



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická (FEL)
Katedra elektrických pohonů a trakce (K13114)

Řídicí systém rodinného domu

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Haubert

Bc. Jiří Tichý

Praha 2014



CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

**Faculty of electricity (FEL)
Department of electric engines and traction (K13114)**

Control system of family house

Master Thesis

Study Programme: Electrical Engineering, Power Engineering and Management

Branch of study: Elektrical Machines, Apparatus and Drives

Thesis advisor: Ing. Tomáš Haubert

Bc. Jiří Tichý

Prague 2014

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá řídicím systémem konkrétního rodinného domu s fotovoltaickou elektrárnou.

V první části je popsán návrh a výroba potřebného hardwaru pro řídicí systém - řídicí a měřicí desky plošných spojů. Základem obou desek je digitální signálový mikroprocesor EMX Module.

V práci je vytvořen matematický model rodinného domu v prostředí MATLAB/Simulink. Model popisuje řídicí algoritmus, fyzikální model tepelné soustavy domu a modelové vstupy. Vstupní hodnoty modelu jsou reálná naměřená data korigovaná pro polohu domu. Na základě modelu je vytvořen algoritmus pro optimální řízení energetických toků v domě. Algoritmus je následně implementován do hardwaru a pomocí modelu otestován.

Abstrakt:

This diploma thesis deals with control system of particular family house with installed photovoltaic power station.

In the first part is described design and manufactory of hardware required for control system - control and measure printed circuit board. Both boards are based on digital signal microprocessor EMX module.

In thesis is build mathematical model of family house in MATLAB/Simulink program environment. Model describes control algorithm, physical model of thermal system of the house and model inputs. Input data are real measured values corrected for location of the house. Using the model is created algorithm for optimal control of energy streams in the house. Algorithm is then implemented into the hardware and tested.

Klíčová slova:

Rodinný dům, Fotovoltaická elektrárna, MATLAB/Simulink, EMX modul, Řídicí systém

Keywords:

Family house, Photovoltaic power station, MATLAB/Simulink, EMX module, Control system

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci Řídicí systém rodinného domu vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám námitky proti užití této práce v souladu s § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne.....

.....

Podpis

Poděkování:

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Tomáši Haubertovi za pomoc, rady a odborné připomínky při zpracování této práce. Také bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu při studiu.

OBSAH

1	Úvod.....	10
2	Hardware	11
2.1	EMX modul.....	11
2.2	Řídicí deska.....	13
2.2.1	Napájení	13
2.2.2	Baterie a jejich nabíjení	16
2.2.3	Měření výkonu fotovoltaického panelu.....	17
2.3	Vstupně výstupní zařízení desky	19
2.3.1	Relé.....	19
2.3.2	GPS	20
2.3.3	SD karta.....	20
2.3.4	Teplotní čidla	21
2.3.5	Optočlen	21
2.3.6	CAN řadič	22
2.3.7	Další zařízení.....	22
2.3.8	Konstrukce desky	23
2.4	Měřicí deska	24
2.4.1	Napájení	25
3	Model rodinného domu.....	27
3.1	Identifikace rodinného domu.....	28
3.2	Model tepelné soustavy	30
3.2.1	Kotel.....	30
3.2.2	Akumulační nádrž.....	31
3.2.3	Bojler	32
3.2.4	Model vytápění domu	34
3.2.5	Elektrické ohřívání bojleru	35
3.2.6	Ohřívání bojleru z akumulční nádrže	36
3.2.7	Otopná soustava	36
3.3	Vstupy modelu.....	37
3.3.1	Aktuální výkon fotovoltaické elektrárny.....	37
3.3.2	Aktuální teplota	39
3.3.3	Odběr teplé užitkové vody.....	40
3.4	Model řízení.....	43
3.5	Výsledky simulací.....	45

3.6	Interpretace výsledků	49
4	Implementace modelu a řízení do hardwaru	55
4.1	Popis programu	55
4.2	Test.....	59
5	Závěr	63
6	Seznam použité literatury:	65
7	SEZNAM OBRÁZKŮ	66
8	SEZNAM TABULEK	68
9	DEFINICE A ROZMĚR POUŽITÝCH SYMBOLŮ	69
10	Obsah CD	70

1 Úvod

V dnešním světě neustále narůstá spotřeba elektrické energie a spolu s tím roste i její cena. Zároveň dochází k postupnému vyčerpávání takzvaných neobnovitelných zdrojů energie (uhlí, ropa, plyn, jaderné palivo...). Sílí také celospolečenský tlak na výrobu elektrické energie způsobem šetrným k životnímu prostředí.

Výsledkem těchto faktorů je zvyšující se význam obnovitelných zdrojů. Mezi tyto zdroje patří i fotovoltaika. Sluneční záření představuje původ naprosté většiny energie nacházející se na Zemi, kromě energie geotermální, energie slapových sil, atomových jader a kosmického záření. Energie všech ostatních (a také nejvíce používaných) zdrojů je pouze přeměněné sluneční záření (energie fosilních paliv, větru, vody...).

V minulosti byla výroba elektřiny z fotovoltaických zdrojů štedře podporována ze strany státu a došlo k jejímu rozmachu navzdory drastickým ekonomickým dopadům, a tím i k částečné diskreditaci tohoto zdroje energie. V současné době již podpora ze strany státu klesá, nebo zcela zaniká. Pro další rozvoj tohoto odvětví, je nutné dosáhnout ekonomické návratnosti investice bez dotačních programů, tento stav je často nazýván jako *grid parity*. V případě fotovoltaiky definovala japonská organizace NEDO 3 fáze grid parity z nichž první je dosažení parity v případě instalace v obytné sféře, kdy je vyrobenou elektřinou vytěsňována spotřeba elektřiny ze sítě. Ta má samozřejmě mnohonásobně vyšší cenu, než je cena silové elektřiny v síti.

Důležitým předpokladem pro dosažení tohoto cíle je optimalizace spotřeby vyrobené energie tak, aby se co největší podíl smysluplně spotřeboval v místě její výroby. Jednou z cest je její uskladnění v místě výroby a spotřeby v podobě tepla využívaného k vytápění, nebo přípravě teplé vody.

Tato diplomová práce se snaží k řešení těchto problémů přispět vytvořením řídicího systému pro rodinný dům s instalovanou fotovoltaickou elektrárnou.

2 Hardware

Pro potřeby řídicího systému bylo třeba zajistit řídicí mikroprocesor, dostatek senzorů a vstupně-výstupních zařízení, jako relé, optočlenů, CAN rozhraní atd. Proto jsem navrhl a osadil 2 desky plošných spojů (dále jen DPS), které spolu komunikují po síti Ethernet. 2 namísto jedné byly zvoleny z důvodu menší celkové velikosti a lepší struktury kabeláže. Jedna deska zastupuje převážně funkci **řídicí** a druhá funkci **měřicí**, tak budu také desky dále nazývat.

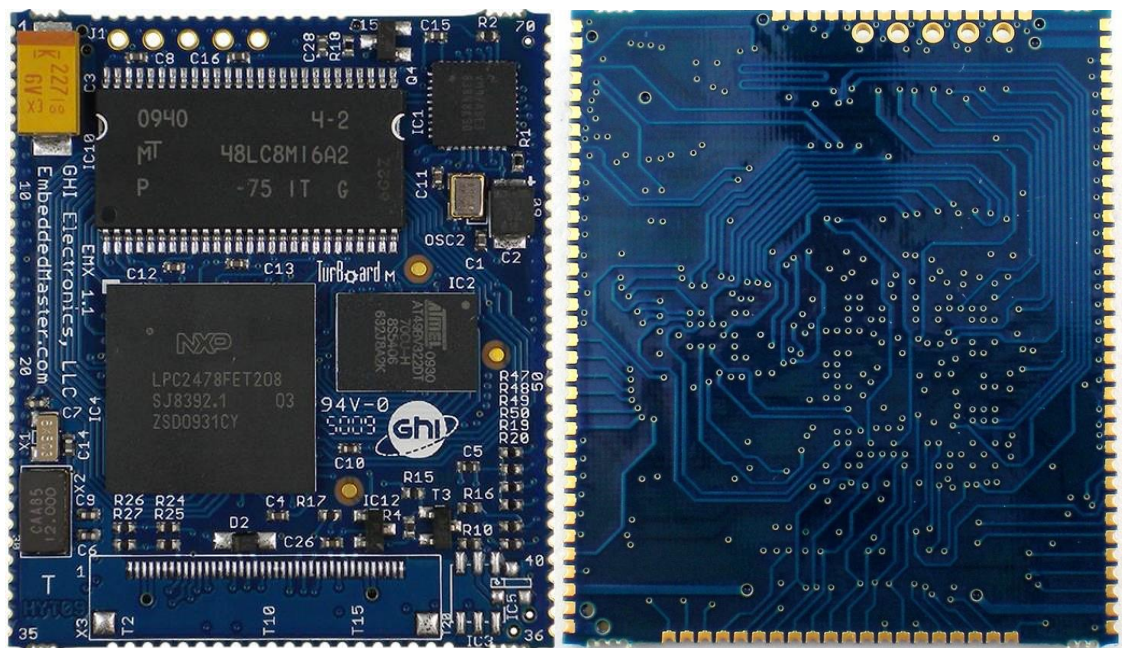
Obě desky jsem navrhnul v editoru plošných spojů EAGLE. Program obsahuje editor schémat a editor spojů. V editoru schémat uživatel vytvoří elektrické schéma desky. V editoru spojů se provede rozmístění součástek na desce a samotný návrh DPS. Pro osazení desky jsem volil v největší možné míře běžně dostupné součástky pro povrchovou montáž (SMD). Desky jsem navrhl jako dvouvrstvé. Pro zmenšení impedance, snížení možností přeslechů a vyzařování a zjednodušení návrhu jsem pro společnou zem využil technologii rozlévání mědi. Dále jsem vygeneroval výrobní data a desky byly vyrobeny standartní technologií ve firmě PragoBoard s.r.o. Materiál desky je nejčastěji používaný FR4 1,5mm (skelný laminát, plátovaný měděnou folií). Tloušťka měděného plátování je 18 μm .

