schéma zapojení převodníku RS-485 na RS-232

5 Implementace firmware

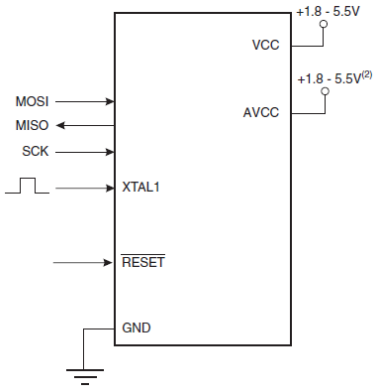
V této kapitole bude rozebrán ovládací program pro mikrokontrolér v jednotlivých částech systému. Kód je psán v jazyce C a pro překlad sloužil překladač *avr-gcc* [24].

Pro moduly byly vytvořeny tyto verze programu:

- *wired_ sensor_module* – určeno pro modul se senzory a efektory, pracuje s teplotou ze senzorů a na jejím základě ovládá jeden efektor na výstupu (modul s tímto programem je dále označován jako senzorový modul)
- *wired_effector_module* – určeno pro modul se senzory a efektory, na základě příkazu z řídící jednotky ovládá jeden či více efektorů na výstupu (modul dále označovaný jako efektorový modul)
- *zigbee_module_master* – určeno pro bezdrátový modul, pro modul umístěný na sběrnici k řídicí jednotce, obstarává funkci přenosu dat do dalších bezdrátových modulů
- *zigbee_module_slave* – určeno pro bezdrátový modul, pro modul umístěný na sběrnici, ke kterým jsou připojeny moduly se senzory a efektory

5.1 Programování mikrokontroléru

Programování mikrokontroléru je možné dvěma způsoby. Prvním je sériové programování prostřednictvím rozhraní SPI, druhým pak paralelní, kdy je nutné k programátoru připojit i některé vstupně výstupní porty. Pro navržené moduly byla vybrána první varianta programování, kdy může být mikrokontrolér programován přímo v cílovém zapojení (In-System programming). Není tedy nutné mikrokontrolér ze zapojení vyjímat a programovat v patici programátoru. Připojení mikrokontroléru při sériovém programování je vidět na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1 – Sériové připojení mikrokontroléru k programátoru [10]

Pomocí SPI portu lze programovat nejen FLASH paměť pro program, ale i EEPROM. Programování probíhá následujícím stylem. Nejprve je vstup /RESET připojen na zem. Před zahájením programování musí být nejprve vyslána instrukce pro povolení programování (Programming Enable). Poté již může proběhnout vlastní naprogramování. Celá operace je ukončena uvedením vstupu /RESET do stavu logické 1. Ihned po té proběhne bootovací sekvence a bootloader v mikrokontroléru spustí uložený program. Pokud mikrokontrolér nevyužívá během svého běhu jako referenci pro zdroj hodinového taktu svůj vnitřní oscilátor, je potřebné připojit na vstup XTAL1 externí zdroj hodinového signálu.

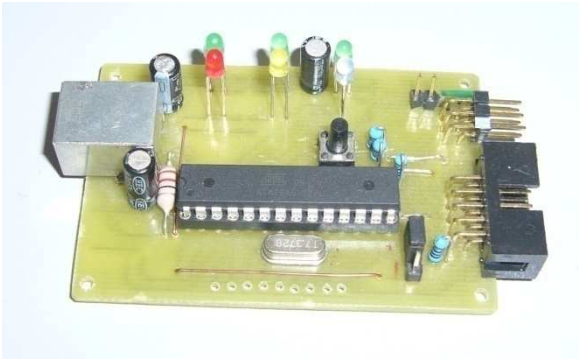
Při sériovém programování je nutné dodržovat správné nastavení pojistek (fuse bits) mikrokontroléru. Pojistky jsou 3 konfigurační byty (platí pro Atmega88) uložené v permanentní

paměti mikrokontroléru. Slouží k nastavení základního chování mikrokontroléru a jeho vstupů a výstupů a k zapínání či vypínání některých funkcí (například Brown-Out Detection). Pro sériové programování je důležité hlídat, aby pojistka (fuse bit) označená jako SPIEN, která povoluje sériové programování, byla nastavena a pojistka RSTDISBL umožňující zablokování RESET vstupu zůstala nenastavena. Stejně tak je důležité správné nastavení zdroje hodinového signálu. V případě chybného nakonfigurování těchto pojistek nebude možné mikrokontrolér sériově programovat a bude nutné použít paralelní metodu.

Pro programování modulů systému byly využity dále popsané dva programátory.

5.1.1 Programátor BiProg 2.1

Programátor BiProg slouží pro programování AVR a některých dalších mikrokontrolérů od společnosti Atmel. Mezi jeho výhody patří rychlost programování, jednoduchá konstrukce a podpora ze strany zvoleného vývojového prostředí AVR Studia 4 a to v režimu stk500v2 [25]. Programátor také umožňuje napájení cílového obvodu během programování. Velkou výhodou je také fakt, že se jedná o „Cardware“ a je tedy volný pro nekomerční využití. Popis konstrukce lze nalézt na stránkách autora [26]. Verze 2.1 programátoru byla vybrána, jelikož komunikuje s počítačem prostřednictvím USB rozhraní. Programátor je k cílovému obvodu připojen prostřednictvím 6 žilového ISP kabelu. Nevýhodou tohoto programátoru je možnost programování pouze napětím 5V.



Obrázek 5.2 – Programátor BiProg

5.1.2 Programátor ASIX Presto

Programátor Presto od výrobce ASIX slouží k programování mikrokontrolérů a velkého množství dalších součástek jako FPGA či CPLD [27]. K počítači se připojuje prostřednictvím rozhraní USB. Tento programátor je velmi rychlý, FLASH paměť mikrokontroléru dokáže naprogramovat již za několik málo sekund. K cílovému zapojení se připojuje opět pomocí ISP kabelu. Programátor k programování využívá napětí cílové desky a není tedy omezen pouze na jedno napětí. Programování probíhá prostřednictvím dodávaného programu *Up*.

Obrázek 5.3 – Programátor ASIX Presto

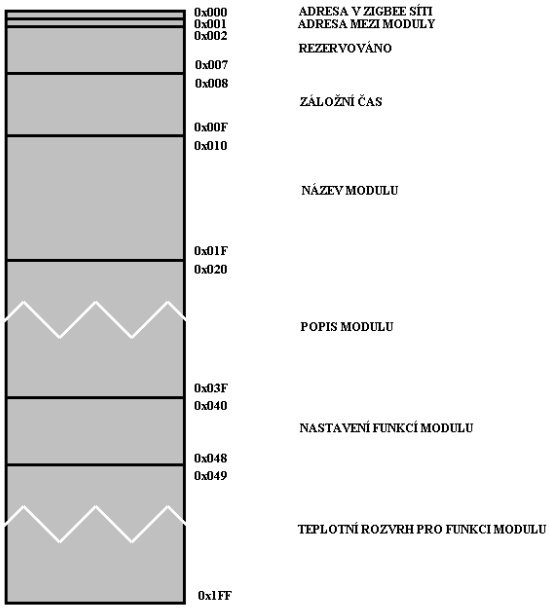
5.2 Knihovny pro jednotlivé prvky modulů

Pro jednotlivé logické celky obvodu byly vytvořeny knihovny ovládacích funkcí. Tyto funkce jsou pro všechny verze firmware společné. Dále následuje popis jednotlivých knihoven a jejich nejdůležitějších funkcí. Funkce mají pro přehlednost zvolen tvar jako *knihovna_název*.

5.2.1 EEPROM

Velmi důležitou roli pro správné fungování modulů hraje EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory). Jedná se o permanentní paměť, dokáže tedy uchovávat data i bez napájení a to po dobu až 20 let. Adresovat paměť je možné po jednotlivých bytech. Přístup do EEPROM je ovšem řádově pomalejší než přístup do klasické SRAM paměti mikrokontroléru a má omezený počet zápisových cyklů, proto by měla být používána jen v nezbytných případech.

V modulech jsou do EEPROM ukládány nastavení, která jsou nutná při spuštění. Jedná se o adresu ZigBee modulu, adresu senzorového modulu, uložení data a času, jména a popisu modulu a dále nastavení týkajících se řízení teploty. Rozmístění dat v paměti je vidět na obrázku 5.4



Obrázek 5.4 – Rozmístění dat v EEPROM

Pro načítání a ukládání dat do EEPROM byly využity funkce z AVR knihovny avr/eeprom.h pro načtení a uložení celého bloku dat. Tato operace je podstatně rychlejší než by bylo čtení či zápis po jednotlivých bytech.

Vybrané funkce knihovny

`eeprom_get_settings(void)`

Slouží pro načtení všech nastavení, která jsou za běhu často používána, a proto jsou na začátku načtena do paměti SRAM. Návratovou hodnotou je booleovská hodnota úspěšnosti načtení.

`eeprom_set_datetime(void)`

Ukládá aktuální čas a datum z RTC jednotky na určené místo paměti EEPROM. Využití má tato funkce v případě, kdy je nutné po restartu zjistit časové údaje a není možné je získat z RTC obvodu ani řídící jednotky. Návratovou hodnotou je booleovská hodnota podle úspěšnosti uložení.

`eeprom_set_termo_settings(void)`

Uložení veškerého nastavení týkající se řízení teploty v místnosti s výjimkou teplotního rozvrhu. Bez návratové hodnoty.

`eeprom_get_hour_table_temp(uint8_t weekday, uint8_t hour)`

Získání teploty z uloženého teplotního rozvrhu v paměti podle daného dnu v týdnu (*weekday*) a hodiny (*hour*). Návratovou hodnotou je zjištěná teplota.

`eeprom_get_weekday_table_temp(uint8_t weekday, uint8_t block[])`

Zjištění a uložení teplot z teplotního rozvrhu pro daný den v týdnu (*weekday*) do paměti odkazované proměnou *block*. Nemá návratovou hodnotu.

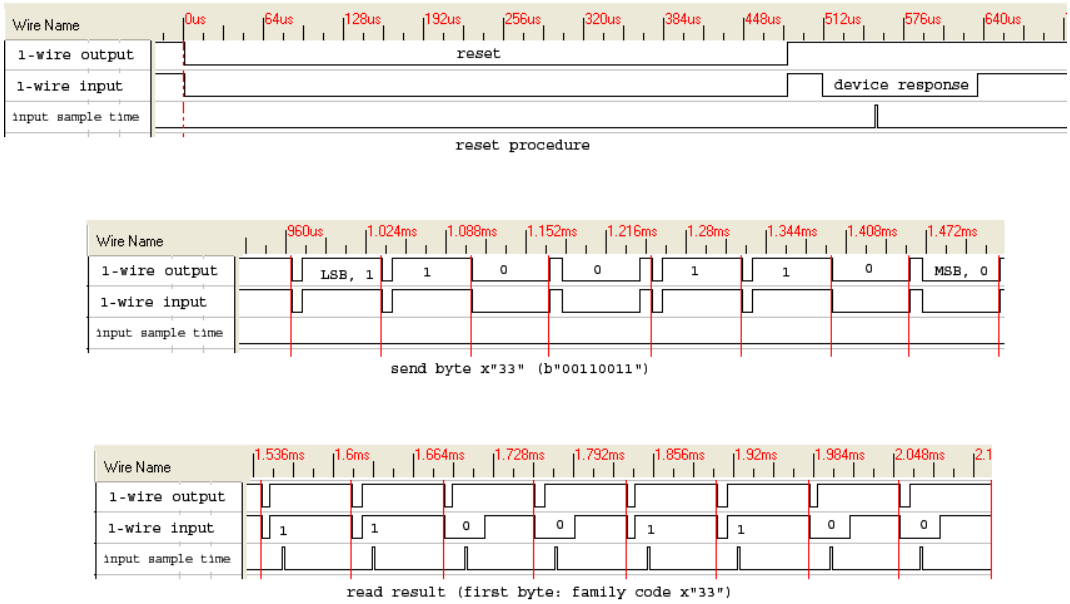
`eeprom_set_weekday_table_temp(uint8_t weekday, uint8_t block[])`

Uložení vektoru teplot v paměti označené parametrem *block* do teplotního rozvrhu pro daný den v týdnu (*weekday*). Nemá návratovou hodnotu.

5.2.2 Sběrnice One Wire

Sběrnice One Wire (nebo taky 1-Wire) od společnosti Dallas využívá jediného datového vodiče. Komunikace striktně dodržuje rozdělení na master a slave zařízení a jsou pro ni jednoznačně určeny časové sloty. Pokud neprobíhá na sběrnici žádná komunikace, je pomocí pull-up rezistoru vodič uveden na úroveň logické 1. Komunikace mezi master a slave zařízeními je zabezpečena prostřednictvím kontroly CRC. To je tvořeno polynomem $X^8 + X^5 + X^4 + X^0$. Knihovna byla převzata z [28].

Existují základní tři typy procedur při komunikaci na této sběrnici: reset zařízení, čtení a zápis bytu. Příklad s časovým diagramem, kde jsou vidět všechny procedury, lze vidět na obrázku 5.5.



Obrázek 5.5 – Typy procedur při komunikaci po sběrnici 1-Wire

Vybrané funkce knihovny

`ow_reset(void)`

Provádí reset zařízení na sběrnici. Návratovou hodnotou je booleovská hodnota podle úspěchu.

`ow_byte_wr(uint8_t b)`

Zapsání bytu (*b*) na sběrnici. Návratovou hodnotou je booleovská hodnota podle úspěchu.

`ow_byte_rd(void)`

Přečtení bytu ze sběrnice a jeho vrácení jako návratové hodnoty.

`ow_rom_search(uint8_t diff, uint8_t *id)`

Vyhledává sekvenčně zařízení na sběrnici a vrací jejich 64-bitový ROM kód jako parametr *id* (viz 4.1.3). Parametr *diff* určuje stav sekvenčního prohledávání. Návratovou hodnotou je následující stav pro vyhledávání.

`ow_command(uint8_t command, uint8_t *id)`

Zápis příkazu (*command*) pro zařízení s ROM kódem, na který ukazuje parametr *id*.

5.2.3 Teplotní senzory DS18x20

Knihovna pro obsluhu teplotních senzorů DS18B20 a DS18S20. Využívá knihovny s funkcemi pro sběrnici One Wire. Knihovna byla převzata z [29] a upravena.

Vybrané funkce knihovny

`DS18X20_get_device_count(uint8_t *count)`

Zjišťuje počet senzorů připojených ke sběrnici pomocí sekvenčního vyhledávání a jejich počet vrací prostřednictvím parametru *count*. Návratovou hodnotou je booleovská hodnota podle úspěchu.

`DS18X20_find_sensor(uint8_t *diff, uint8_t id[])`

Získání ROM kódu zařízení (*id*), které je nalezeno na základě stavu předchozího sekvenčního vyhledávání (*diff*). Návratovou hodnotou je booleovská hodnota podle úspěchu.

`DS18X20_start_meas(uint8_t with_power_external, uint8_t id[])`

Zaslání příkazu pro začátek měření teploty pro senzor, jehož ROM kód odpovídá parametru *id*. V případě, že *id* je roven hodnotě *NULL*, je příkaz zaslán všem senzorům. Parametr *with_power_external* určuje typ napájení zařízení na sběrnici. Návratovou hodnotou je booleovská hodnota podle úspěchu.