2.1 EMX modul

Základ obou desek tvoří EMX modul společnosti GHI Electronics. Což je kombinace hardwaru umístěná na 8 vrstvé SMT OEM desce. Mezi základní charakteristiky patří:

- Implementace .NET Micro Framework
- 72MHz 32-bit ARM7 procesor
- 4.5 MB Flash paměti
- 16 MB RAM paměti
- Plný TCP/IP Stack s podporou SSL, HTTP, TCP, UDP, DHCP
- Ethernet, Wi-Fi ovladač a PPP (GPRS/ 3G modemy)
- USB host
- 76 GPIO pinů
- 2 SPI (8/16bit) (sériové periferní rozhraní)
- Podpora sběrnice I2C

- sedm 10-bitových analogových vstupů
- 10-bitový analogový výstup
- 4-bitové SD/MMC paměťové rozhraní
- 6 PWM
- OneWire sběrnice
- Zabudovaný Real Time Clock (RTC)
- FAT souborový systém



Obr. 2-1: EMX modul - horní a dolní pohled

Mezi nejdůležitější vlastnosti patří implementace prostředí .NET Micro Framework. Jedná se o běhové prostředí z rodiny .NET umožňující vyvíjet „embedded“ zařízení přímo ve vysokém programovacím jazyce C#, pomocí výkonného grafického vývojového prostředí Microsoft Visual Studio. Odpadá tedy nutnost programovat v jazyce symbolických adres, což činí vývoj zařízení značně jednodušší a rychlejší. Od verze 4.0 Microsoft uvolnil Micro Framework jako „open-source“ a stejně tak i Microsoft Visual Studio je poskytováno ve verzi Express zdarma.

2.2 Řídicí deska

Řídicí desku jsem navrhnul jako multifunkční. Předpokladem je, že deska bude osazena vždy jen těmi součástkami, které jsou potřebné pro danou aplikaci. Například pro aplikaci řízení rodinného domu nejsou využity funkce napájení ze zálohované baterie a měření výkonu fotovoltaického panelu. Deska tedy pro tento účel ani není příslušnými součástkami osazena. Návrh desky částečně navazuje na moji bakalářskou práci, v rámci níž byl vytvořen funkční prototyp systému měření slunečního záření využívající EMX modul a kalibrovaný fotovoltaický panel o výkonu 5W, který ukládal naměřená data na SD kartu.

Deska plošných spojů umožňuje implementaci následujících funkcí:

- Měření elektrického výkonu připojeného fotovoltaického panelu
- Ukládání dat na SD kartu
- Zasílání dat pomocí ethernetového konektoru
- Napájení pomocí zdroje stejnosměrného napětí, nebo pomocí baterií dobíjených z měřeného panelu
- Připojení 4 teplotních čidel pomocí sběrnice OneWire
- Napájení z připojené baterie, která je zároveň nabíjena z měřeného fotovoltaického panelu, nebo ze zdroje 24V

dále deska obsahuje:

- 4 relé výstupy
- optočlen pro měření dvoustavových veličin
- CAN driver
- 2x USB (HOST a DEVICE)

2.2.1 Napájení

Pro napájení jsou umožněny dvě varianty

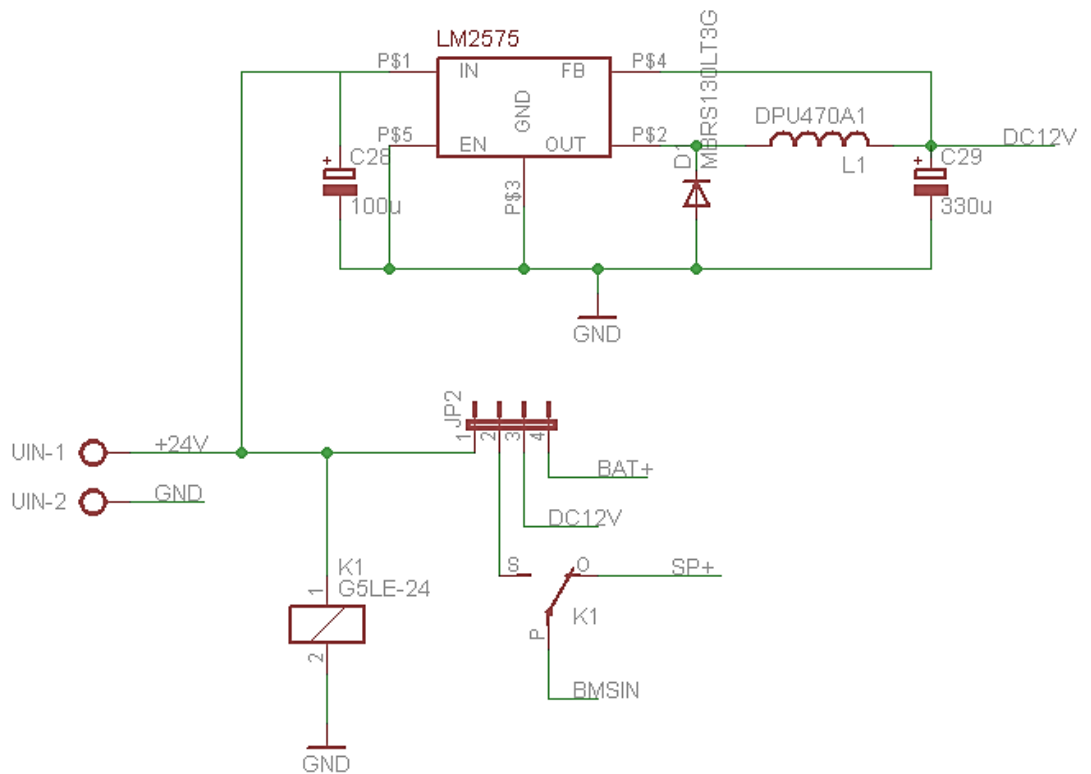
1. varianta – napájení z externího zdroje 24 V stejnosměrných, nebo pomocí baterie.

Pro tuto variantu je **nutné propojit zkratovací propojkou 2 piny blíže k okraji desky**. V případě této varianty je možné použít k napájení externí zdroj připojený na šroubové svorky U1N. Pokud je externí zdroj připojen, je pomocí něj zařízení napájeno a zároveň se z něj dobíjí baterie. Pokud externí zdroj není připojen, je zařízení napájeno pomocí připojené baterie, která je dobíjena přímo z měřeného fotovoltaického panelu. V této variantě nemusí být osazen na desce 12V měnič (LM2575). Logika napájení je řešena pomocí přepínacího relé. Pokud je připojeno na svorkách U1N napětí větší než přibližně 12 V, je relé sepnuté a

na vstup bateriového dobíjecího systému je toto napětí přivedeno. Pokud napětí na svorky UIN přivedeno není, je relé v rozepnutém stavu a na vstup bateriového systému je přivedeno napětí z měřeného fotovoltaického panelu. Obvod pro dobíjení baterií funguje jako spínaný zdroj a na bateriích je napětí přibližně 12V.

2. varianta – napájení z externího zdroje 15-40V stejnosměrných, bez připojené baterie

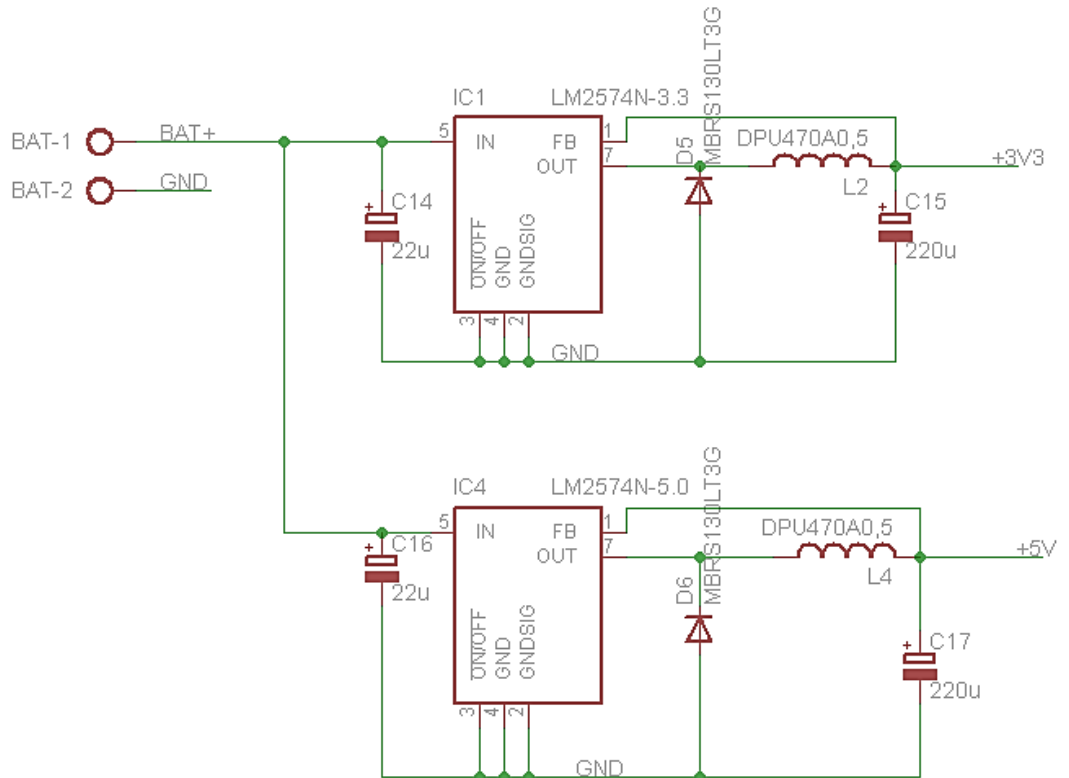
V této variantě je celé zařízení napájeno z externího zdroje stejnosměrného napětí 12-24V. Zdroj musí být připojen ke svorkám UIN. Obvod řízení nabíjení baterií nemusí být na desce osazen, samozřejmě se nepřipojují ani baterie. V této variantě je **potřeba propojit zkratovací propojkou 2 piny dále od okraje desky**. V této variantě je vstupní napětí na svorkách UIN přeměněno spínaným měničem LM2575 na 12V stejnosměrných.