`DS18X20_read_meas(uint8_t id[], uint8_t *subzero, uint8_t *cel, uint8_t *cel_frac_bits)`

Získání hodnoty teploty ze senzoru, jehož ROM kód je roven parametru *id*. Teplota je získána jako soubor hodnot, do něhož patří desetinná část hodnoty určená zlomkem (*cel_fract_bits*), celá část hodnoty (*cel*) a znaménko (*subzero*). Návratovou hodnotou je booleovská hodnota podle úspěchu.

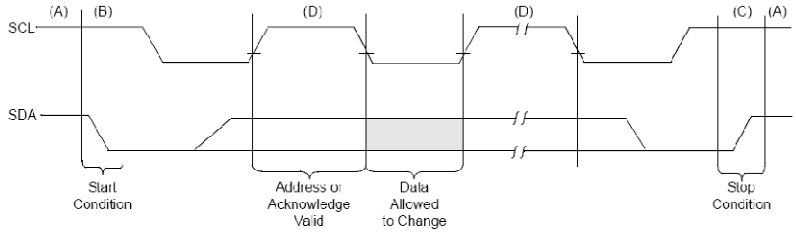
5.2.4 Two Wire Interface (I^2C)

Knihovna pro obsluhu Two Wire Interface rozhraní mikrokontroléru, k němuž je připojen RTC obvod. Byla převzata z [30].

Two Wire Interface je kompatibilní se I^2C sběrnicí od společnosti Philips. Ta je založena poloduplexním přenosu dat prostřednictvím dvou vodičů. Prvním z nich je datový vodič SDA, který slouží pro přenos dat oběma směry, a druhým je vodič SCL s hodinovým signálem. Hodiny smí generovat pouze zařízení označené jako master (většinou mikrokontrolér). Jelikož je na sběrnici

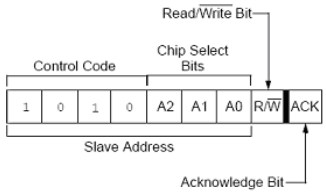
možné připojit i více periferních zařízení, je nutné, aby každé mělo svou unikátní adresu. Ta je poslána při zahájení přenosu na začátku paketu. Pro situaci, kdy na stejnou sběrnici zapisuje více zařízení, je I^2C vybaveno detekcí kolizí. Oba vodiče sběrnice jsou zapojeny jako otevřený kolektor. Z toho také vyplývá nutnost připojení pull-up rezistorů ke kladnému napětí, což zajistí logickou 1 v klidovém stavu na obou vodičích. I^2C slouží k připojování spíše pomalejších periferií, protože přenos může probíhat pouze v jednom směru a maximální frekvence je omezena podle verze na 100kHz nebo 400kHz.

V protokolu I^2C jsou přesně definovány situace, podle kterých mohou zařízení poznat začátek a konec přenosu dat či klidový stav na sběrnici. Pokud žádné zařízení nevysílá, je SDA i SCL na úrovni logické 1. Jedině v tomto stavu lze zahájit přenos. Ten musí začínat startovací podmínkou, která je určena přechodem SCL z klidového stavu na úroveň logické 0. Konec přenosu zase indikuje stop podmínka, při které je nejprve datový a poté i hodinový vodič nastaven na úroveň logické 1. Mezi těmito podmínkami musí probíhat změna úrovní na datovém vodiči pouze při SCL na úrovni logické 0. Situace je znázorněna na obrázku 5.6.



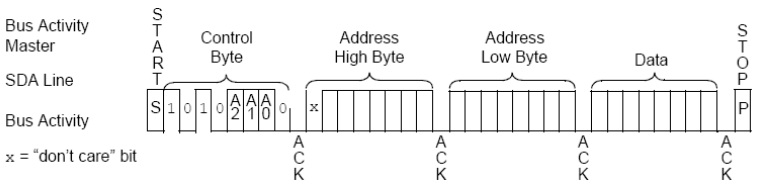
Obrázek 5.6 - Zahájení a ukončení přenosu po I^2C sběrnici [12]

Po zahájení musí přijít kontrolní byte, který prvními 7 bity určuje, pro které slave zařízení je paket určen. První čtyři byty z této adresy jsou dány pevně již výrobcem, zbývající je možno zvolit libovolně. Posledním bitem je určeno, zda se bude provádět čtení či zápis. Po kontrolním bytu musí slave potvrdit přijetí pomocí bitu ACK, tedy uvedením SDA do log. 0. I v tomto případě je generování nástupné hrany signálu SCL pro přečtení ACK v režii mastera. Toto potvrzování probíhá po každém odeslaném bytu.



. Obrázek 5.7 - Kontrolní byte s potvrzovacím bitem [12]

Pro zápis bytu je nutné po start bitu a kontrolním bytu s příznakem pro zápis poslat 15 bitovou adresu požadované paměťové buňky. Ta je rozdělena na dva byty, po každém následuje ACK bit. Po adrese se odesílá datový byte od nejméně významného bitu. Přenos končí stop bitem.

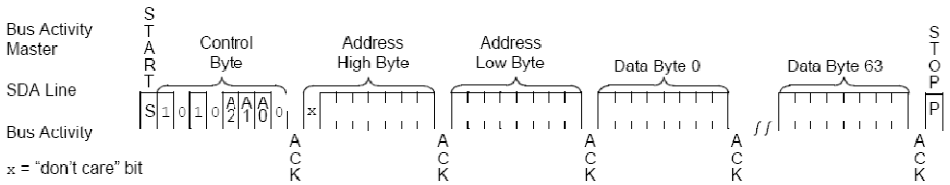


Obrázek 5.8 - Zápis bytu [12]

Nyní by mohl nastat problém, pokud by hned za touto operací následovala další a zápis by v paměti ještě nebyl dokončen. Proto se zde vkládá dotazování na potvrzení zápisu (acknowledge

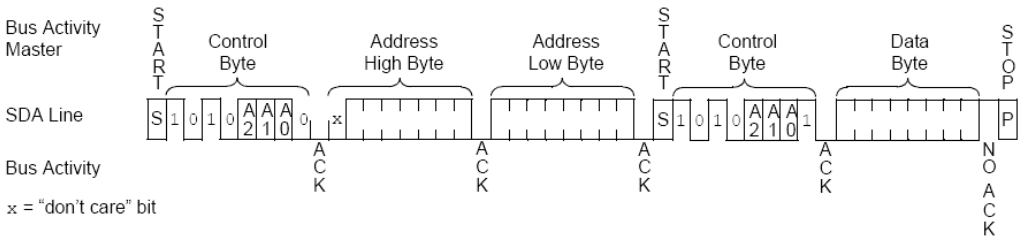
polling). To probíhá tak, že po ukončení operace zápisu následuje další pokus o zápis, ten ovšem zůstává jen u poslání start bitu a příslušného kontrolního bytu. Pokud tento fiktivní zápis slave potvrdí, tak už je předchozí zápis hotov a lze provádět další operace.

Do paměti lze zapisovat nejen po jednotlivých bytech, ale také po 64 bytových stránkách. K tomu slouží podobná konstrukce jako u zapisování bytu, pouze datových bytů je najednou odesláno 64.



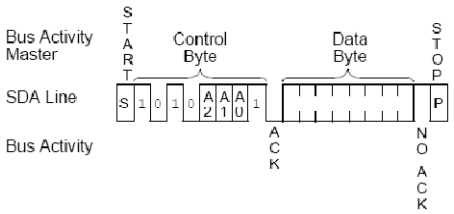
Obrázek 5.9 - Zápis stránky [12]

Pro přečtení bytu na požadované adrese je nutné použít fiktivní zápis na adresu, která má být přečtena. Fiktivní zápis se opět skládá ze start bitu a kontrolního bytu s příznakem pro zápis, po němž ale následuje další kontrolní byte tentokrát s příznakem pro čtení a poté datovým bytem a stop bitem. Pasáž od druhého kontrolního bytu se shoduje s předchozí operací.



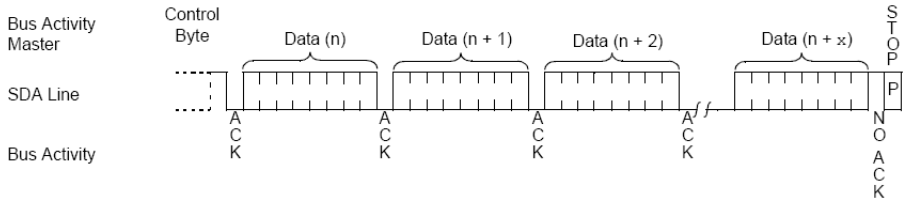
Obrázek 5.10 - Čtení bytu [12]

Pokud je aktuální nastavená adresa po minulé operaci čtení či zápisu shodná s požadovanou adresou pro čtení, lze adresaci vynechat a po odeslání kontrolního bytu rovnou přejít ke čtení.



Obrázek 5.11 - Čtení bytu na aktuální adrese [12]

Stejně jako při zápisu existuje i u čtení možnost načíst celou stránku paměti najednou. Princip je také stejný, kdy se ke čtení stránky použije stejný postup jako u čtení bytu na určité adrese s tím rozdílem, že čtených datových bytů je 64. Zde je ovšem nutné počítat kromě posledního u všech datových bytů s potvrzovacím ACK bitem.



Obrázek 5.12 - Čtení stránky [12]

Vybrané funkce knihovny

`i2c_start(unsigned char addr)`

Zahájí komunikaci po sběrnici tím, že po nastavení startovací podmínky odešle kontrolní byte podle parametru *addr*, jehož součástí je adresa i směr komunikace (čtení nebo zápis). Návratovou hodnotou je booleovská hodnota podle úspěchu.

`i2c_start_wait(unsigned char addr)`

Má podobný význam jako předchozí funkce, ale čeká, až bude zařízení připraveno.

`i2c_stop(void)`

Provede ukončovací podmínku.

`i2c_write(unsigned char data)`

Zapíše byte dat (*data*) na sběrnici. Návratovou hodnotou je booleovská hodnota podle úspěchu.

`i2c_read(unsigned char ack)`

Přečte byte dat ze sběrnice. Podle parametru *ack* nastaví ACK bit. Návratovou hodnotou je přečtený byte.

5.2.5 RTC obvod

Funkce pro komunikace s RTC obvodem využívají především funkce pro Two Wire Interface. Rozsah a rozmístění dat v paměti RTC obvodu DS1307Z je vidět na obrázku 4.8.

Vybrané funkce knihovny

`rtc_set_datetime(uint8_t weekday, uint8_t year, uint8_t month, uint8_t date, uint8_t hour, uint8_t minute, uint8_t second)`

Nastaví aktuální čas obvodu tím, že přepíše registry s časovými údaji mapované do jeho paměti. Návratovou hodnotou je booleovská hodnota podle úspěchu.

`rtc_get_datetime(uint8_t *weekday, uint8_t *year, uint8_t * month, uint8_t *date, uint8_t *hour, uint8_t *minute, uint8_t *second)`

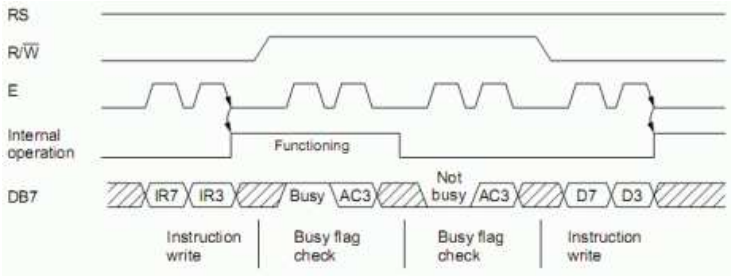
Zjištění všech dostupných hodnot aktuálního času z obvodu načtením časových údajů z paměti obvodu. Návratovou hodnotou je booleovská hodnota podle úspěchu.

`rtc_get_weekday_hour(uint8_t *weekday, uint8_t *hour)`

Zjištění aktuálního dne v týdnu a hodiny z RTC obvodu. Ty se používají pro zjištění potřebné teploty z teplotního rozvrhu. Návratovou hodnotou je booleovská hodnota podle úspěchu.

5.2.6 LCD displej

Komunikace s LCD displejem s řadičem HD44780 probíhá prostřednictvím 4 bitové datové sběrnice, kterou doplňují ještě 3 řídicí signály. Nastavení parametrů komunikace se provádí stanoveným způsobem před začátkem vlastního posílání znaků a příkazů. Způsob komunikace je vidět na časovém diagramu na obrázku 5.13. Knihovna byla převzata z [30] a upravena.



Obrázek 5.13 – Princip komunikace s LCD displejem [14]

Vybrané funkce knihovny

`lcd_clrscr(void)`

Provede smazání displeje a přesune kurzor na počátek.

`lcd_home(void)`

Přesune kurzor na počátek.

`lcd_gotoxy(uint8_t x, uint8_t y)`

Nastaví pozici kurzoru na *x*-tý znak na řádku a *y*-tý řádek.

`lcd_putc(char c)`

Zobrazí znak *c* na pozici, kde se nachází kurzor a posune jej o jednu pozici.

`lcd_puts(const char *s)`

Zobrazí řetězec *s* ukončený escape sekvencí *\0* na pozici, kde se nachází kurzor a posune jej.

`lcd_command(uint8_t cmd)`

Pošle příkaz *cmd* displeji, který jej provede.

`lcd_load_chars(unsigned char *charArray)`

Uloží do paměti CGRAM displeje sadu znaků, jejichž bitová maska je umístěná v poli *charArray*.

5.2.7 Tlačítka

Pro obsluhu tlačítek je využita technika pollingu. Vstupní linky mikrokontroléru, kde jsou tlačítka připojena, jsou neustále čteny a při zjištění změny na vstupech a splnění ochranné podmínky proti zákmitům je vrácen číselný kód stisknutého tlačítka

Vybraná funkce knihovny

`keys_wait_until_pressed(uint8_t wait)`

Pokud je parametr *wait* roven hodnotě *KEY_WAIT*, funkce čeká na stisk libovolného tlačítka, v opačném případě zkontroluje stav tlačítek, ale neblokuje. V obou případech se provádí kontrola na délku stisknutí tlačítka a rozeznávají se dvě hodnoty délky stisku – *LONG* (při držení delším než 200 ms) a *SHORT*. Návratová hodnota je byte skládající se ze dvou 4 bitových hodnot. Vyšší nibble udává délku stisku, nižší kód stisknutého tlačítka.

5.2.8 MC13192

Pro komunikaci prostřednictvím ZigBee standardu se často využívá sada funkcí označovaná jako ZigBee stack. Jedná se o funkce, které zpracovávají a zapouzdřují jednotlivé vrstvy technologie. ZigBee stacky mohou končit na různých vrstvách standardu. Mezi kompletní stacky se řadí například Z-Link [31] nebo BeeKit [32]. Mezi zjednodušené stacky končící na MAC vrstě (označované SMAC) patří například SMAC stack od společnosti Freescale [33].

Pro komunikaci prostřednictvím transceiveru MC13192 byl použit jednoduchý ZigBee stack typu SMAC. Konkrétně se jedná se o open source SMAC stack [14], který je distribuovaný pod licencí GPL [28].

Vybrané funkce knihovny

`SPI_Read13192Register(unsigned char reg, unsigned short *word)`

Přečte obsah registru transceiveru umístěného na adrese *reg* a vrátí jej parametrem *word*.