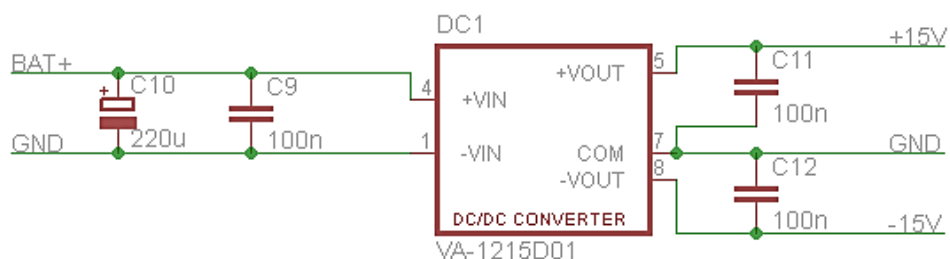
Obr. 2-2:Napájení

Výstupní napětí baterie, nebo napětí 12V zdroje je pomocí spínaných měničů převedeno na:

- 5V pro napájení GSM modulu, teplotních čidel, USB portu, optočlenu a CAN řadiče pomocí spínaného měniče napětí LM2574N-5.0V
- 3,3V pro napájení EMX modulu, GPS modulu a ethernetového konektoru pomocí spínaného měniče napětí LM2574N-3.3
- $\pm 15V$ pro napájení operačních zesilovačů pomocí spínaného zvyšujícího měniče napětí VA1215D01



Obr. 2-3: Měniče +5V a +3,3V



Obr. 2-4: Zvyšující měnič 15V

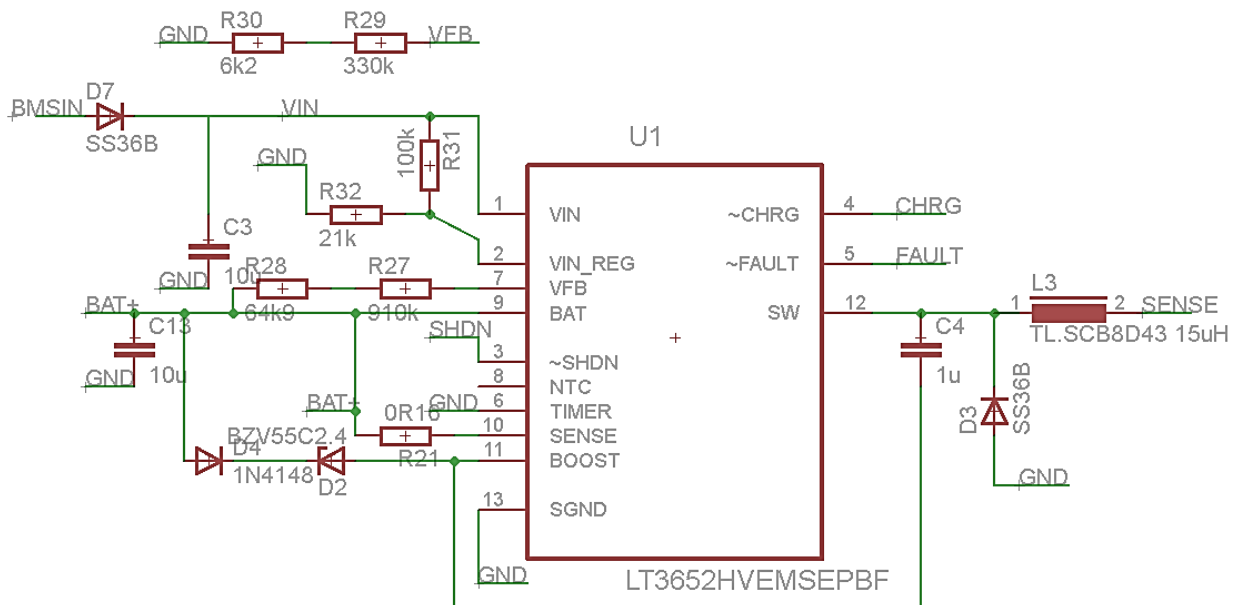
2.2.2 Baterie a jejich nabíjení

Pro zajištění nezávislosti na externím napájení je umožněno zařízení napájet z baterií připojených pomocí šroubových svorek X1. Pro napájení byly vybrány baterie SAFT NR700AALF NiCd 800mAh zapojené do série v počtu 9 kusů. Celková kapacita je tedy 7,2Ah a napětí článků v sérii 10,8V. Nabíjecí proud C/10 je roven 0,72A. NiCd baterie jsou výhodné zejména kvůli jejich velkému rozsahu pracovních teplot pro vybití (-40 °C až + 70 °C). Při nabíjení je třeba programově ošetřit omezení nabíjení při teplotě baterie pod bodem mrazu. Mezi další výhody použitých baterií patří vysoká spolehlivost a životnost.

Pro dobíjení baterie je využíván integrovaný obvod **LT3652HV**. Jedná se obvod určený pro nabíjení baterií ze solárních panelů s následujícími vlastnostmi:

- Integrovaná funkce sledování MPTT (bod maximálního výkonu) připojeného panelu
- Rozsah vstupních napětí 4,95V – 34V
- Programovatelný výstupní proud až 2A
- Ukončení nabíjení baterie pomocí C/10 proudu, nebo programovatelného časovače

Programování vlastností integrovaného obvodu probíhá pomocí hodnot připojených součástek.



Obr. 2-5: Obvod dobíjení baterií

Obvod má po naprogramování následující vlastnosti:

Na vstupu se pomocí napěťového děliče tvořeného dvojicí rezistorů R31 a R32 o velikosti $R_{in1} = 110k$ a $R_{in2} = 21k$ udržuje minimální napětí 16,84V. Pokud napětí klesne pod tuto hranici, integrovaný obvod sníží vstupní proud, tímto způsobem je zaručeno nabíjení baterií ze solárního panelu v bodě jeho maximálního výkonu.

Pomocí napěťového děliče tvořeného rezistory R30 + R29 a R27 + R28 ($R_{FB1} = 975k = 910k (1\%) + 64,9k (1\%)$ $R_{FB2} = 336k = 330k (1\%) + 6,2k(1\%)$) je nastaveno plovoucí napětí baterie. Cílové napětí baterie je nastaveno na 12,87V. Po dosažení této hodnoty již nabíjení dále nepokračuje.

Maximální nabíjecí proud je nastaven pomocí rezistoru R21 = 0,16 Ω připojeného na vstup SENSE na hodnotu 0,625A. Pokud při nabíjení proud poklesne pod hodnotu 0,0625A nabíjení se automaticky ukončí.

Výstup je opatřen potřebnými velikostmi vyhlazovací cívky, kondenzátoru a usměrňovacích diod.

Piny SHDN, CHRG a FAULT jsou připojeny na vstupně/výstupní piny řídicího procesoru. Pin SHDN slouží k zapínání a vypínání nabíjecího obvodu. Pro zapnutí obvodu je třeba přivést na tento pin napětí větší, než 1,2V. Při napětí nižším, než 0,4V přechází obvod do „shutdown“ módu, kdy spotřebovává minimum energie. Vstupní proud na pinu Vin je redukován na 15 μA , toho bude využíváno při měření panelu. Při každém měření je třeba od panelu odpojit zátěž, to bude provedeno právě uvedením nabíjecího obvodu do „shutdown“ módu. Piny CHRG a FAULT slouží k signalizaci stavu nabíjení a nabíjecího obvodu. Jedná se o piny typu otevřený kolektor. Jejich čtení bude provedeno na straně EMX modulu, kde budou aktivovány vnitřní „pull-up“ rezistory.

Měření teploty baterií pomocí integrovaného obvodu nebude využíváno, teplota se bude měřit pomocí OneWire čidla připojeného na řídicí procesor. Pin NTC je tedy nepřipojen. Časové ukončení nabíjení nebude využíváno, pin TIMER je tedy uzemněn.

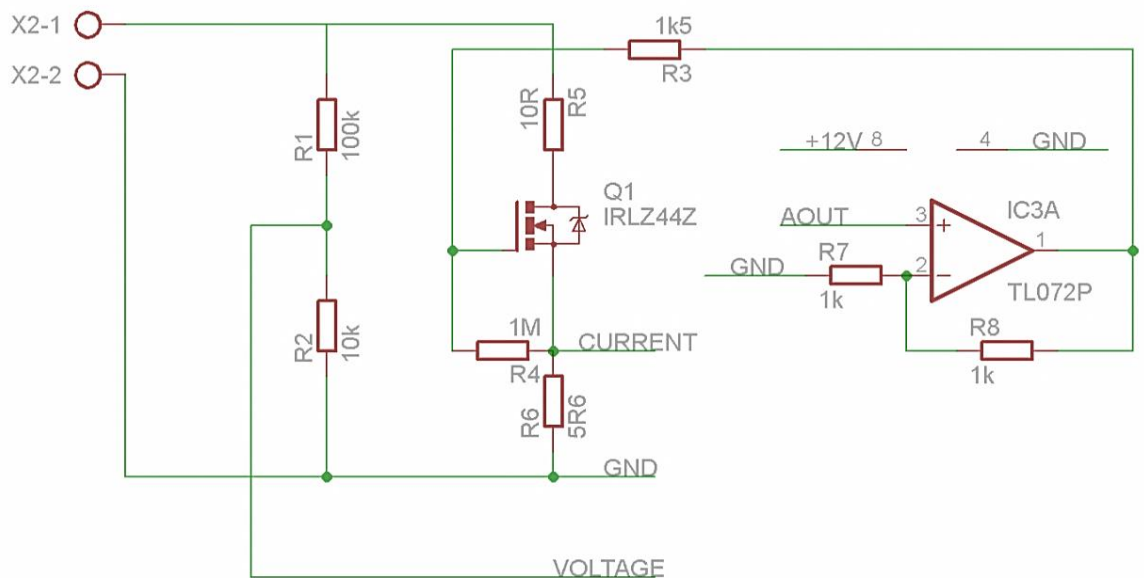
2.2.3 Měření výkonu fotovoltaického panelu

Proud z měřeného panelu prochází drátovými odpory 10R a 5R6 a výkonovým tranzistorem IRLZ44N, pomocí něhož je řízena zátěž panelu (obr. 1.2). Proud je měřen ohmovou metodou jako úbytek napětí na rezistoru 5R6. Paralelně se zátěží jsou připojeny dva rezistory velikosti 10k a 100k. Na rezistoru 10k je měřeno napětí. Obě napětí (jedno představující proud a jedno napětí) jsou přes Butterworthův filtr (obr. 1.3) typu dolní propust

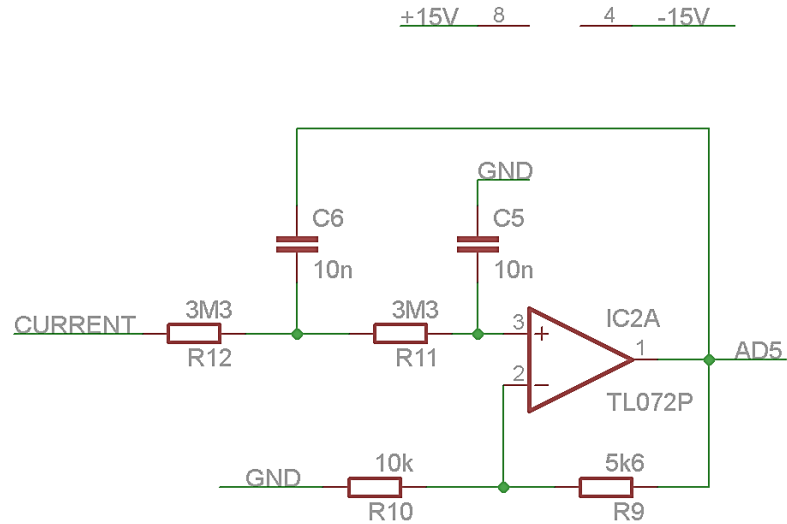
s kritickou frekvencí 5Hz přivedeny na 10bitové AD převodníky procesoru (AD2 a AD5). Butterworthovy filtry jsou realizovány pomocí obvodu TL072CN obsahujícího dva operační zesilovače a příslušnou kombinací SMD rezistorů a kondenzátorů. Pro měření napětí i proudu jsou použity totožné parametry Butterworthových filtrů.

Pro měření maximálního výkonu pro daný okamžik je třeba provést výkonové přizpůsobení. To je zajišťováno pomocí výkonového tranzistoru IRLZ44Z, na jehož gate je přiváděno napětí z analogového výstupu EMX modulu zesílené operačním zesilovačem na odpovídající úroveň. Zátěž panelu je třeba pro každé měření nastavit do vrcholu výkonové charakteristiky

Pozn.: Více informací o teorii měření slunečního záření je možné se dočíst například v mé bakalářské práci.



Obr. 2-6: Měření napětí a proudu



Obr. 2-7: Butterworthův filtr

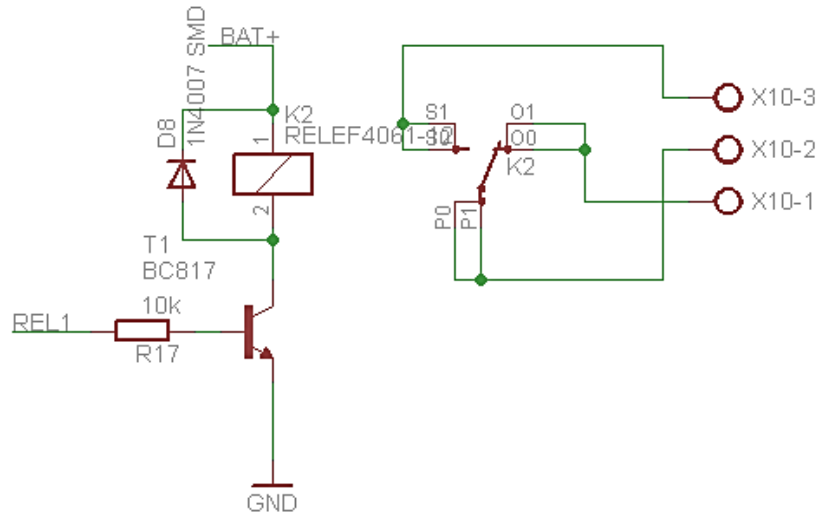
2.3 Vstupně výstupní zařízení desky

2.3.1 Relé

Pro dvoustavovou regulaci (například regulaci ventilů) je deska osazena čtyřmi přepínacími relé - RELEF4061-12. Relé je spínáno pomocí digitálního výstupu EMX modulu. Logická jednička odpovídá na digitálním výstupu napětí 3,3 V, které je přivedeno na bázi bipolárního smd tranzistoru BC817-25. Pomocí tranzistoru je na cívku relé přiváděno napětí 12 V. Kvůli omezení přepětí při rozpínání relé je zapojena k cívce antiparalelní dioda 1N4007. Relé mají následující parametry:

Max. trvalý proud / max. spínaný proud	16/30 A
DC1 max. spínaný proud (30/110/220 V DC)	16/0,3/0,12 A
Min. spínaný výkon	500 mW

Tabulka 2-1: Parametry relé



Obr. 2-8: Zapojení relé

2.3.2 GPS

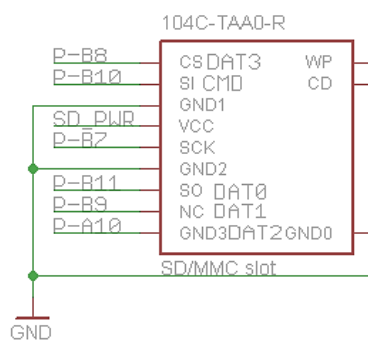
Pro přesné měření aktuálního času může být měřící DPS vybavena GPS modulem **PGPS1** firmy Pandatron. Jedná se o vývojový modul GPS přijímače s modulem Quectel L10 a SMA konektorem pro připojení antény. GPS modul je propojen přes rozhraní UART (COM1) s EMX modulem. Modul se k desce plošných spojů připojuje skrze násuvnou vidlici.



Obr. 2-9: GPS modul

2.3.3 SD karta

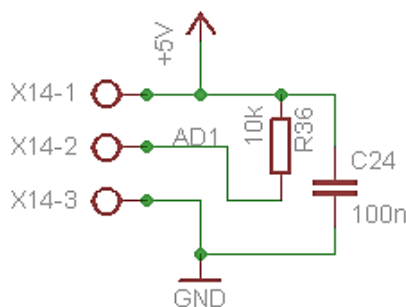
Pro zápis dat, například dat naměřených na fotovoltaickém panelu je deska osazena slotem na SD kartu.



Obr. 2-10: SD karta

2.3.4 Teplotní čidla

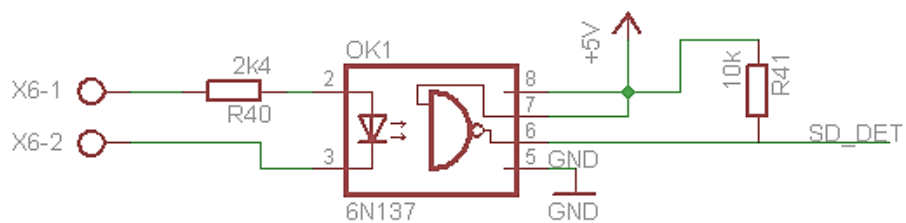
Pro měření teplot je možné k desce pomocí šroubovacích svorek připojit 4 OneWire čidla. Pro účely řízení rodinného domu se používají čidla DS18B20. Jedná se o číslicový teploměr s 12-bitovým rozsahem $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ (přesnost $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Obr. 2-11: Připojení OneWire čidla

2.3.5 Optočlen

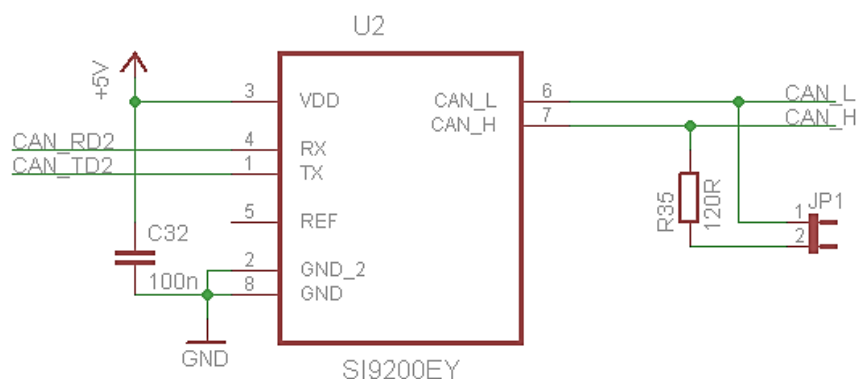
Pro měření dvoustavových veličin a jejich galvanického oddělení od zařízení je deska vybavena integrovaným obvodem 6N137. Integrovaný obvod má izolační pevnost 2,5 kV. Kontakty optočlenu jsou vyvedeny na šroubovací svorku OPTO. Pro účely řízení rodinného domu se optočlen používá například pro detekování stavu termostatu. Na vstup optočlenu je přivedeno napětí 12 V odpovídající logické 1, nebo 0 V odpovídající logické nule. Rezistor na vstupu omezuje proud fotodiodou na velikost 5 mA, při 12 V. Při tomto proudu fotodioda sepne fototranzistor a výstup bude uzemněn. V opačném případě je na výstup přiváděno přes „pull-up“ rezistor napětí 5 V.



Obr. 2-12: Optočlen

2.3.6 CAN řadič

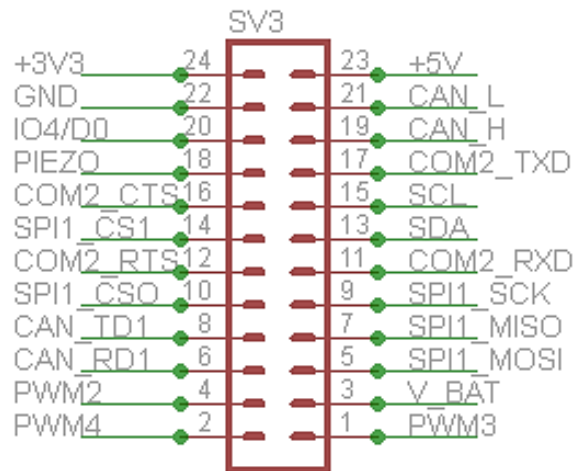
Pro možnou implementaci CAN sběrnice je deska osazena CAN řadičem SI9200EY. Piny CAN sběrnice jsou vyvedeny na dvouřádkový pinheader. Pro účely řízení rodinného domu je CAN sběrnice využívána pro komunikaci s AC/DC měničem používaným pro ohřívání vody v akumulační nádrži.