`SPI_Write13192Register(unsigned char reg, unsigned short word)`

Zapíše do registru umístěného na adrese *reg* hodnotu parametru *word*.

`SPI_Modify13192Register(unsigned char reg, unsigned short mask, unsigned short word)`

Změní obsah registru umístěného na adrese *reg* podle parametru *mask* a *word*.

`MC1319x_MCU_Init(void)`

Inicializuje nastavení řídících linek transceiveru a provede jeho hardwarový reset.

`MC13192_sendPacket(char size)`

Odešle paket uložený v interním řetězci bytů o délce dané parametrem *size*.

`MC13192_receivePacket(unsigned long timeout)`

Spustí čekání na příjem dat a nastaví čas vypršení (timeout), po jehož uplynutí se čekání přeruší. Návratovou hodnotou je počet přijatých bytů.

`MC13192Init(void)`

Počáteční inicializace registrů transceiveru.

`MC13192_setPower(unsigned char iPower)`

Nastavení vysílacího výkonu podle hodnoty parametru *iPower*.

`MC13192_setChannel(unsigned char iChannel)`

Nastavení kanálu pro komunikaci podle parametru *iChannel*.

`packetSentCallback(void)`

Callback funkce, která je volána po odeslání paketu funkcí *MC13192_sendPacket(size).*

`packetReceivedCallback(void)`

Callback funkce, která je volána po přijetí paketu ve funkci *MC13192_receivePacket(timeout).*

5.2.9 Sběrnice RS-485

Sběrnice RS-485 tvoří interní spojení mezi moduly systému tam, kde je to možné pomocí vodičů. Ovládání sběrnice spočívá v práci se sériovým portem mikrokontroléru a nastavováním řídicího signálu, který uvádí výstupy transceiveru sběrnice RS-485 do stavu vysoké impedance. Přijímání dat ze sběrnice probíhá asynchronně s využitím přerušení sériového portu. Funkce pro ovládání jsou velmi robustní, slouží k odesílání či přijímaní celých paketů.

Vybraná funkce knihovny

`usart_transmit(unsigned char *data, unsigned char len)`

Slouží k odeslání řetězce *data* o délce *len* na sběrnici.

`usart_send_message()`

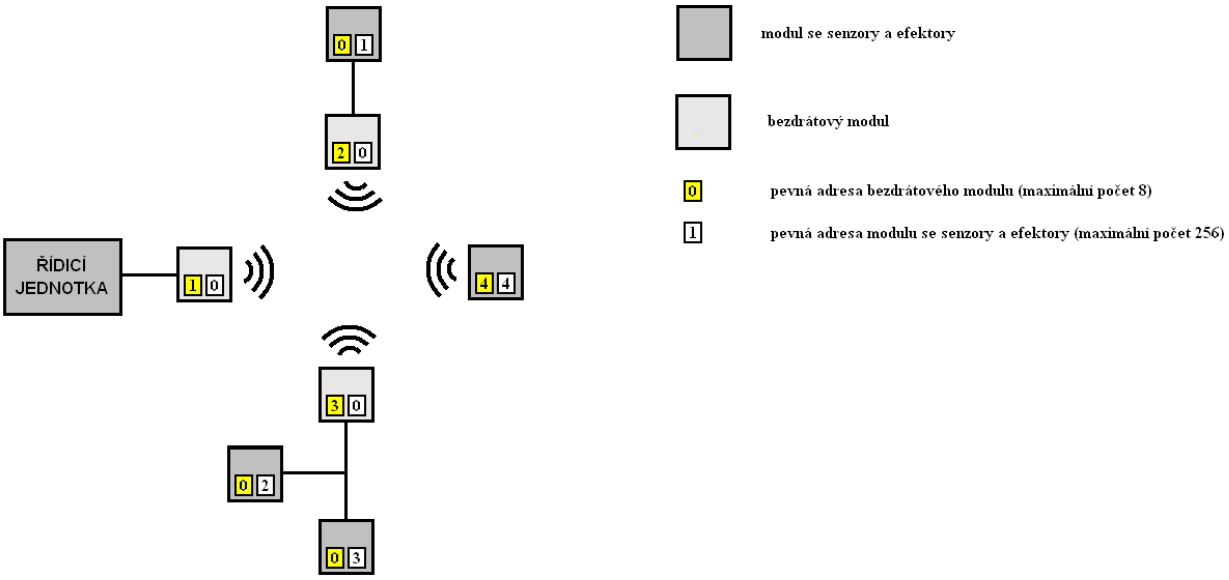
Komplexní funkce odesílající paket (viz obrázek 5.15) na sběrnici. Nastavení a odesílaná data jsou uloženy v předem nastavených proměnných.

`usart_received(unsigned char read_char)`

Funkce volaná při asynchronním přijetí bytu ze sběrnice. Obsahuje stavový automat, který udržuje informaci o tom, který byte z paketu byl naposledy přijat. V případě přijetí posledního bytu závěrečné posloupnosti bytů paketu nastaví příznaky přijetí paketu.

5.3 Implementace komunikace mezi řídicí jednotkou a moduly

Jelikož komunikace může probíhat mezi řídicí jednotkou a senzorovým modulem napřímo či prostřednictvím bezdrátového přemostění pomocí ZigBee modulů, bylo nutné navrhnout pro komunikaci vhodný protokol. Kvůli použitému jednoduchému ZigBee stacku je nutné řešit jak navazování spojení, tak i směrování v rámci ZigBee sítě. Možné zapojení celého systému je vidět na obrázku 5.14.



Obrázek 5.14 – Příklad zapojení s vyznačením adres modulů

Jednotlivým bezdrátovým modulům byly přiděleny adresy, které hrají důležitou roli při směrování v navržené ZigBee infrastruktuře. Adresami mohou být čísla s hodnotami mocnin čísla 2, počínaje 2^0 a konče číslem 2^7. První adresa vždy musí příslušet modulu, který je drátově připojen k řídicí jednotce. Adresy mají význam pro fungování v případě bitové masky, která je posílána jako druhý byte v paketu (viz obrázek 5.15) a označuje, které bezdrátové moduly již daný paket jednou zpracovaly. V případě průchodu paketu modulem nastaví bit v této masce na pozici, kterou určuje jejich adresa. Bezdrátových modulů může být v zapojení tedy nejvýše 8. Toto číslo není velké, avšak pro danou aplikaci bohatě postačuje. V případě nedostatku adres by bylo možné upravit strukturu posílaného paketu a přidat více bytů pro bitovou masku pro bezdrátové moduly.

Adresa senzorového modulu tvoří číslo od 1 do 255, které musí být v celém systému unikátní. Opět se daný počet jeví jako dostačující, jeho rozšíření by bylo možné přidáním dalšího bytu pro tuto adresu ve struktuře paketu.

Prvním bytem paketu je bitová posloupnost, která určuje směřování paketu. Existují dvě možnosti. První je směr od řídicí jednotky k adresovanému modulu a druhým opačný směr. Tento směr je důležitý v první řadě pro připojené senzorové moduly, které kontrolují pakety na sběrnici a v případě nesprávného směru (pro moduly je to směr modul – řídicí jednotka), paket ignorují. V případě bezdrátových modulů se chování rozlišuje podle adresy. Modul s adresou 1 odesílá bezdrátově pouze pakety se směřováním řídicí jednotka – modul a naopak přijímá bezdrátově pouze pakety se směřováním modul – řídicí jednotka. Pro moduly s jinými adresami než 1 je tento postup přesně opačný, co se týče směřování paketu.

Dalším důležitým prvkem při směrování paketu je číslo paketu, které zabraňuje, aby byl stejný paket přijat vícekrát. To může nastat například v případě alternativních cest mezi dvěma uzly sítě. Proto si bezdrátové moduly udržují informaci v podobě bitové masky, které pakety podle čísla paketu již obdržely. Duplicitní pakety pak ignorují.

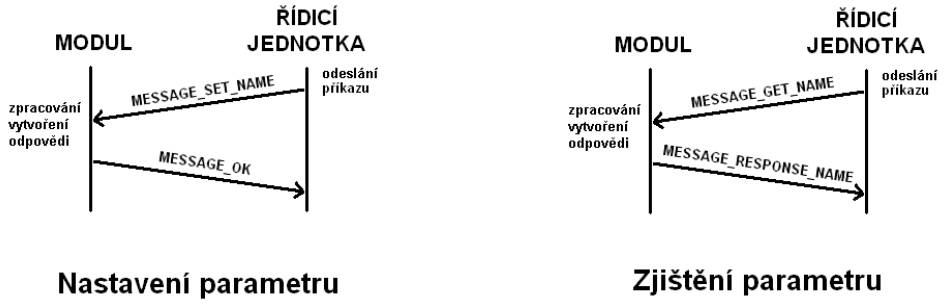
Jelikož každý modul čte každý paket, který se na sběrnici RS-485 objeví, tak musí umět zjistit, kdy paket končí a může začít znovu naslouchat, zda není další paket určen jemu. K tomu slouží posloupnost 4 bytů, které tvoří čtyřnásobný výskyt znaku s jasně definovanou hodnotou. Aby se zabránilo situaci, kdy se může náhodně vyskytnout daná posloupnost v datech, byla použita metoda vkládání znaků do paketu a to tak, aby nebylo možné danou ukončovací posloupnost v datech nikdy získat. Proto je vložený znak, který musí být jiný než znak z koncové posloupnosti, vkládán vždy po třech bytech.

DIR	1 1 1 1 1 1 X 1	směr pohybu (X=1 ... řídící jednotka - modul, X = 0 ... modul - řídící jednotka)
BIT_ADDR	X X X X X X X X	bitová maska určující adresy navštívených bezdrátových modulů
PKT_NO	X X X X X X X X	číslo paketu
M_ADDR	X X X X X X X X	adresa modulu se senzorovou a efektorovou částí
TYPE	X X X X X X X X	typ zprávy
LENGHT	X X X X X X X X	délka dat v bytech
STUFF	0 0 0 0 0 0 0 0	vložený vzorek (zabránění možné chybného rozpoznání shluku bitů v datech označujíc konec zprávy)
END_CHAR	1 1 1 1 1 1 1 1	speciální vzor značící konec zprávy

Obrázek 5.15 – Struktura paketu

Komunikace mezi řídicí jednotkou a modulem se sestává vždy ze dvou částí a to příkazu a odpovědi. Příkaz je generován ze strany řídicí jednotky a odpověď ze strany modulu. Pokud odpověď nedorazí do určitého časového limitu, řídicí jednotka to považuje za chybu a pokusí se odeslat příkaz znovu. Existují dva typy příkazů. První kategorií je nastavování údajů modulu, po které následuje

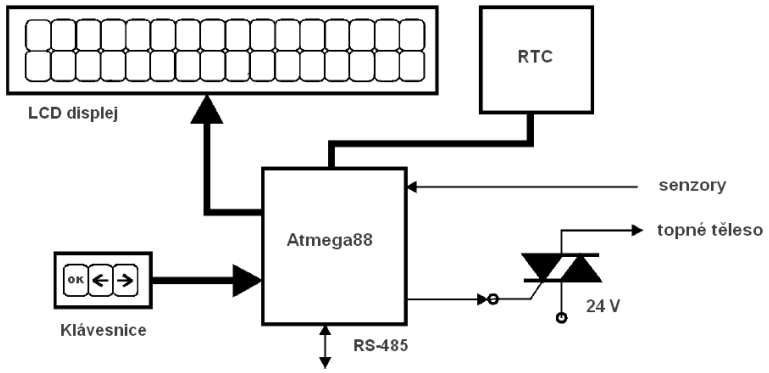
odpověď, zda byla úspěšně provedena. Do druhé kategorie patří příkazy, které zjišťují nastavení modulu a jejíž odpověď obsahuje požadované data. Seznam příkazů je uveden v příloze 1. Příklad komunikace na obrázku 5.16.



Obrázek 5.16 – Příklad dvou typů komunikace

5.4 Modul se senzory a efektory

Pro tento typ modul byly implementovány dvě verze firmware, aby bylo možné využít efektivně všech dostupných prostředků. Zapojení modulu je znázorněno na obrázku 5.17.



Obrázek 5.17 – Zapojení modulu se senzory a efektory

5.4.1 Firmware pro modul s funkcí regulace teploty v místnosti

Tento typ firmware pracuje se všemi uvedenými částmi uvedenými na obrázku 5.17.

Jádrem hlavní funkce *main* je permanentní dotazování (polling), kdy se zjišťuje, zda nebylo stisknuto některé tlačítko či nebyla provedena nějaká změna prostřednictvím přijatého paketu ze sběrnice RS-485. V případě, že jeden z těchto případů nastal, dojde k překreslení menu. Zde dále může nastat několik případů. Pokud bylo stisknuto tlačítko *OK*, dochází v přechodu do „editačního módu“, kdy je možné dalšími stisky kláves *VLEVO* či *VPRAVO* nastavit proměnnou, která je právě v menu zobrazena. Pokud modul není v editačním módu, dochází po stisknutí kláves *VLEVO* či *VPRAVO* k posunu na zobrazení předchozí či následující proměnné. Poslední možností bylo nastavení nového nastavení prostřednictvím nového paketu. Zde dochází pouze k překreslení stávajícího menu se zobrazením aktuální hodnoty změněné proměnné. V příloze 2 je umístěn vývojový diagram této funkce.

Kromě pollingu v hlavní smyčce ovlivňují provádění programu ještě dvě přerušení. Prvním je přerušení od sériového portu, jehož aktivace značí příjem bytu ze sběrnice RS-485 (viz 5.2.9). Zdrojem druhého přerušení je časovač, který přerušuje činnost programu v pravidelných cca 200 ms intervalech, aby zajistil zpracování a zobrazení přijatých dat a také zpracoval vstupy ze senzorů a

podle funkce provedl požadovanou změnu výstupu. Další činnosti, která je v rámci této rutiny prováděna, je zjištění aktuálního času z RTC obvodu a teplot ze senzorů a jejich zobrazení v menu programu. Nedochází k překreslení celého menu, pouze k přepisu části, kde jsou zobrazeny údaje o čase a teplotě.

Jak již bylo zmíněno, v rámci přerušení od časovače je volána i funkce, která zajišťuje samotnou regulaci teploty v místnosti. Regulace teploty se provádí na základě jednoho či dvou teplotních senzorů. V případě použití dvou senzorů se dále pracuje s jejich diferencí. Výsledná teplota se porovnává s teplotou požadovanou. Ta je určena buď jednou teplotou, která je platná stále, nebo teplotou z teplotního rozvrhu, který určuje teplotu pro danou hodinu a den v týdnu. Při porovnání výsledné teploty z vstupů a té požadované se uplatňuje ještě hodnota hystereze. Pokud je výsledkem porovnání teplot záporná hodnota, je nastaven výstup modulu, na který je připojena regulovatelná hlavice topného tělesa, na úroveň logické 0. Tím je hlavice otevřena a dovoluje proudění topného média do topného tělesa a tím dochází k zvýšení teploty. Při kladném výsledku je naopak hlavice uzavřena a teplota by se tak měla začít snižovat.