Obr. 2-13: CAN řadič

2.3.7 Další zařízení

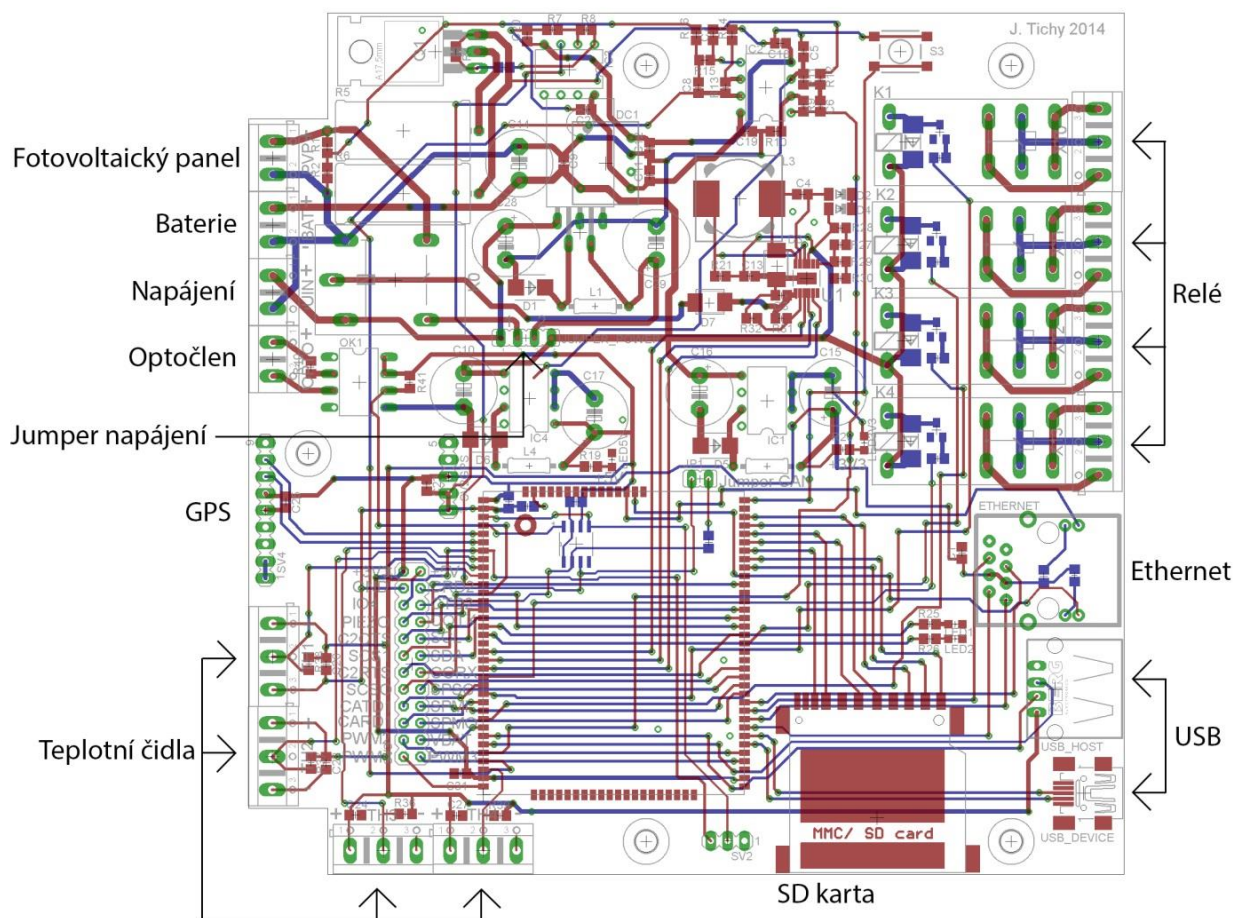
Dále je deska vybavena dvěma USB konektory (1x DEVICE a 1x HOST), Ethernetovým konektorem a signalizačními diodami. U spínaných zdrojů 3,3 V a 5 V jsou umístěny diody signalizující správnou funkci napájení. Dále DPS obsahuje 2 diody označené jako LED1 a LED2, které jsou připojeny k digitálním výstupům procesoru a slouží k signalizaci chodu zařízení (mohou být libovolně naprogramované). Nepoužité piny EMX modulu jsou vyvedeny na dvouřádkový pinheader.



Obr. 2-14: Pinheader s popsanými výstupy

2.3.8 Konstrukce desky

Deska je navržena tak, aby ji bylo možné připevnit do konstrukční krabičky. K tomuto účelu je na desce 5 montážních děr, pomocí kterých se deska přes distanční sloupky umístí do krabičky. S ohledem na minimalizaci rozměrů je většina součástek v SMD provedení a součástky jsou na desce umístěny oboustranně. Rezistory a menší kondenzátory jsou ve velikosti 0805. Při návrhu byla použita technologie rozlévané mědi pro zemnění na vrchní i spodní straně desky. Většina součástek je dostupná v obchodě GME. Vnější rozměry desky plošných spojů jsou 123 mm x 125 mm s výřezy v levém horním a levém dolním okraji. Rozměry jsou omezeny geometrií zvolené konstrukční krabičky.



Obr. 2-15: Řídicí deska

2.4 Měřicí deska

Měřicí deska je navržena a vyrobena totožnou technologií jako deska řídicí. Obsahuje EMX modul stejně jako řídicí deska se kterou komunikuje po ethernetovém rozhraní.

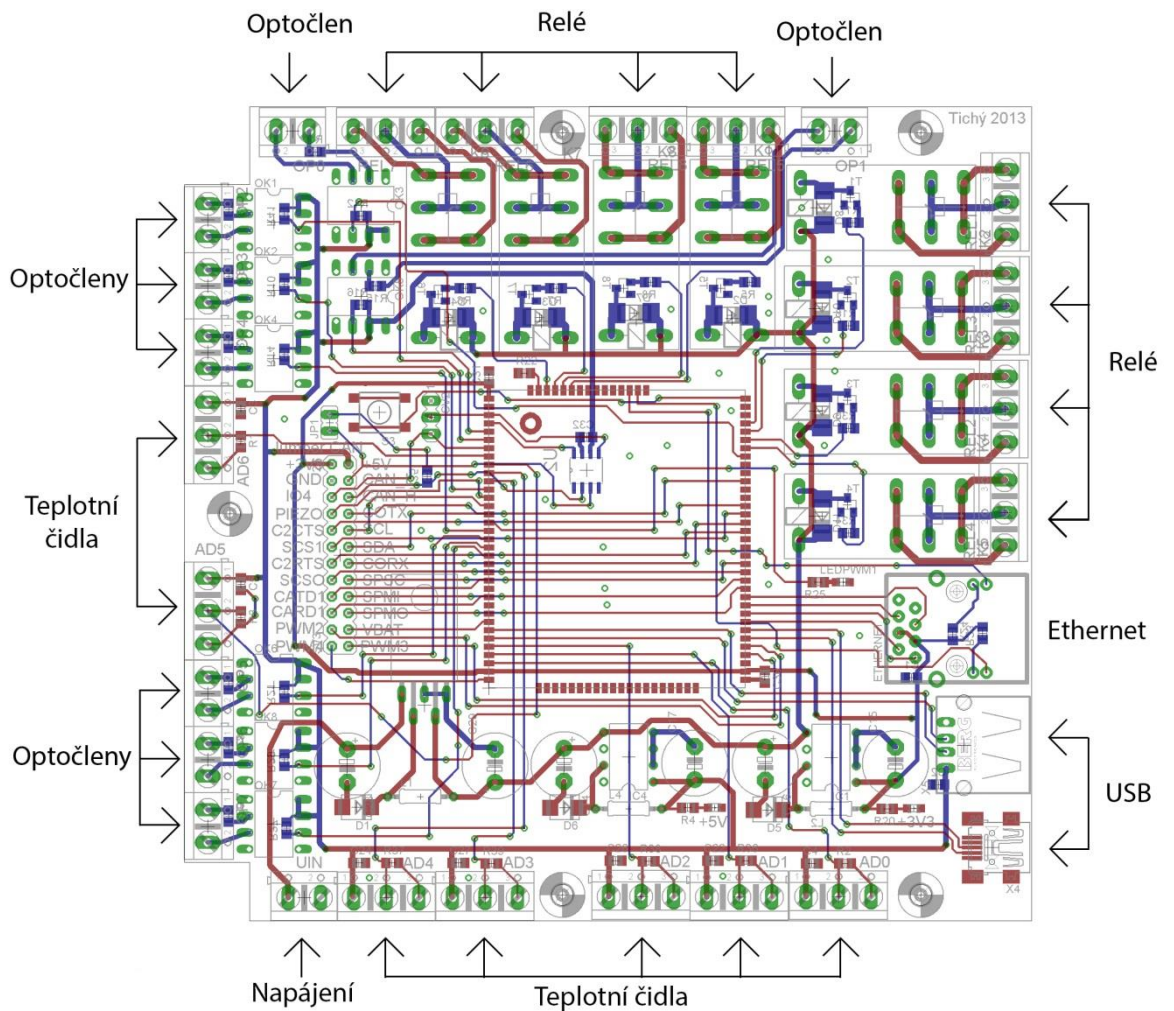
Deska obsahuje následující periferie:

- 8 relé výstupů
- 8 optočlenů pro měření dvoustavových veličin
- CAN driver
- 2x USB (HOST a DEVICE)
- 7x 1-Wire rozhraní pro připojení teplotních čidel

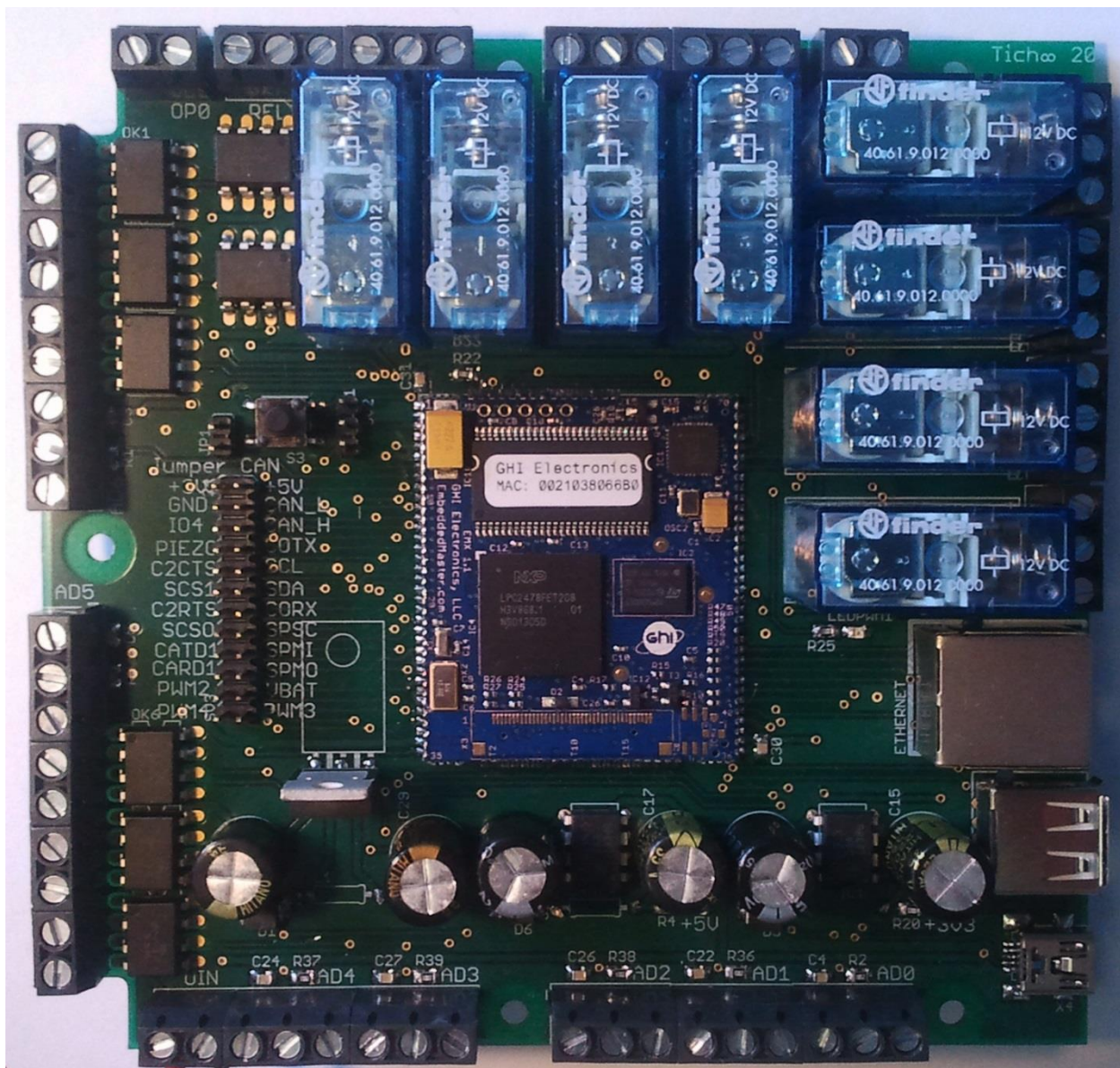
Nepoužité piny EMX modulu jsou vyvedeny na dvouřádkový pinheader. Pro připevnění desky do konstrukční krabičky je deska opatřena pěti montážními děrami o průměru 3,3 mm. Vnější rozměry desky plošných spojů jsou 123 mm x 125 mm s výřezy v levém horním a levém dolním okraji. Rozměry jsou omezeny geometrií zvolené konstrukční krabičky.

2.4.1 Napájení

Napájení desky je zajištěno pomocí externího zdroje 24 V stejnosměrných. Na vstup je možné přivést napájení 12 V až 40 V. Vstupní napájení je pomocí spínaného snižujícího měniče LM2575, převedeno na 12 V stejnosměrných. Toto napětí je použito na napájení cívek relé a napájení spínaných měničů LM2574N–3.3 a LM2574N–5.0. Pomocí měničů je napětí 12 V převedeno na 3,3 V a 5 V. Napětí 3,3 V je použito na napájení EMX modulu a Ethernetového konektoru. Napětí 5 V je použito na napájení optočlenů, teplotních čidel a CAN řadiče. Spínané měniče napětí jsou navrženy stejně jako v případě řídicí DPS.



Obr. 2-16.: Měřicí deska - schéma



Obr. 2-17: Měřicí deska – fotografie vrchní strany

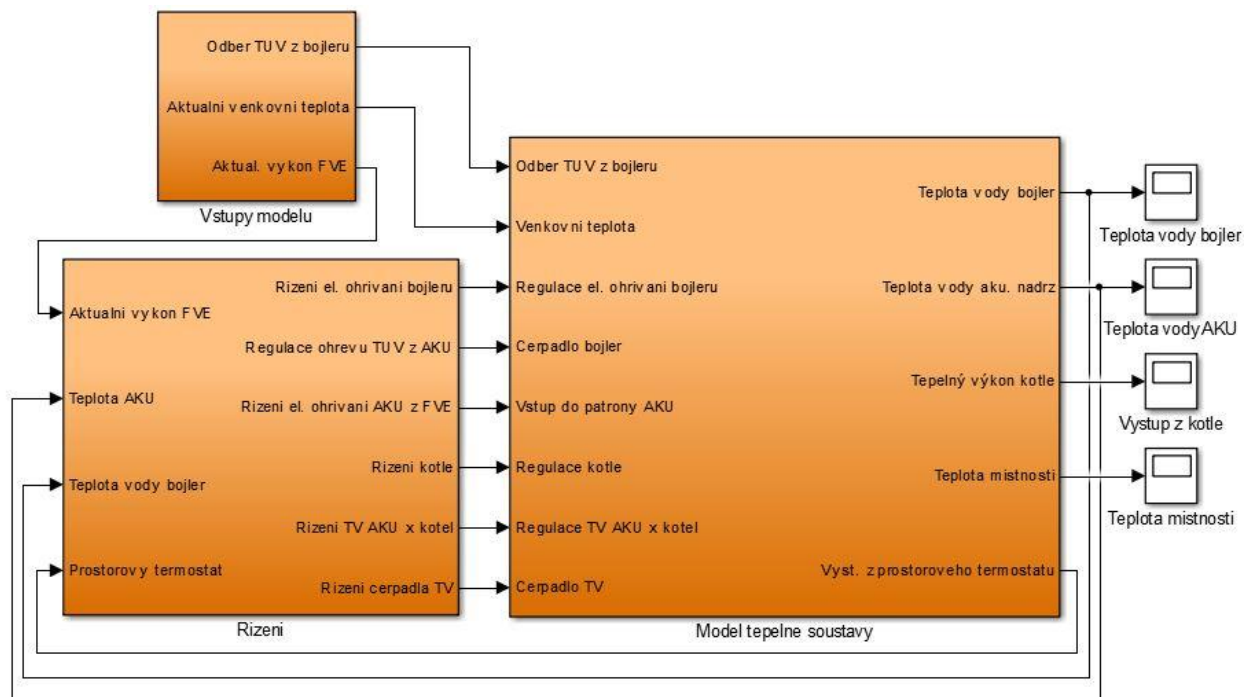
3 Model rodinného domu

Model rodinného domu jsem vytvořil v programu MATLAB a jeho nadstavbě Simulink. Simulink je program pro simulaci a modelování dynamických systémů, který využívá algoritmy MATLABu pro numerické řešení nelineárních diferenciálních rovnic. Model v Simulinku se vytváří pomocí sítě propojených bloků, jež matematicky popisují jednotlivé části systému. Bloky se mohou pro přehlednost shlukovat do subsystémů. Můj model je tvořen třemi základními subsystémy:

Vstupy modelu představují reálné vstupy systému: Odběr teplé vody z bojleru, aktuální venkovní teplotu a aktuální výkon FVE.

Řízení představuje řídicí algoritmus ovládající rodinný dům a reagující v uzavřené smyčce na jeho výstupy.

Model tepelné soustavy představuje fyzikální model celé otopné soustavy domu. Model respektuje základní nejdůležitější charakteristiky jednotlivých členů a zanedbává některé méně důležité.



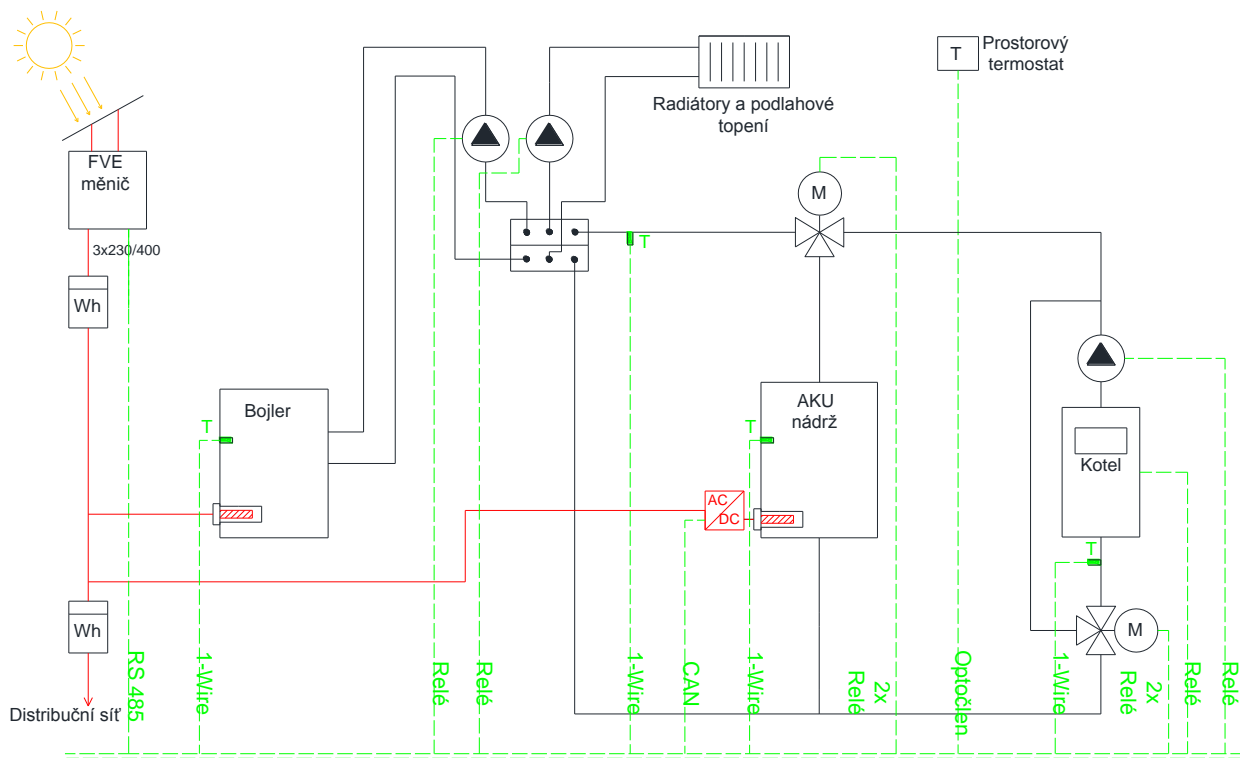
Obr. 3-1: Matlab - Model rodinného domu

3.1 Identifikace rodinného domu

Řídicí systém bude realizován v rodinném domě nacházejícím se ve Středočeském kraji v obci Horní Slivno. Jedná se o dvoupodlažní novostavbu s instalovanou fotovoltaickou elektrárnou. Cílem je optimalizovat vlastní spotřebu pomocí řízeného ohřevu vody v akumulární nádrži. Topná patrona v akumulární nádrži bude napájena z řízeného usměřovače s aktivní korekcí účinníku a nízkou úrovní elektromagnetického rušení. Stavbou tohoto měniče se zabývá diplomová práce pana Zdeňka Lehmana [3]. Rodinný dům je vybaven kompletní otopnou soustavou obsahující peletový kotel, akumulární nádrž, bojler s trubkovým výměníkem a kombinaci podlahového a radiátorového vytápění. Podrobnější popis jednotlivých komponent je v kapitole 4.1