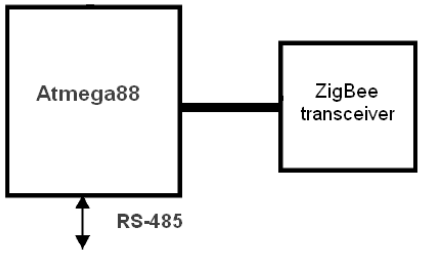
5.4.2 Firmware pro modul určený pro řízení efektorů

Tento program nevyužívá pro svou činnost hodnoty z teplotních senzorů a výše uvedené funkce pro řízení teploty v místnosti. Je určen pro moduly, které ovládají efektor na výstupu (typickým příkladem může být kotel) podle stavu ostatních modulů, které řídí teplotu v místnostech. Ty zjišťuje řídicí jednotka a po jejich vyhodnocení podle dané funkce zasílá požadovaný stav výstupu modulu s tímto programem. Ten na jeho základě poté řídí efektor na výstupu.

Kromě uvedené funkce je ale fungování programu velmi podobné předchozímu. Obsahuje jak menu ovládané tlačítky, tak i aktivované přerušení od sériového portu a časovače. Rozdíl je tedy především v obsluze přerušení časovače, kdy nedochází ke zpracování vstupů ze senzorů, ale místo toho je nastavován výstup modulu na základě přijatého paketu s požadovaným stavem z řídicí jednotky.

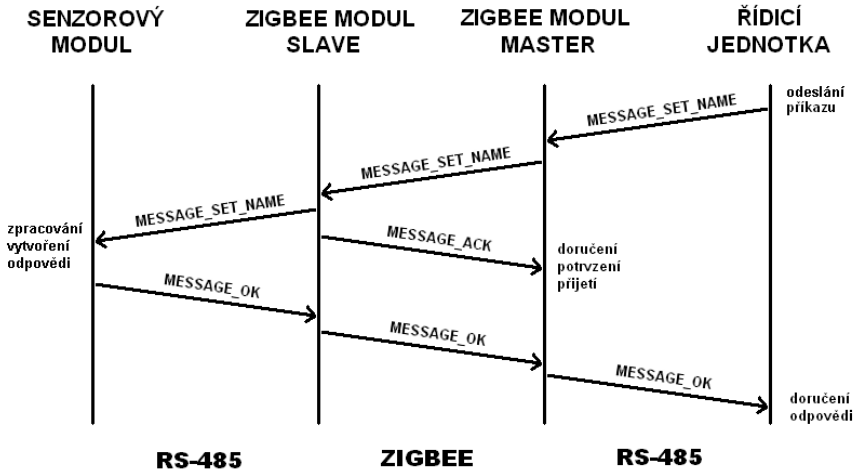
5.5 Bezdrátový ZigBee modul

Primární funkcí bezdrátového modulu je přenos dat mezi odlehlými částmi sběrnice RS-485. Tato funkce se u bezdrátového modulu liší podle toho, zda se jedná o bezdrátový modul připojený prostřednictvím sběrnice RS-485 přímo k řídicí jednotce nebo naopak ke koncovým členům systému – senzorovým modulům (viz obrázek 5.14). Pro tyto dva druhy připojení byly implementovány dvě verze programu. Prvním je tzv. master, který je připojen k řídicí jednotce, a druhým slave spojený sběrnicí s dalšími moduly. Zjednodušené zapojení tohoto modulu je na obrázku 5.18.



Obrázek 5.18 – Zapojení bezdrátového ZigBee modulu

Princip komunikace v systému mezi řídicí jednotkou a senzorovými moduly s využitím bezdrátové komunikace je znázorněn na obrázku 5.19.



Obrázek 5.19 – Komunikace při využití bezdrátového přenosu

5.5.1 Firmware pro ZigBee modul master

Program začíná inicializací mikrokontroléru a také ZigBee transceiveru, kde je kromě potřebných počátečních nastavení nutné provést i správnou volbu vysílacího kanálu a výkonu. Pro tyto moduly je využito kanálu 0, který pracuje na frekvenci 2,405 GHz, a vysílací výkon je nastaven na maximum. Kromě inicializace obsahuje funkce *main* pouze prázdnou nekončící smyčku, protože program je založen na obsluze dvou přerušení.

První je přerušení od sériového portu, které je ošetřeno velmi podobně jako v případě senzorového modulu. Rozdíly v implementaci plynou z rozdílů při zpracování paketů. U bezdrátových modulů se provádí záznam v bitové masce, která označuje, které bezdrátové moduly již paket zpracovávaly. Také dochází ke kontrole, zda paket s daným číslem již nebyl zpracován. V případě přijetí paketu, který splňuje dané podmínky, je paket odeslán pomocí funkce *process_usart_packet* dalším modulům prostřednictvím ZigBee.

Dalším zdrojem přerušením je transceiver ZigBee, který v obslužné rutině podle stavu registrů volá příslušné obslužné funkce. První z těchto obslužných funkcí je *packetSentCallback*, která je volána po odeslání paketu ZigBee transceiverem. V té se spouští rutina, která naslouchá určitý čas, zda nepřijde odpověď na odeslaný příkaz. Pokud přijde odpověď, je zavolána další z obslužných funkcí a to *packetReceiveCallback*. Ta kontroluje přijatý paket a volá funkci *process_zigbee packet*, která paket odesílá na sběrnici RS-485.

5.5.2 Firmware pro ZigBee modul slave

Program pro slave modul je velmi podobný programu pro master. Hlavním rozdílem je, že slave modul permanentně čeká, dokud neobdrží příkaz ze strany ZigBee master modulu. V případě obdrženého příkazu ze ZigBee sítě následuje jeho odeslání na sběrnici RS-485 a čekání na jeho zpracování modulem, pro který je určen. Po přijetí odpovědi z jeho strany přeposílá odpověď bezdrátovému modulu typu master a ten řídicí jednotce. Po odeslání paketu se opět přepíná do stavu čekání na přijetí příkazu. Program využívá stejné obslužné funkce jako u programu pro master modul.

6 Implementace ovládacího programu pro řídicí jednotku

Jak již bylo zmíněno, za řídicí jednotku byl zvolen optimalizovaný osobní počítač. Ten mimo jiné obsahuje i nenáročný operační systém založený na linuxovém jádře, na němž poběží ovládací program systému řízení vytápění. Připojení k celému systému a sběrnici RS-485 je provedeno prostřednictvím sériového rozhraní PC.

Ovládací program nazvaný *Termo* má dvě hlavní části, které plní odlišné úkoly. První z nich je samotné řízení systému, které probíhá neustále a nevyžaduje interakci s uživatelem. Druhá část, která obsahuje i grafické uživatelské rozhraní, má funkci monitorovaní systému a editaci jeho parametrů. Každá z těchto dvou částí pracuje s vlastním vláknem a mezi sebou komunikují prostřednictvím signálů.

Implementace zvoleného řešení ovládací aplikace byla provedena v jazyce C++. Pro tvorbu GUI a práci se sériovým portem PC byl využit multiplatformní toolkit Qt verze 4.3, který vyvinula společnost Trolltech [34]. Toolkit je distribuován pod GNU GPL licencí se speciálním dodatkem Q Public License [28].

6.1 Řízení systému

Řízení systému probíhá ve vlákně nezávislém na hlavním vlákně s GUI prvky. Je spuštěno pro připojení k sériovému portu a svou programovou smyčku vykonává po celou dobu, dokud není spojení ukončeno. S hlavním vláknem komunikují prostřednictvím objektu *session*, který obsahuje zásobníky pro objekty, které zastupují senzorové a efektorové moduly.

Veškerá práce se sériovým portem je implementována v instanci třídy *Thread*. Tento objekt je zděděný z vlákna a tudíž běží nezávisle na hlavním vláknu aplikace. Třída obsahuje jak interní metody pracující na low-level úrovni, které se starají přímo o komunikaci se systémem řízení přes sběrnici, tak i metody tvořící API pro druhou část aplikace. Vybrané metody třídy *Thread* budou dále popsány.

Vybrané metody třídy Thread

`sendMessage(int address, unsigned int &type, QByteArray &data)`

Metoda odesílá paket na adresu danou parametrem *address* s daným typem příkazu (*type*) a jeho daty (*data*). Po úspěšném odeslání následuje volání funkce *readAnswerMessage*, která čeká na odpověď od adresovaného modulu. Po úspěšném přijetí odpovědi je její typ předáván dále pomocí parametru *type* a její data parametrem *data*. V případě chybné odpovědi následují další 4 pokusy o odeslání příkazu. Návratovou hodnotou je booleovská hodnota podle úspěchu obou operací.

`readMessage(QByteArray &byteArray)`

Čte byty přicházející ze sběrnice a kontroluje přijetí celého paketu. Metoda čte byty, dokud nenarazí na závěrečnou posloupnost znaků. Poté následuje vyhodnocení, zda byl přijat paket celý, a jeho vrácení parametrem *byteArray*. Čekání na příchozí byte je omezeno časem vypršení. Návratovou hodnotou je booleovská hodnota podle úspěchu.

`readAnswerMessage(QByteArray &data)`

Metoda, která čte odpověď na zaslaný příkaz prostřednictvím funkce *readMessage*, kontroluje ji a zpracovanou vrací parametrem data. Návratovou hodnotou je booleovská hodnota podle úspěchu.

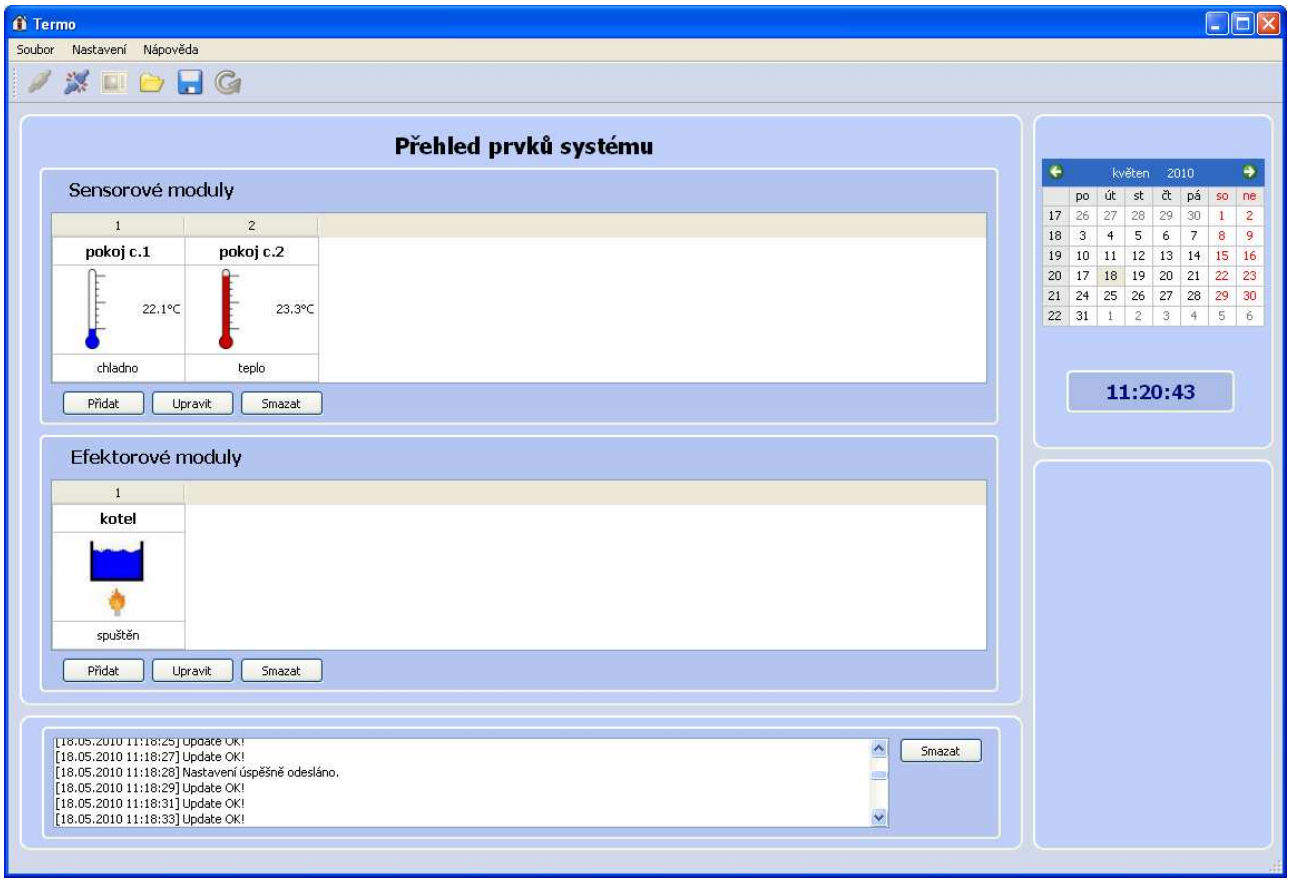
`update()`

Je to stěžejní metoda pro řízení systému. Je volána v pravidelných časových intervalech a její funkcí je zjištění aktuálních statusů všech připojených senzorových modulů a s jejich pomocí vyhodnocení jednotlivých funkcí každého efektorového modulu. Výsledný status pro efektorový modul je zjištěn z funkční tabulky podle statusů senzorových modulů.

6.2 Správa systému s grafickým uživatelským rozhraním

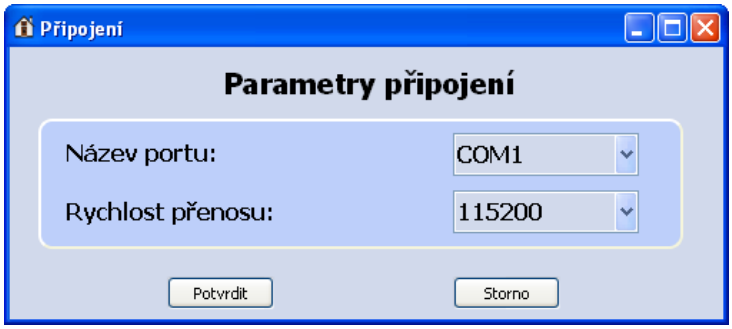
Účelem GUI aplikace je zajištění těchto funkcí: monitoring systému, správa modulů a editace jejich nastavení. Aplikace se skládá z hlavního okna a několika dalších modálních dialogových oken.

Hlavní okno je zobrazeno po spuštění programu. Obsahuje hlavní menu, z něhož nejdůležitější položky jsou vytaženy do toolbaru. Dále okno obsahuje tabulku s přehledem všech senzorových a efektorových modulů. Pro přidávání, mazání a editaci slouží tlačítka umístěné pod tabulkou. Textové pole umístěné ve spodní části okna slouží pro logování událostí. Náhled hlavního okna je obrázku 6.1.