Dům je rovněž vybaven fotovoltaickou elektrárnou o špičkovém výkonu 15,75 kWp. Elektrárna je tvořena třemi „stringy“ obsahujícími celkem 63 kusů panelů Canadian Solar CS6P – 250Wp. Panely jsou umístěny na střeše domu s orientací 190° (téměř jižní) a sklonem 35° . Stejnoseměrný proud z panelů je střídán měničem Danfoss TLX 15k. Měnič je vybaven nezávislým sledovačem bodu maximální výkonu (MPP trackerem) pro každou fázi. Měnič disponuje maximální účinností 98 % a normovanou účinností (Euro efficiency at $V_{dc,r}$) 97,4 %. Maximální výstupní proud na střídavé straně je 3 x 22,4 A. Jmenovité napětí stejnosměrné strany je 700 V.

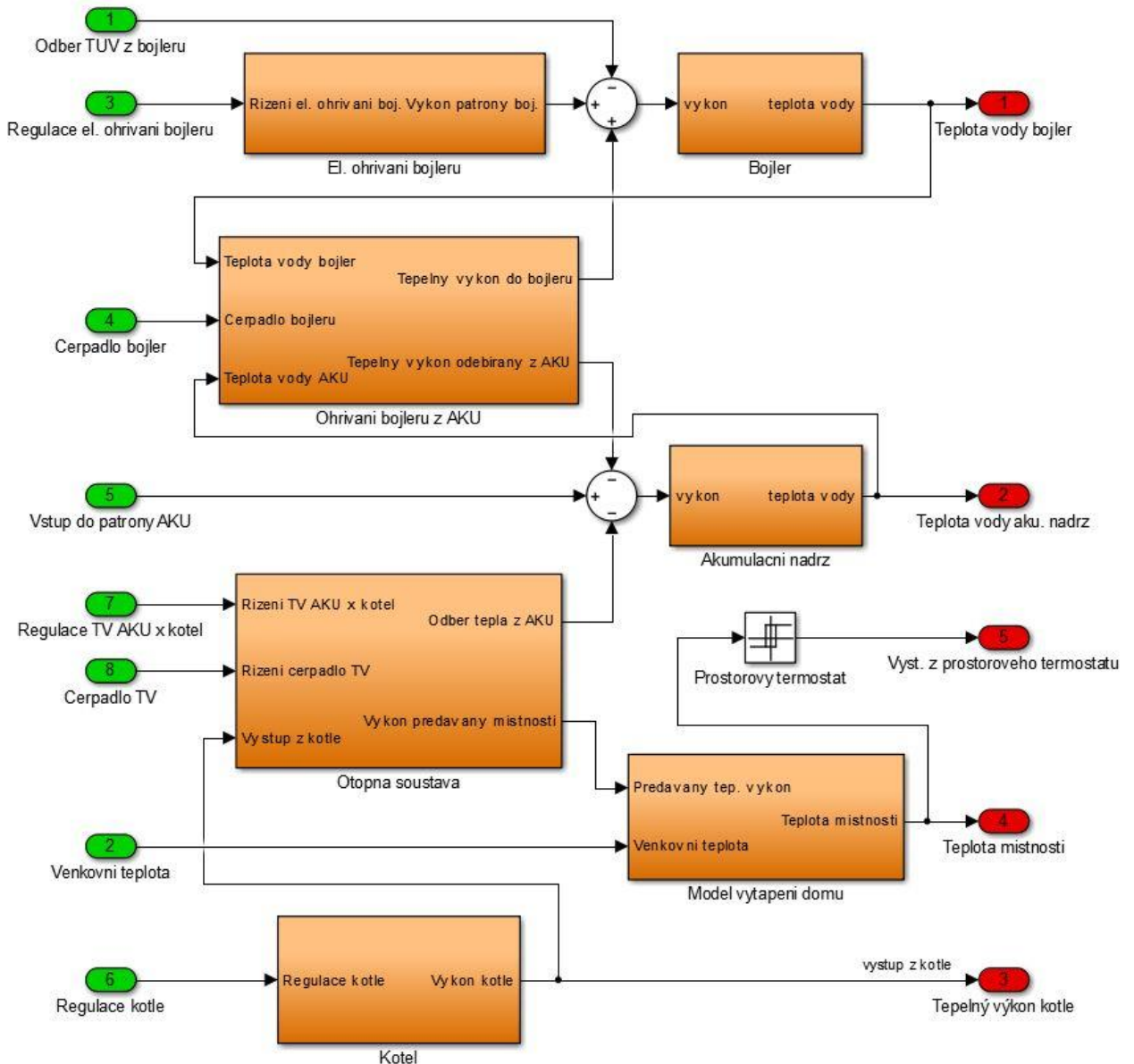
Na následujícím obrázku je schéma zapojení otopné soustavy, FVE elektrárny a propojení jednotlivých komponent s řídicím systémem. Zelenou přerušovanou čarou jsou vyznačeny vodiče vstupující do řídicího systému (Relé, optočleny, Teplotní OneWire čidla, CAN sběrnice a sběrnice RS 485).



Obr. 3-2: Schéma rodinného domu

3.2 Model tepelné soustavy

Subsystém „Model tepelné soustavy“ je tvořen 8 vstupy, 5 výstupy a několika dalšími subsystémy představujícími jednotlivé části tepelné soustavy. Jednotlivé subsystémy jsou popsány v následující kapitole včetně jejich matematického popisu.



Obr. 3-3: Matlab - Model tepelné soustavy

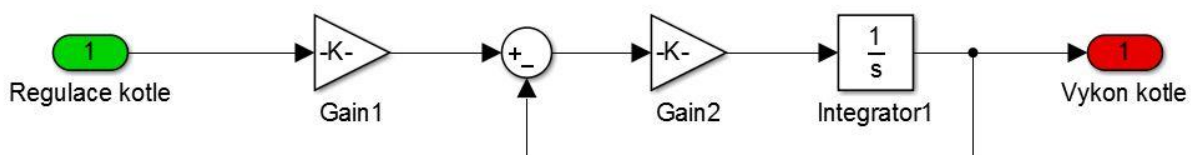
3.2.1 Kotel

V domě je instalován kotel na pelety s automatickým podavačem paliva GF N 7 výrobce Ferroll. Nominální výkon kotle činí 23,7 kW. V Simulinku je kotel představován blokem obsahujícím 2 zesilovače, integrátor a zpětnou vazbu. Vstupem bloku je jednotkový skok,

představující zapnutí kotle, výstupem je tepelný výkon kotle. Kotel je v modelu aproximován proporcioální soustavou se setrvačností 1. řádu. Přenos soustavy můžeme vyjádřit jako:

$$G(s) = \frac{K}{T_1s + 1} = \frac{23700}{180s + 1}$$

kde K je zesílení soustavy představující nominální výkon kotle (23,7 kW)
 T_1 je časová konstanta představující náběh kotle při zapínání (180 s)



Obr. 3-4: Matlab – Kotel

3.2.2 Akumulační nádrž

V domě je instalována akumulční nádrž NAD 1000 v2 firmy Družstevní závody Dražice. Nádrž má objem 1000 l a je izolována polyesterovým vláknem (fleece) Symbio LB o tloušťce 100 mm. V Simulinku je nádrž reprezentována blokem „Akumulacni nadrz“. Vstupem bloku je tepelný výkon, který je dodáván, nebo odebírán z nádrže. Celková tepelná energie akumulovaná v nádrži je vypočtena pomocí integrálu:

$$Q_{AKU} = \int_0^t P(t)dt \quad (1)$$

kde P je tepelný výkon vstupující do nádrže (W)
 Q_{AKU} je tepelná energie akumulovaná v nádrži (J)

Za hladinu nulové energie je stejně jako v celém modelu považována teplota 0 °C. Počáteční podmínka integrátoru je hodnota $8,36 \times 10^7$ jež představuje počáteční energii v nádrži odpovídající hodnotě 20 °C.