Obrázek 6.1 – Hlavní okno programu *Termo*

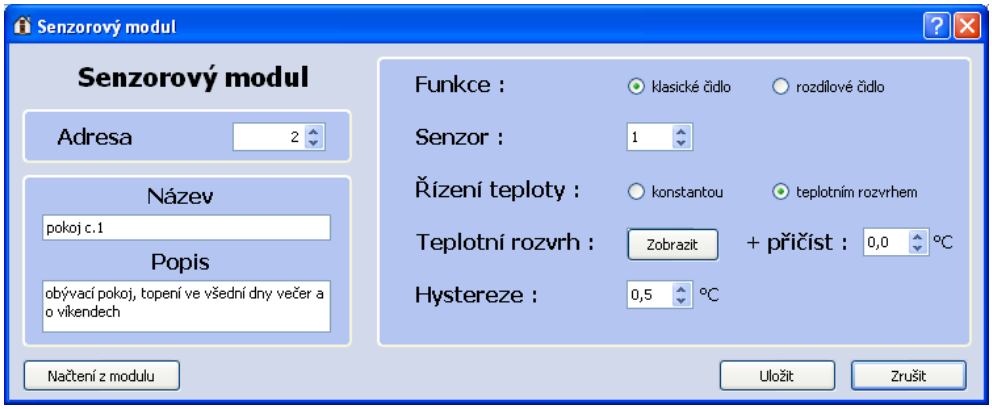
Kliknutím na volbu *Připojit* v menu *Soubor* či na zástupnou ikonu v toolbaru dojde k připojení k sériovému portu a je spuštěno vlákno s řízením. Tímto momentem se začne zobrazovat u jednotlivých modulů jejich stav. Volbou *Odpojit* z menu *Soubor* nebo kliknutím na ikonu v toolbaru dojde k odpojení sériového portu a tím i zastavení řízení systému. Nastavení rychlosti a portu sériové komunikace je možné v dialogu *Připojení* (viz obrázek 6.2), který je přístupný volbou *Parametry připojení* z menu *Nastavení*. Změna parametrů je možná pouze v případě, že je sériový port odpojen. V editačním poli *Název portu* se volí sériový port, ke kterému je systém s moduly připojen. V poli *Rychlost přenosu* je volena rychlost, kterou moduly komunikují. Ta standardně dosahuje 115200 bitů za sekundu.



Obrázek 6.2 – Dialog Připojení

Editace senzorového modulu se provádí v dialogu *Senzorový modul*, který lze vyvolat dvojklikem na sloupec tabulky s některým senzorovým modulem či kliknutím na tlačítko *Upravit* pod tabulkou. Stejný dialog je použit přidávání nového modulu tlačítkem *Přidat*. Pole *Adresa* určuje adresu modulu v rámci senzorových a efektorových modulů. Ta musí být jednoznačná. Pole *Název* a *Popis* slouží pro nastavení stejnojmenných parametrů modulu. K dalším nastavitelným parametrům patří funkce senzorového modulu, zda pracuje s jednou teplotou či rozdílem dvou teplot, a pořadové číslo senzoru na sběrnici One Wire, kterou jsou senzory připojeny k modulu. Výběr rádiového tlačítka u volby řízení teploty určuje, zda bude jako požadovaná teplota sloužit teplotní konstanta nebo teplota z teplotního rozvrhu.

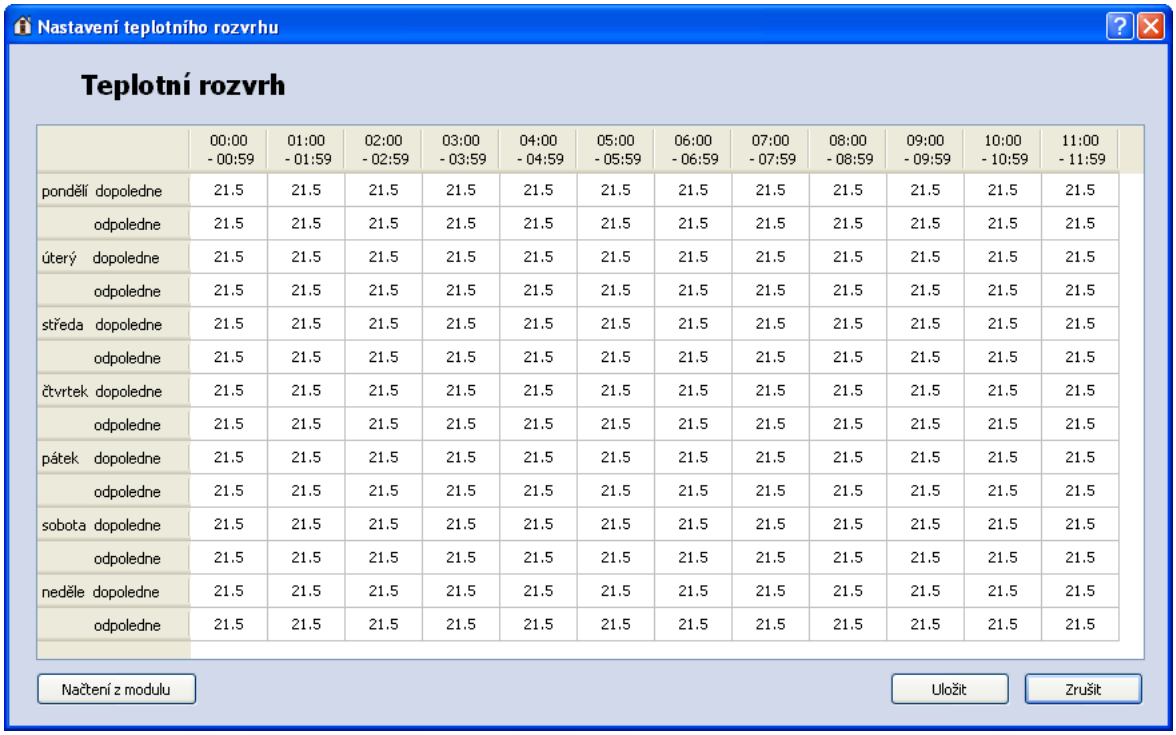
Při přidávání nového modulu lze využít funkce, která načte parametry z RAM paměti modulu. Spouští se tlačítkem *Načtení z modulu* a pro její fungování je nutné zadat správnou adresu. Odeslání nového nastavení parametrů je provedeno po stisku tlačítka *Uložit*, které zároveň dialog zavře.



Obrázek 6.3 – Dialog Senzorový modul

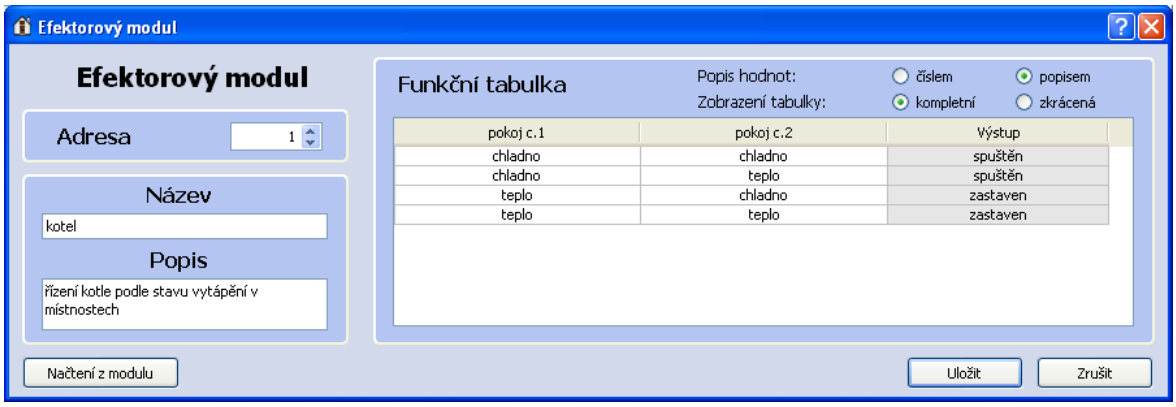
Ve speciálním dialogu *Nastavení teplotního rozvrhu* je zobrazen teplotní rozvrh daného senzorového modulu. Jeho zobrazení následuje po stisku tlačítka *Zobrazit* vedle pole *Teplotní rozvrh*. Změnu teploty v tabulce lze provést výběrem jedné či více buněk a dvojklikem myši. I v tomto

dialogu lze využít funkce vyčtení rozvrhu z modulu vyvolané tlačítkem *Načtení z modulu*. Uložení rozvrhu a odeslání do modulu se provádí tlačítkem *Uložit*.



Obrázek 6.4 – dialog Nastavení teplotního rozvrhu

Pro editaci efektorového modulu slouží dialog *Efektorový modul*, který lze vyvolat dvojklikem na sloupec tabulky s některým efektorovým modulem či kliknutím na tlačítko *Upravit* pod tabulkou. Stejný dialog je použit přidávání nového modulu tlačítkem *Přidat*. Pole *Adresa*, *Název* a *Popis* má stejnou funkci jako v případě dialogu *Senzorový modul*. Dialog *Efektorový modul* obsahuje dále funkční tabulku, ve které je uvedeno chování výstupu efektorového modulu v závislosti na stavech senzorových modulů. Hodnotu výstupu tabulky lze editovat pomocí dvojkliku myši na vybranou buňku. Tlačítka ve spodní části dialogu mají stejnou funkci jako v případě dialogu *Senzorový modul*.



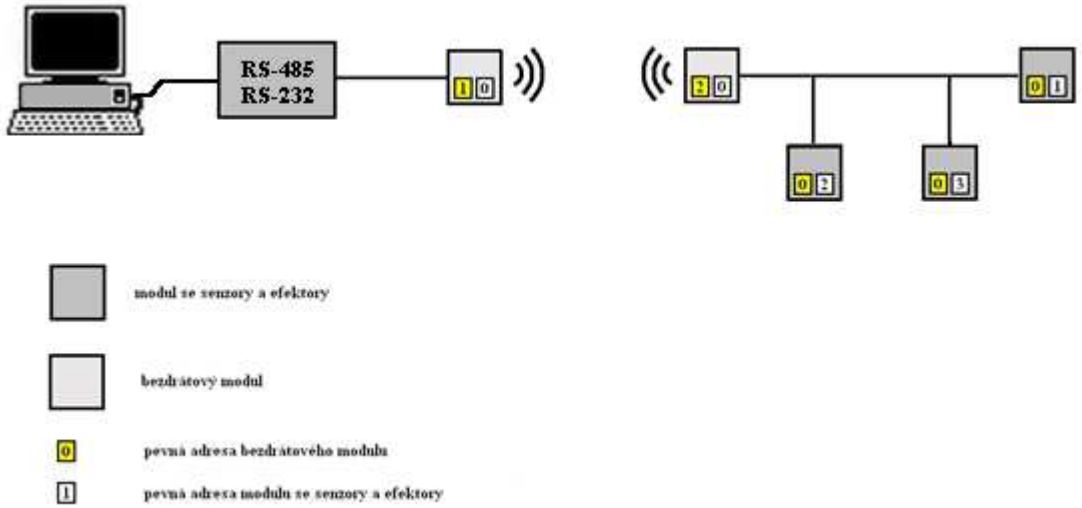
Obrázek 6.5 – dialog Efektorový modul

7 Realizace a testování

V rámci diplomové práce byl realizován prototyp systému řízení vytápění a provedeno testování pro několik různých zapojení.

7.1 Realizovaný prototyp systému

Pro prototyp systému bylo sestaveno 5 prototypových modulů a převodník ze sběrnice RS-485 na RS-232. Pro testovací účely sloužil jako řídicí jednotka stolní počítač s operačním systémem Microsoft Windows XP. Topologii testovaného systému lze vidět na obrázku 7.1.



Obrázek 7.1 – Schéma zapojení testovaného systému

Moduly se senzory a efektory byly vyrobeny 3. Dva z nich byly naprogramovány firmwarem pro řízení teploty v místnosti. K modulu s adresou 3 byla připojena One Wire sběrnice s dvěma teplotními senzory DS18B20, modul s adresou 2 byl vybaven sběrnicí s jedním připojeným senzorem. Poslední modul byl naprogramován firmwarem pro ovládání efektoru na výstupu a byla mu přidělena adresa 1. Pro testovací účely u všech 3 modulů byla na výstup připojena LED dioda, která má představovat připojený efektor.

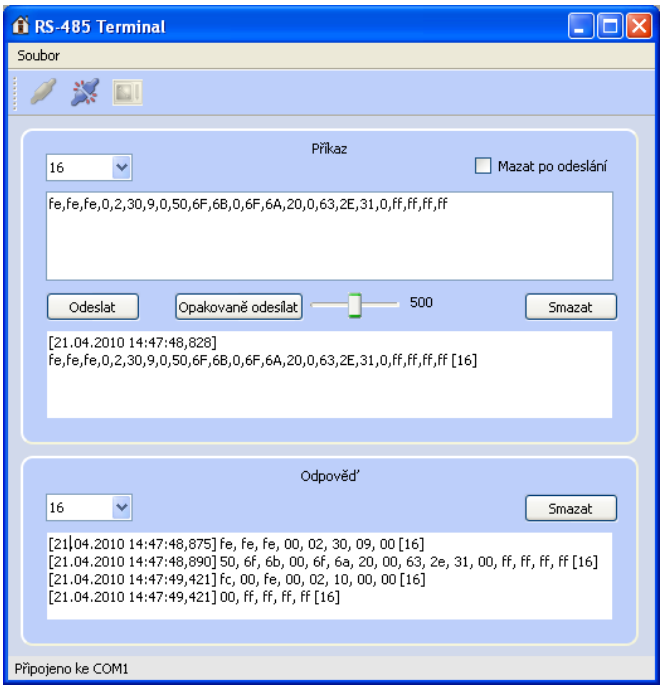
Zbývající dva vyrobené moduly byly osazeny pro funkci bezdrátových ZigBee modulů. První z nich, označený ZigBee adresou 1, byl vybaven firmwarem pro ZigBee master modul, druhý s adresou 2 firmwarem pro ZigBee slave. Vysílací výkon byl u obou modulů nastaven na maximum.

Sběrnice RS-485 pro propojení modulů a převodníku byla realizována za pomocí 2 párů kroucených vodičů, jejich délka dosahovala přibližně 2 metrů. Kromě datových vodičů a země byly u modulů propojeny i napájecí napětí. Pro testovací účely bylo využito stejnosměrného 12V napájení.

Z důvodu chybějícího konektoru pro sériový port na testovacím univerzálním počítači, který byl určen pro funkci řídicí jednotky, byla pro připojení k převodníku RS-232 na RS-485 použita redukce z USB na sériový port. Tato redukce emuluje sériový port v operačním systému. Z toho důvodu lze s redukcí pracovat jako se standardním sériovým portem a není nutno ovládací software nijak upravovat.

7.2 Testování

Testování systému probíhalo pomocí monitorování komunikace mezi PC a zbytku systému. K tomu byla používána aplikace *RS-485 Terminal*, která byla implementována pro tento účel, a také ovládací aplikace *Termo*.



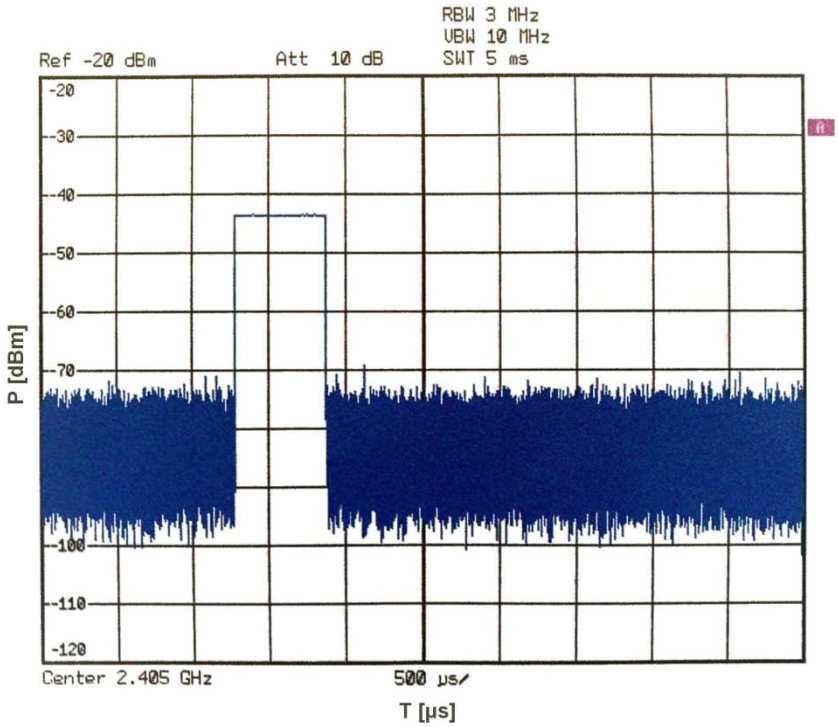
Obrázek 7.2 – Testovací aplikace *RS-485 Terminal*

V rámci testování pomocí aplikace *RS-485 Terminal* byly zasílány pakety obsahující příkazy pro jednotlivé moduly a byla kontrolována správnost a čas obdržení odpovědí. Aplikace zasílá kompletní pakety na sběrnici a současně ji asynchronně čte. Při odeslání příkazu podle principu fungování sběrnice RS-485 dochází ke čtení i právě odeslaného paketu. Po ní teprve následuje očekávaná odpověď adresovaného modulu.

Doba doručení odpovědi se v případě komunikace pouze po sběrnici RS-485 pohybovala kolem 50 až 200 ms a lišila se podle typu a délky příkazu. Při použití bezdrátových modulů se zpoždění prodlužovalo podle vzdálenosti, na kterou docházelo k bezdrátovému přenosu. Zpoždění odpovědi je způsobeno zejména zpožděním, které vzniká při přenosu po sběrnici, a dobou zpracování na straně modulu, kde paket prochází několika procedurami – načtením příkazu, kontrolou správnosti, rozpoznáním jeho typu, vytvořením odpovědi a odesláním celého paketu s odpovědi. Nejdelší dobu zpracování mají obecně ty příkazy, které na straně modulu vyžadují čtení většího množství dat z EEPROM. Nejvíce časově náročným je tedy příkaz typu MESSAGE_GET_TERMO_TABLE, který slouží pro vyčtení denních teplot z teplotního rozvrhu (viz příloha 1). Příkazy MESSAGE_GET_STATUS a MESSAGE_GET_TEMPERATURE, které jsou v ovládací aplikaci *Termo* volány v pravidelných sekundových intervalech a jejich odpověď musí být tedy rychlá, jsou navrženy tak, aby byly co nejkratší a nemusely přistupovat do EEPROM modulu.

Prototyp systému uvedený na obrázku 7.1 se při testování jevil jako ne příliš spolehlivý. Jako problém se ukázal dosah bezdrátových modulů. Jeho hodnota byla s pomocí měření na spektrálním analyzátoru „Rohde & Schwarz FSP30“ s přijímací anténou 2,4 GHz stanovena na maximálně 100 cm. Komunikovat mezi stávajícími prototypy bezdrátových modulů je tedy možné pouze na velmi malou vzdálenost. Na vině byla pravděpodobně chybná volba materiálu na výrobu plošných spojů, který nesplňoval podmínky pro ztráty a permitivitu substrátu PCB pro vysokofrekvenční obvody.

V rámci měření parametrů ZigBee modulů bylo zjišťováno i jejich výkonové spektrum. Graf spektra pro bezdrátový ZigBee master modul při vzdálenosti antény analyzátoru přibližně 20 cm je vidět na obrázku 7.3.



Obrázek 7.3 - Výkonové spektrum bezdrátového ZigBee master modulu

Jako plně funkční se naopak ukázalo zapojení systému, kde byly jednotlivé části propojeny pouze prostřednictvím sběrnice RS-485. Při testování byla vyzkoušena i varianta připojení všech 5 sestavených modulů sběrnicí přímo k převodníku. Komunikace pak probíhala úspěšně, všechny moduly odpovídali správně v rámci vymezených časů pro odpověď.

8 Závěr

V rámci práce byl čtenář v prvních dvou kapitolách seznámen se systémy, které jsou využívány k vytápění objektů. Byly probírány i možné způsoby jejich regulace a z toho plynoucích problémů.

Návrh řešení celého systém byl představen ve 3. kapitole. Byl proveden tak, aby ho bylo možné snadno realizovat a aby obsahoval veškeré funkce, které jsou pro daný úkol potřeba. Tam, kde to bylo možné, byly navrženy osvědčené technologie a zapojení. Tyto zavedené řešení jsou výhodné jak díky předpokládaným menším nárokům na údržbu, tak i nižším nákladům.

V modelovém domě je navrženo u všech důležitých prvků vytápění umístění modulů systému řízení, jejichž výstupy je budou regulovat. K zjišťování stavu okolí jsou využívány teplotní senzory a naměřené hodnoty vyhodnocuje mikrokontrolér s ohledem na teplotní rozvrh či jinou nastavenou funkci. Systém v místnostech s otopnými tělesy řídí termostaticky teplotu a zasílá řídicí jednotce požadavky na dodání tepla do soustavy. Řídicí jednotka poté může na danou situaci reagovat prostřednictvím speciálních modulů s efektory. Tam kde je nutné překonávat překážky a není možné spojit dvě části metalicky, přichází na řadu propojení prostřednictvím bezdrátových modulů. V budoucnu bude navíc možné systém využít i pro další prvky v domácnosti, které lze řídit a nemusí mít přímou souvislost s předchozími. Nabízí se například řízení solárního ohřevu vody pro venkovní bazén a její cirkulace.

Uživatel má k dispozici ovládací program s grafickým uživatelským rozhraním, kde lze monitorovat stav systému a měnit jednotlivé parametry. Díky zapojení řídicí jednotky do sítě bude možné v budoucnu se k celému systému připojit a vzdáleně s ním pracovat.

Systém řízení vytápění byl v rámci práce představen od počátečního návrhu přes implementaci firmware a software až po jeho realizaci a testování. Další fází práce bude zdokonalení ovládací aplikace a nasazení do ostrého provozu. Možným budoucím rozšířením firmwaru senzorových modulů by mohlo být přidání uživatelsky definovaného zpoždění reakce na vstupy ze senzorů a také připojení senzorů detekce pohybu, které by umožňovali reagovat na přítomnost osoby v místnosti přepnutím na jiný typ řízení teploty na daném místě.

Důvodem pro vznik tohoto systému řízení byly specifické požadavky na řízení daného modelového domu. Ty byly poté zobecněny tak, aby bylo možné využít systém v jakémkoliv objektu vybaveném regulovatelnými prvky týkajících se nejen vytápění. Cílem bylo navrhnout konstrukci, která bude vhodně kombinovat koncepci drátové a bezdrátové komunikace a bude navíc cenově přijatelná, uživatelsky přívětivá a jednoduše rozšiřitelná. To se z větší části podařilo. Výsledné řešení lze navíc jednoduchým způsobem modifikovat pro jiné typy úkolů nebo například pro připojení jiných druhů senzorů. Důležitou roli hraje i to, že řídicí jednotka není tvořena pomocí speciálního hardware ale univerzálním počítačem s nízkým příkonem, který dává do budoucna větší možnosti pro upgrade celého systému. I z tohoto důvodu se jedná o perspektivní řešení.

9 Literatura

[1] Kaclík J., Valášek J.: *Racionálne využitie energie v rodinných domoch.* Alfa, Bratislava, 1989. ISBN 80-05-00066-9

[2] I & CS spol. s r.o.: Řízené vytápění budov = úspory. Prosinec 2009. Dostupné na URL: <http://www.regulace.info/index.html>

[3] Mrázek K., Šustr K., Janouš A.: *Moderní vytápění bytů a rodinných domů.* SNTL, Praha, 1986. ISBN 04-320-86

[4] TZB info: *Vytápění*. Prosinec 2009. Dostupné na URL: <http://vytapeni.tzb-info.cz/t.py>

[5] Vega: Stavebnictví a interiér. Prosinec 2009. Dostupné na URL: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/krbova-kamna-s-vymenikem>

[6] Garten.cz: *Bazény – solární ohřev vody*. Prosinec 2009. Dostupné na URL: <http://www.garten.cz/a/cz/3670-bazeny-solarni-ohrev-vody/>

[7] HW.cz: *RS 485 & 422*. Prosinec 2009. Dostupné na URL: <http://www.hw.cz/docs/rs485/rs485.html>

[8] ZigBee Alliance: *ZigBee*. Prosinec 2009. Dostupné na URL: <http://www.zigbee.org/>

[9] Trchalík R.: Senzorové sítě – ZigBee. Únor 2009.

[10] Atmel Corporation: *ATMega88 Datasheet.* Prosinec 2009. Dostupné na URL: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2545.pdf >

[11] Dallas Semiconductor: *DS18B20 Datasheet*. Březen 2010. Dostupné na URL: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS18B20.pdf>

[12] Dallas Semiconductor: *DS1307Z Datasheet*. Březen 2010. Dostupné na URL: <http://www.allic-elec.com/resource/ds1307z.pdf>

[13] ST: *ST3485E Datasheet*. Březen 2010. Dostupné na URL: <http://www.ic-on-line.cn/IOL/datasheet/st3485ec_292037.pdf>

[14] Powertip: *PC 1602-L Datasheet*. Březen 2010. Dostupné na URL: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/513/513-138/dsh.513-138.1.pdf>

[15] Hitachi: *HD44780U Datasheet*. Březen 2010. Dostupné na URL: <http://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf>

[16] Freescale Semiconductor: *MC13192 Datasheet*. Březen 2010. Dostupné na URL: <http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/data_sheet/MC13192.pdf>

[17] Englund L.: *ZigBee 802.15.4 open source project*. Únor 2010. Dostupné na URL: < http://www.anteeo.se/ >

[18] ScienceProg: *Serial Peripheral Interface – SPI Bus overview*.
Duben 2010. Dostupné na URL:
< http://www.scienceprog.com/serial-peripheral-interface-spi-bus-overview >

[19] Matoušek D.: *Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR*.
BEN – technická literatura, Praha, 2003. ISBN 80-7300-209-4

[20] Freescale Semiconductor: *Compact Integrated Antennas*.
Únor 2010. Dostupné na URL:
<http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/app_note/AN2731.pdf>

[21] HardWeb: *Konvertor RS232 RS485*.
Leden 2010. Dostupné na URL: <http://service.felk.cvut.cz/lab/pripr/rs485/>

[22] Maxim: *MAX232 Datasheet*.
Březen 2010. Dostupné na URL: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf>

[23] Texas Instruments: SN75176 *Datasheet*.
Březen 2010. Dostupné na URL: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/sn75176a.pdf>

[24] Mann B.: *C pro mikrokontroléry*.
BEN – technická literatura, Praha, 2004. ISBN 80-7300-077-6

[25] Atmel Corporation: *AVR Studio 4*.
Leden 2010. Dostupné na URL:
<http://www.atmel.com/dyn/products/tools_card.asp?tool_id=2725>

[26] Luboš Ruckl: *BiProg*.
Leden 2010. Dostupné na URL: <http://web.quick.cz/ruckl/biprog/biprog.html>

[27] ASIX: *Presto!*.
Duben 2010. Dostupné na URL: <http://www.asix.cz/a6_presto.htm>

[28] Free Software Foundation Inc.: *GNU General Public License.*
Květen 2010. Dostupné na URL: <http://www.gnu.org/licenses/gpl.txt>

[29] Martin Thomas: *AVR Projects*.
Březen 2010. Dostupné na URL: <http://www.siwawi.arubi.uni-kl.de/avr-projects>

[30] Peter Fleury: *Peter Fleury's Home Page*.
Březen 2010. Dostupné na URL: <http://www.jump.to/fleury>

[31] Atmel Corporation: *AVR Z-Link.*
Duben 2010. Dostupné na URL:
<http://www.atmel.com/products/zigbee/solution.asp?family_id=676>

[32] Freescale Semiconductor: *BeeKit Wireless Connectivity Toolkit*.
Duben 2010. Dostupné na URL:
<http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=BEEKIT_WIRELESS_CONNECTIVITY_TOOLKIT>

[33] Freescale Semiconductor: *Freescale ZigBee® Software, Tools, and Protocol Stacks*.
Duben 2010. Dostupné na URL:
<http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=ZigBee_Software_and_Tools>

[34] Trolltech: *Qt Reference Documentation.*
Únor 2010. Dostupné na URL: <http://doc.trolltech.com/4.3/index.html>

Seznam příloh

Příloha 1. Seznam příkazů při komunikaci mezi řídicí jednotkou a moduly
Příloha 2. Vývojové diagramy vybraných funkcí
Příloha 3. Desky plošných spojů s osazením
Příloha 4. Fotografie funkčních vzorků
Příloha 5. Obsah CD
Příloha 6. CD

Příloha 1

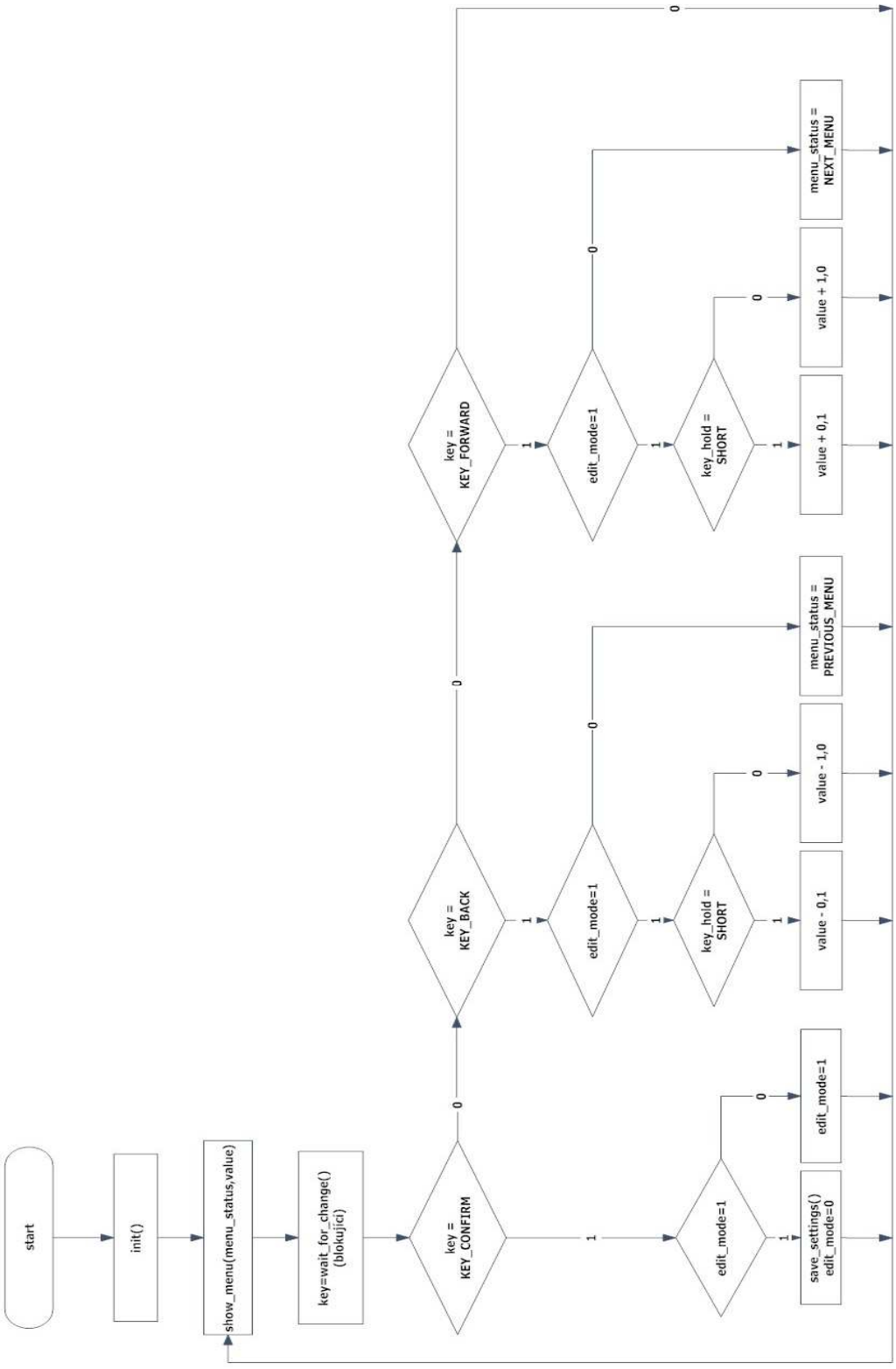
Seznam příkazů při komunikaci mezi řídicí jednotkou a moduly

Název příkazu	Hodnota [hexa]	Popis funkce příkazu
Příkazy pro nastavení parametrů (odesílatelem je řídicí jednotka)		
MESSAGE_SET_NAME	30	Nastavení jména modulu
MESSAGE_SET_DESCRIPTION	40	Nastavení popisu modulu
MESSAGE_SET_TERMO_SETTINGS	50	Nastavení parametrů pro řízení teploty
MESSAGE_SET_TERMO_TABLE	60	Nastavení teplot v teplotním rozvrhu
MESSAGE_SET_TIME	70	Nastavení času modulu
MESSAGE_SET_STATUS	80	Nastavení statusu modulu
Příkazy pro zjištění parametrů (odesílatelem je řídicí jednotka)		
MESSAGE_GET_NAME	90	Zjištění jména modulu
MESSAGE_GET_DESCRIPTION	A0	Zjištění popisu modulu
MESSAGE_GET_TERMO_SETTINGS	B0	Zjištění parametrů pro řízení teploty
MESSAGE_GET_TERMO_TABLE	C0	Zjištění teplot z teplotního rozvrhu
MESSAGE_GET_TIME	D0	Zjištění času modulu
MESSAGE_GET_STATUS	E0	Zjištění statusu modulu
MESSAGE_GET_TEMP	F0	Zjištění naměřených teplot
Odpovědi na příkazy pro nastavení parametrů (odesílatelem je odpovídající modul)		
MESSAGE_OK	10	Potvrzení úspěšného provedení
MESSAGE_ERROR	20	Oznámení chyby při provádění
Odpovědi na příkazy pro zjištění parametrů (odesílatelem je odpovídající modul)		
MESSAGE_RESPONSE_NAME	98	Jméno modulu
MESSAGE_RESPONSE_DESCRIPTION	A8	Popisu modulu
MESSAGE_RESPONSE_TERMO_SETTINGS	B8	Parametry pro řízení teploty
MESSAGE_RESPONSE_TERMO_TABLE	C8	Teploty z teplotního rozvrhu
MESSAGE_RESPONSE_TIME	D8	Čas modulu
MESSAGE_RESPONSE_STATUS	E8	Status modulu
MESSAGE_RESPONSE_TEMP	E8	Naměřené teploty

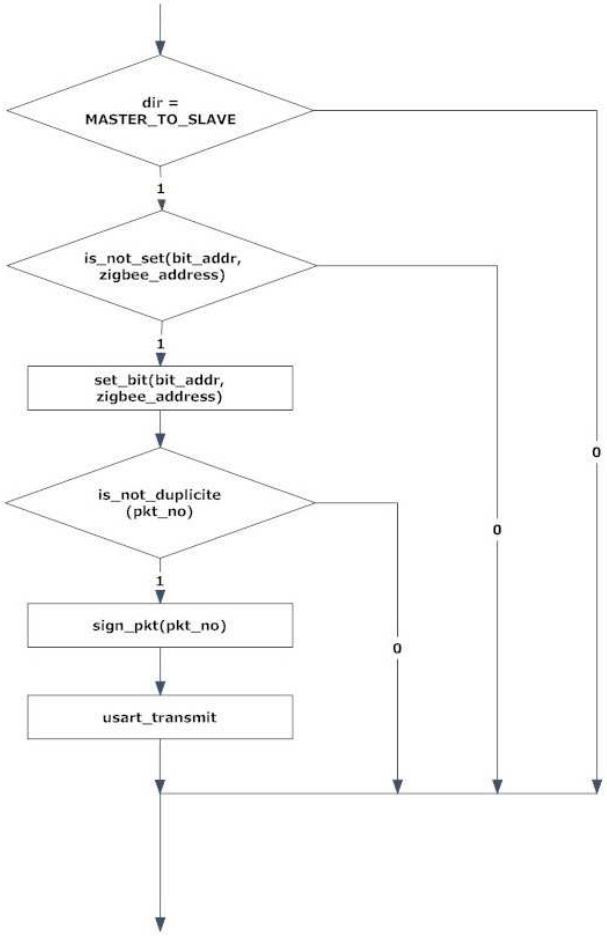
Příloha 2

Vývojové diagramy některých funkcí

Funkce *main* obou verzí programu pro senzorové moduly



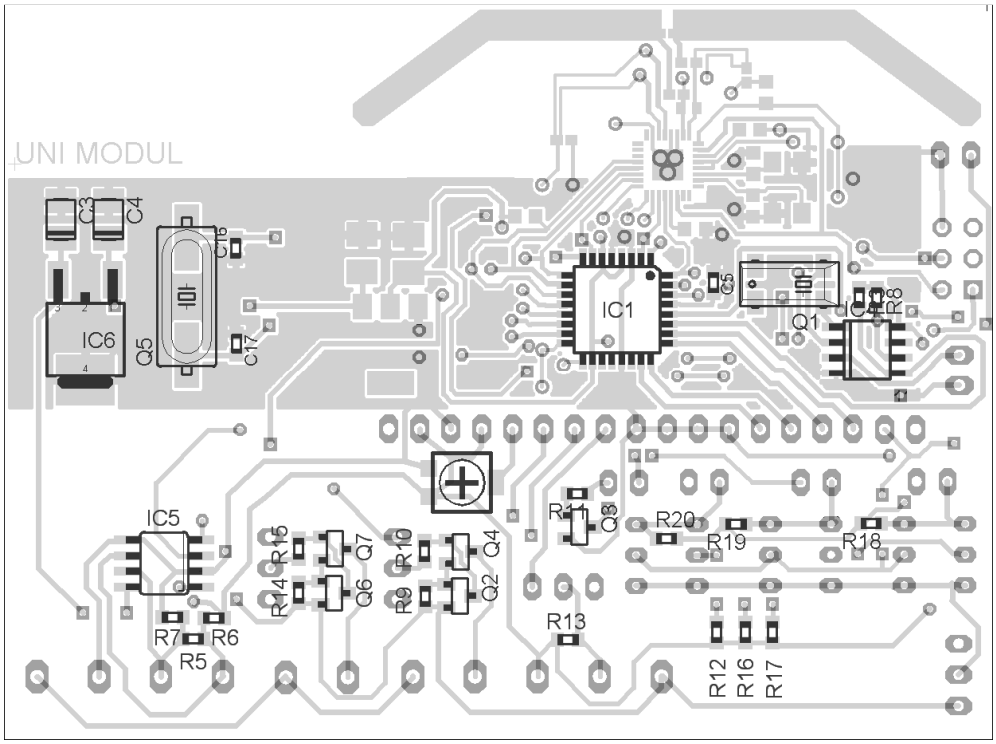
Funkce *process_zigbee_packet* obou verzí programu pro bezdrátové moduly



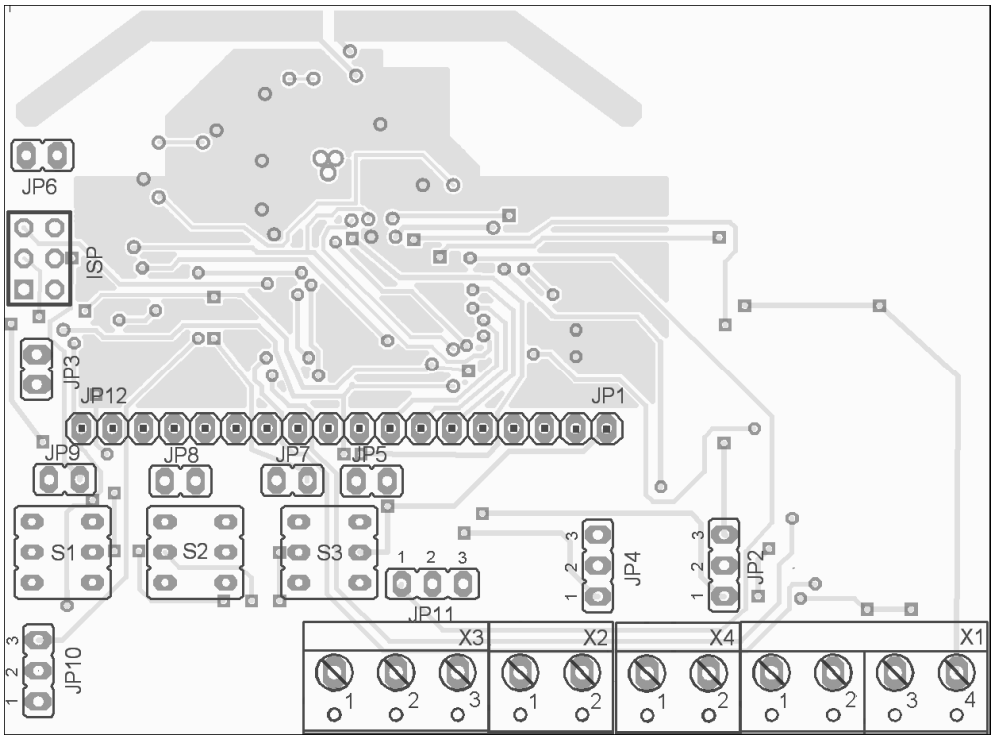
Příloha 3

Desky plošných spojů s osazením

Modul se senzory a efektory – schéma zapojení



horní strana, měřítko 2:1

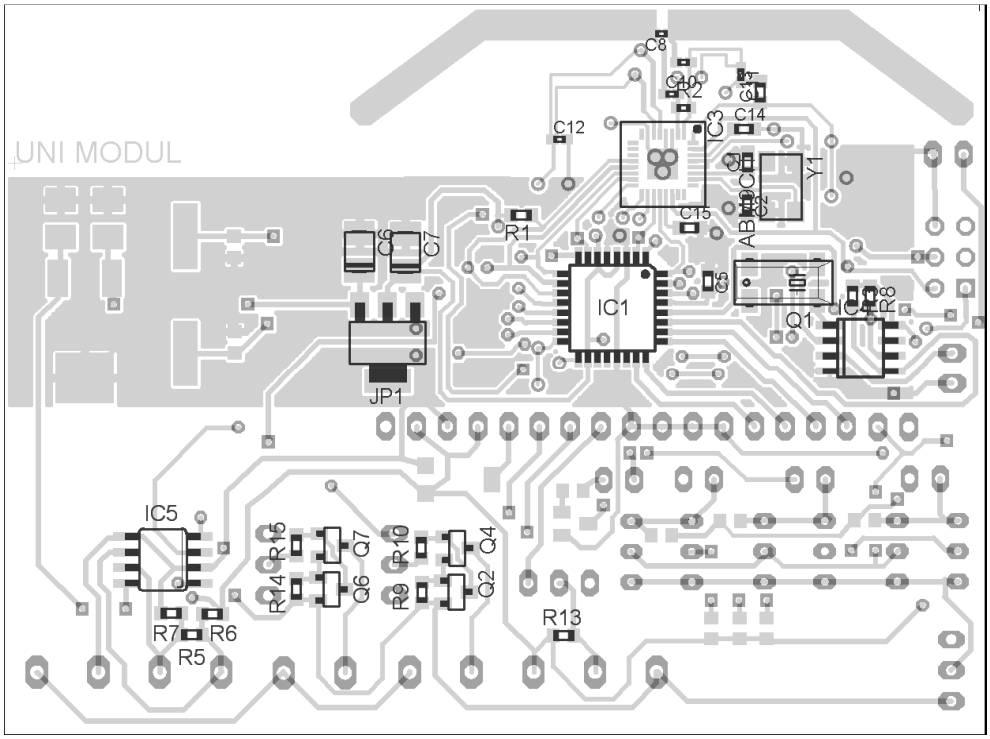


spodní strana, měřítko 2:1

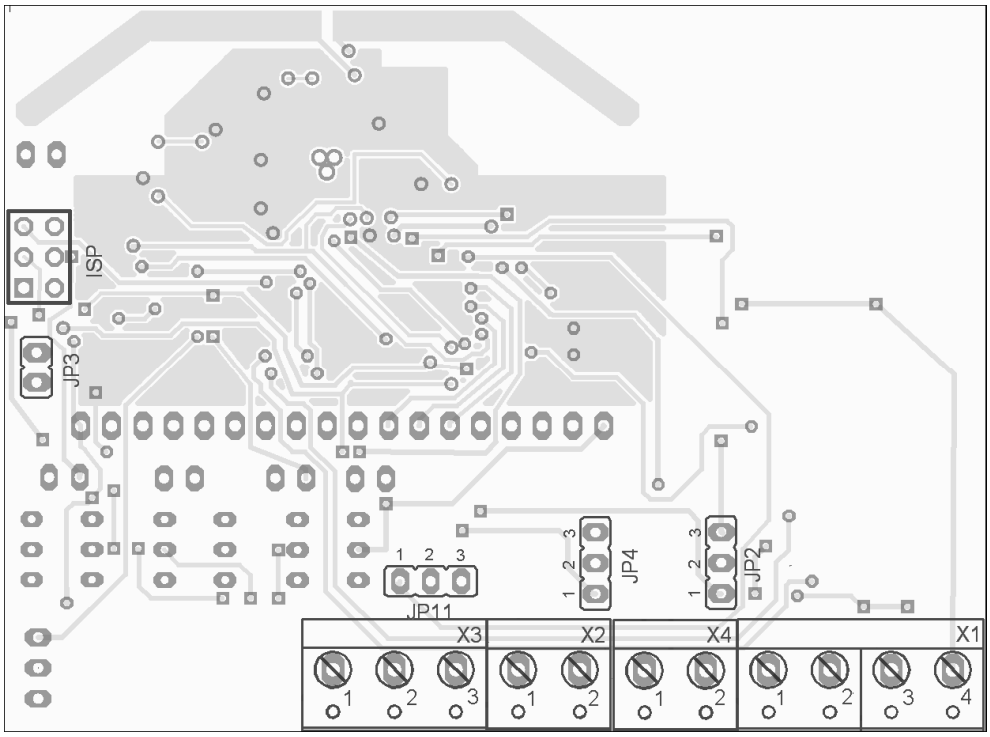
Modul se senzory a efektory – soupiska součástek

Označení	Hodnota	Poznámka
Rezistory		
R3, R8, R11, R13	4,7kΩ	SMD CK0805
R5	120Ω	SMD CK0805
R6, R7, R12, R16, R17	470Ω	SMD CK0805
R9, R14	47Ω	SMD CK0805
R10, R15	65kΩ	SMD CK0805
R18, R19, R20	47kΩ	SMD CK0805
Kondenzátory		
C3, C4	10µF	SMD CPOL CTS vel. B
C5	22pF	SMD CK0805
C16, C17	27pF	SMD CK0805
Tranzistory		
Q3	BCV27	SMD SOT23
Q2, Q4, Q6, Q7	BC817	SMD SOT23
Integrované obvody		
IC1	Atmega88-20AU	SMD TFP32
IC4	DS1307Z	SMD SO8
IC5	ST3485	SMD SO8
IC6	7805	SMD DPAK
Krystaly		
Q1	32.768kHz	SMD MC306
Q5	16.000MHz	SMD HC49U-S
Ostatní konstrukční prvky		
X1	ARK306-4P	svorkovnice 4 piny
X2, X4	ARK306-2P	svorkovnice 2 piny
X3	ARK306-3P	svorkovnice 3 piny
S1	P-PB61413L-308	tlačítko se symbolem „OK“
S2, S3	P-PB61413L-404	tlačítko se symbolem šipky
AVR ISP	S2G06	konektor ISP
JP1	S1G20	svorkovnice 3 piny
JP2, JP4, JP10, JP11	S1G03	propojovací kolíky
JP3, JP5, JP6, JP7, JP8, JP9, JP12	S1G02	propojovací kolíky

Bezdrátový ZigBee modul – schéma zapojení



horní strana, měřítko 2:1



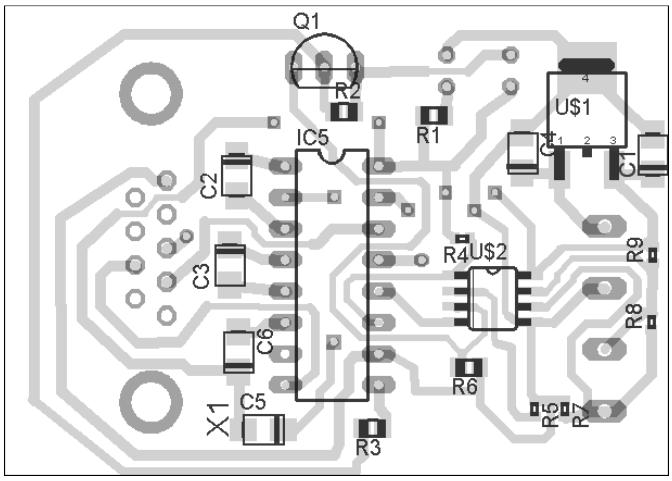
spodní strana, měřítko 2:1

Bezdrátový modul ZigBee – soupiska součástek

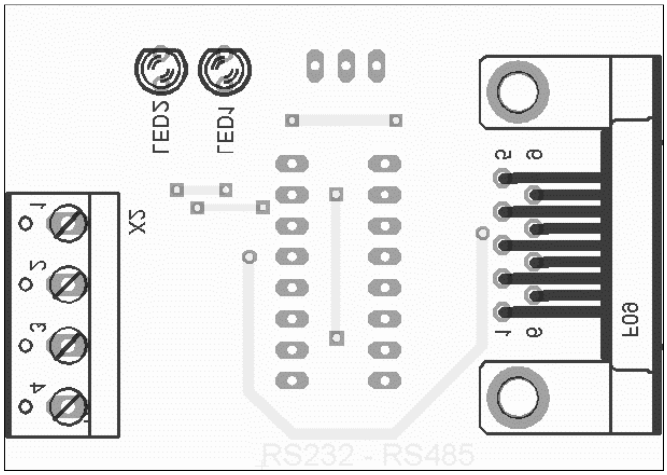
Označení	Hodnota	Poznámka
Rezistory		
R1	47kΩ	SMD CK0805
R2	220Ω	SMD CK0605
R3, R8	4,7kΩ	SMD CK0805 *
R5	120Ω	SMD CK0805
R6, R7	470Ω	SMD CK0805
R9, R14	47Ω	SMD CK0805 *
R10, R15	65kΩ	SMD CK0805 *
R13	4,7kΩ	SMD CK0805 *
Kondenzátory		
C1, C2, C5	10pF	SMD CK0805
C6, C7	10µF	SMD CPOL CTS vel. B
C8	1,5pF	SMD CK0605
C9, C10	18pF	SMD CK0603
C11, C12	220pF	SMD CK0603
C14	220pF	SMD CK0805
C13, C15	100nF	SMD CK0805
Tranzistory		
Q2, Q4, Q6, Q7	BC817	SMD SOT23 *
Integrované obvody		
IC1	Atmega88-20AU	SMD TQFP32
IC2	LT33	SMD DPAK
IC4	DS1307Z	SMD SO8 *
IC5	ST3485	SMD SO8
Krystaly		
Q1	32.768kHz	SMD MC306
Y1	16.000MHz	SMD ABM8
Ostatní konstrukční prvky		
X1	ARK306-4P	svorkovnice 4 piny
X2, X4	ARK306-2P	svorkovnice 2 piny *
X3	ARK306-3P	svorkovnice 3 piny *
AVR ISP	S2G06	konektor ISP
JP2, JP4, JP11	S1G03	propojovací kolíky *
JP3	S1G02	propojovací kolíky *

* označené součástky jsou osazeny podle zvolené varianty zapojení

Převodník mezi sběrnicí RS-485 a RS-232 – schéma zapojení



horní strana, měřítko 2:1



spodní strana, měřítko 2:1

Převodník mezi sběrnicí RS-485 a RS-232 – soupiska součástek

Označení	Hodnota	Poznámka
Rezistory		
R1	470Ω	SMD CK0805
R2	4,7kΩ	SMD CK0805
R3	5,6kΩ	SMD CK0805
R4, R5	10kΩ	SMD CK0605
R6	1kΩ	SMD CK0805
R7, R9	470Ω	SMD CK0605
R8	120Ω	SMD CK0605
Kondenzátory		
C1, C2, C3, C4, C5, C6	10µF	SMD CPOL CTS vel. B
Tranzistory		
Q1	BC817	SMD SOT23
Integrované obvody		
U1	7805	SMD DPAK
U2	ST75176	SMD SO8
IC5	MAX232	DIP16
LED		
LED1	3mm, zelená	
LED2	3mm, žlutá	
Ostatní konstrukční prvky		
X1	ARK306-4P	svorkovnice 4 piny
F09	CAN9V-90	konektor CANNON, 9 pinů

Příloha 4

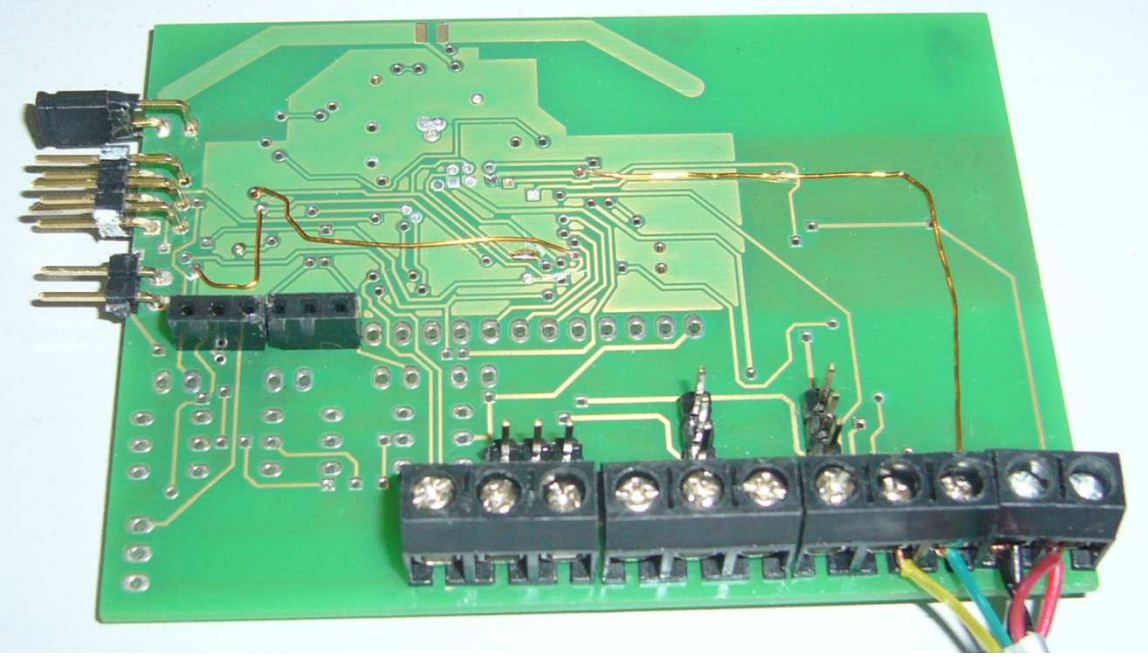
Fotografie funkčních vzorků

Modul se senzory a efektory

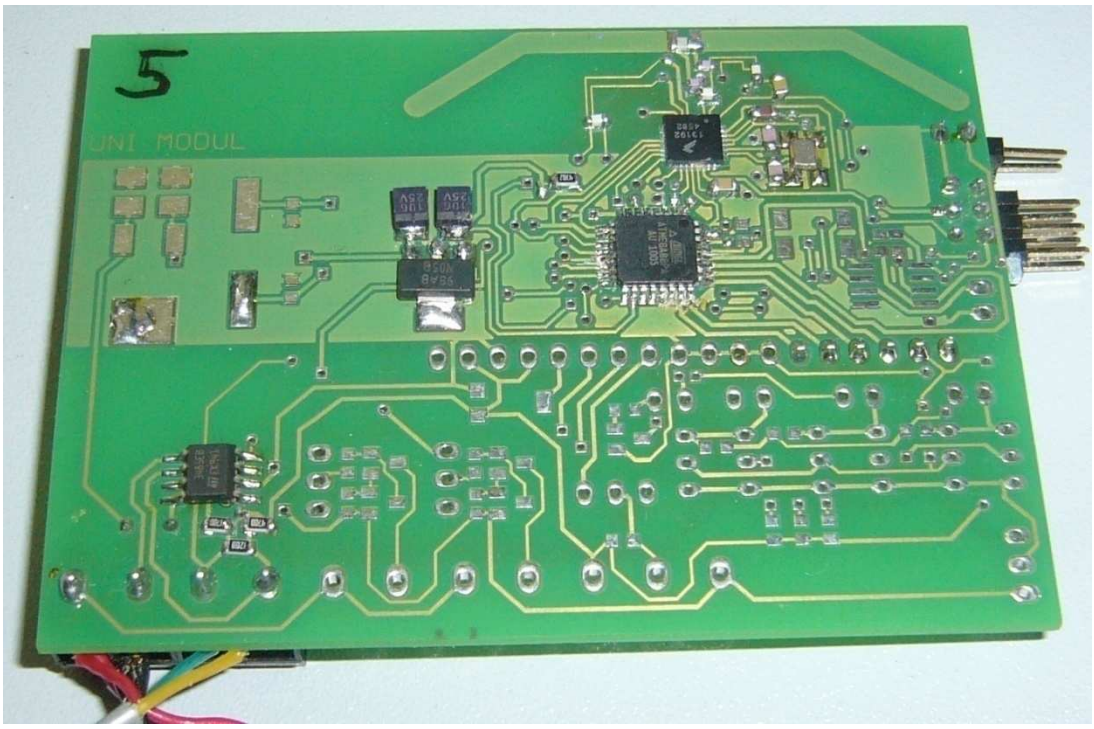
horní pohled

spodní pohled

Bezdrátový ZigBee modul

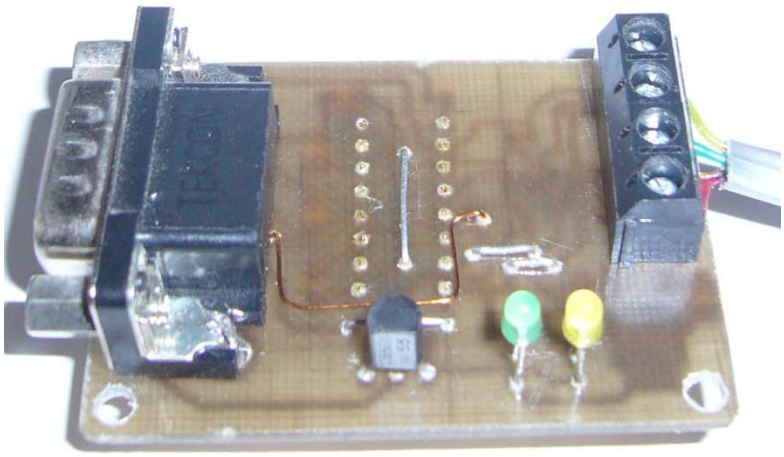


horní pohled

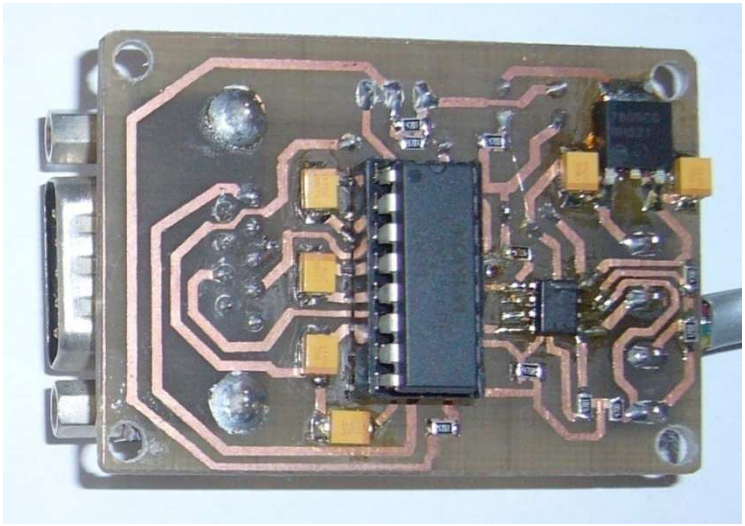


spodní pohled

Převodník mezi sběrnicí RS-485 a RS-232



horní pohled



spodní pohled

Příloha 5

Obsah CD

Na přiloženém CD lze najít následující adresáře:

- Adresář Dokumentace – obsahuje diplomovou práci ve formátu PDF a DOCX.
- Adresář Firmware – obsahuje zdrojové soubory pro program mikrokontroléru v jazyce C a projektové soubory pro vývojové prostředí AVR studio verze 4.18.
- Adresář Termo – obsahuje zdrojové soubory pro ovládací aplikaci na PC v jazyce C++, její přeloženou verzi pro Microsoft Windows XP SP3, uživatelskou příručku a návod k použití.
- Adresář RS-485 Terminal – obsahuje zdrojové soubory pro testovací aplikaci na PC v jazyce C++, její přeloženou verzi pro Microsoft Windows XP SP3 a návod k použití.
- Adresář Návrh – obsahuje schémata a návrhy desek plošných spojů vytvořených v programu CadSoft Eagle 4.16.
- Adresář Foto – obsahuje fotografie funkčních prototypů modulů.