Tepelná energie v nádrži je přepočtena na teplotu vody dle vztahu:

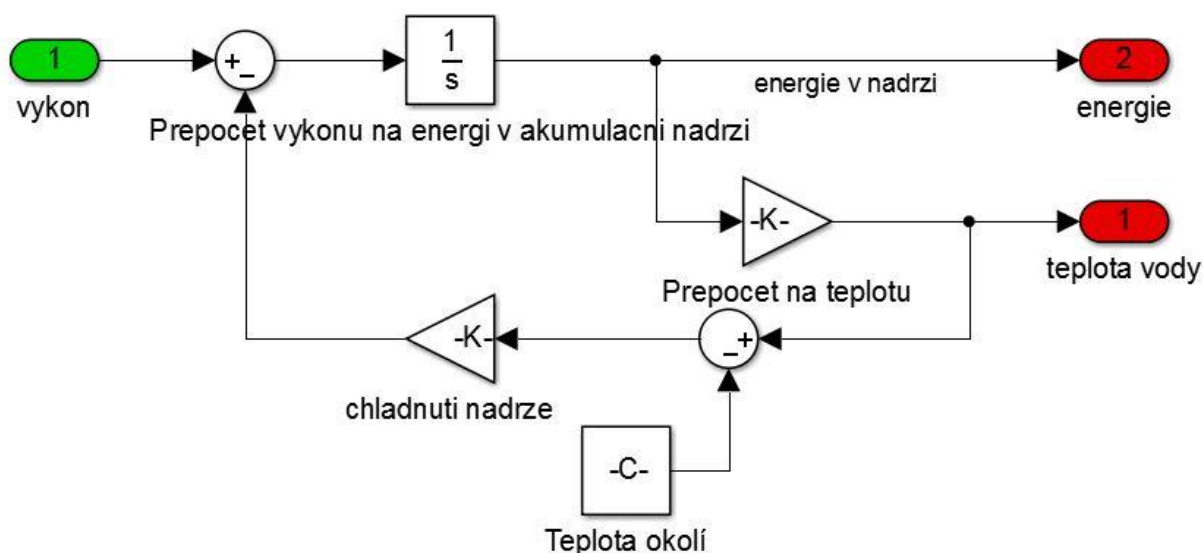
$$T_{AKU} = \frac{Q_{AKU}}{m_{AKU} \cdot c_v} \quad (2)$$

kde T_{AKU} je teplota vody v akumulaci (°C)
 Q_{AKU} je tepelná energie vody v akumulaci (J)
 m_{AKU} je hmotnost vody v akumulaci (1000 kg)
 c_v je měrná tepelná kapacita vody (4180 J K⁻¹ kg⁻¹)

Tepelné ztráty vzniklé kondukcí přes izolaci reprezentuje záporná zpětná vazba se zesílením. Ztrátový tepelný výkon je závislý na teplotě dle vzorce:

$$P_{ZAKU} = \alpha_{AKU}(T_{AKU} - T_{amb}) \quad (3)$$

kde P_{ZAKU} je ztrátový tepelný výkon akumulaci (W)
 α_{AKU} je součinitel tepelných ztrát akumulaci (4 W K⁻¹)
 T_{AKU} je teplota vody v akumulaci (°C)
 T_{amb} je teplota okolí akumulaci (15 °C)



Obr. 3-5 Matlab - Akumulační nádrž

3.2.3 Bojler

V domě je instalován bojler firmy Družstevní závody Dražice s velkoplošným trubkovým výměníkem OKCE NTR/3 - 6 kW o objemu 300 l. Bojler je izolován polyuretanovou

pěnou o tloušťce 42 mm. V Simulinku je nádrž reprezentována blokem „Akumulacni nadrz“. Vstupem bloku je tepelný výkon, který je dodáván, nebo odebírán z nádrže. Celková tepelná energie akumulovaná v nádrži je vypočtena pomocí integrátoru:

$$Q_{BOJLER} = \int_0^t P(t)dt \quad (4)$$

kde P je tepelný výkon vstupující do bojleru (W)
 Q_{BOJLER} je tepelná energie akumulovaná v bojleru (J)

Za hladinu nulové energie je stejně jako v celém modelu považována teplota 0 °C. Počáteční podmínka integrátoru je hodnota $6,27 \times 10^7$, jež představuje počáteční energii v nádrži odpovídající hodnotě 50 °C.

Tepelná energie v nádrži je přepočtena na teplotu vody dle vztahu:

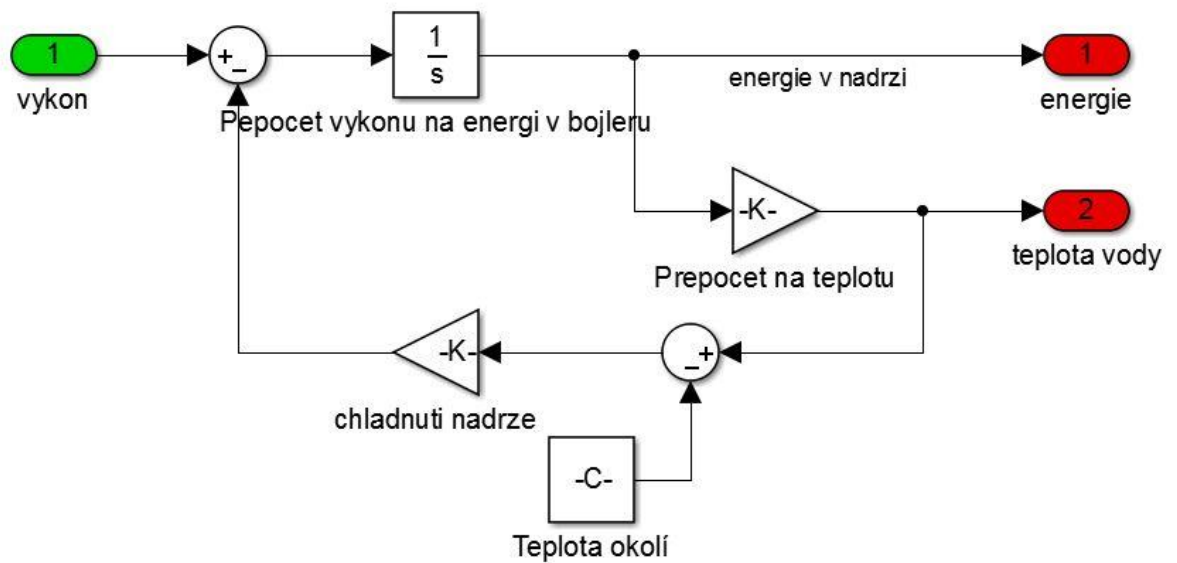
$$T_{BOJLER} = \frac{Q_{BOJLER}}{m_{BOJLER} \cdot c_v} \quad (5)$$

kde T_{BOJLER} je teplota vody v bojleru (°C)
 Q_{BOJLER} je tepelná energie vody v bojler (J)
 m_{BOJLER} je hmotnost vody v bojleru (1000 kg)
 c_v je měrná tepelná kapacita vody ($4180 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$)

Tepelné ztráty vzniklé kondukcí přes izolaci reprezentuje záporná zpětná vazba se zesílením. Ztrátový tepelný výkon je závislý na teplotě dle vzorce:

$$P_{ZBOJLER} = \alpha_{BOJLER} \cdot (T_{BOJLER} - T_{amb}) \quad (6)$$

kde $P_{ZBOJLER}$ je ztrátový tepelný výkon bojleru (W)
 α_{BOJLER} je součinitel tepelných ztrát akumulacní nádrže ($2,2 \text{ W K}^{-1}$)
 T_{BOJLER} je teplota vody v bojleru (°C)
 T_{amb} je teplota okolí akumulacní nádrže (15 °C)



Obr. 3-6: Matlab – Bojler

3.2.4 Model vytápění domu

Model vytápění domu je zjednodušený model zanedbávající některé důležité aspekty jako například solární zisky a tepelný výkon domácích spotřebičů. Model počítá pouze s tepelnými ztrátami vycházejícími z výpočtu provedeného dle ČSN 730542 a ČSN 060210 a tepelnou kapacitou domu. Tepelné ztráty při uvažování výměny vzduchu 0,30 /hod a venkovní teploty -15 °C byly vypočteny na 9,40 kW.

V Simulinku je vytápění domu reprezentováno blokem „Model vytapani domu“. Vstupem bloku je aktuální venkovní teplota a tepelný výkon předávaný otopnou soustavou. Aktuální tepelné ztráty jsou vypočteny takto:

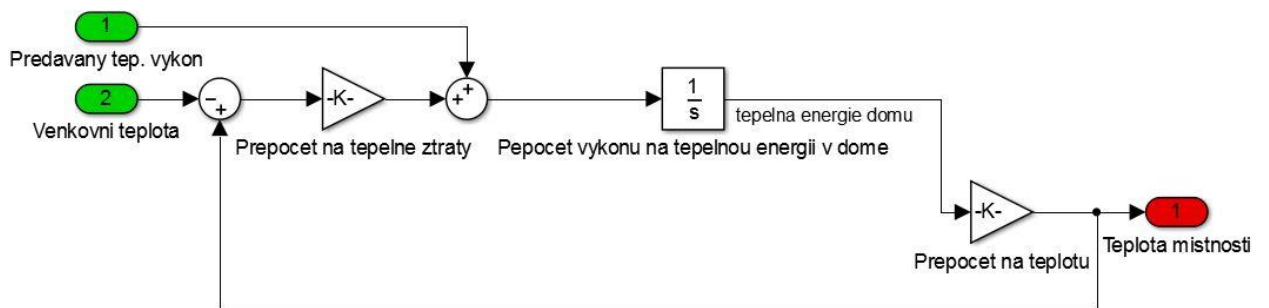
$$P_{ZDUM} = \alpha_{DUM} \cdot (T_{DUM} - T_V) \quad (7)$$

<i>kde</i>	P_{ZDUM}	je ztrátový výkon domu (W)
	α_{DUM}	je součinitel tepelných ztrát domu (268 W K ⁻¹)
	T_{DUM}	je vnitřní teplota v místnosti
	T_V	je aktuální venkovní teplota

Ztrátový tepelný výkon je sečten s předávaným tepelným výkonem otopné soustavy a přepočten na vnitřní teplotu domu (místností):

$$T_{DUM} = \frac{\int_0^t (P_{ZDUM}(t) + P_{OTOP}) dt}{C_{DUM}} \quad (8)$$

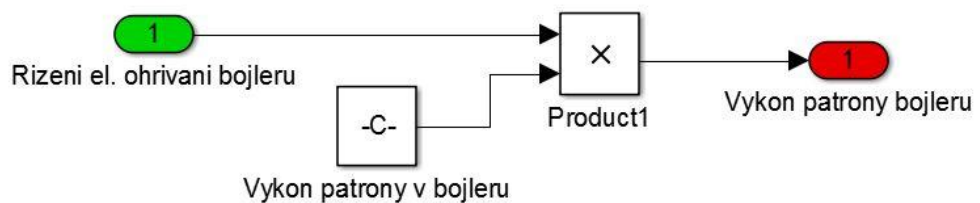
kde P_{OTOP} je aktuální výkon otopné soustavy (W)
 C_{DUM} je tepelná kapacita domu ($J K^{-1}$)



Obr. 3-7: Matlab - Model vytápění domu

3.2.5 Elektrické ohřívání bojleru

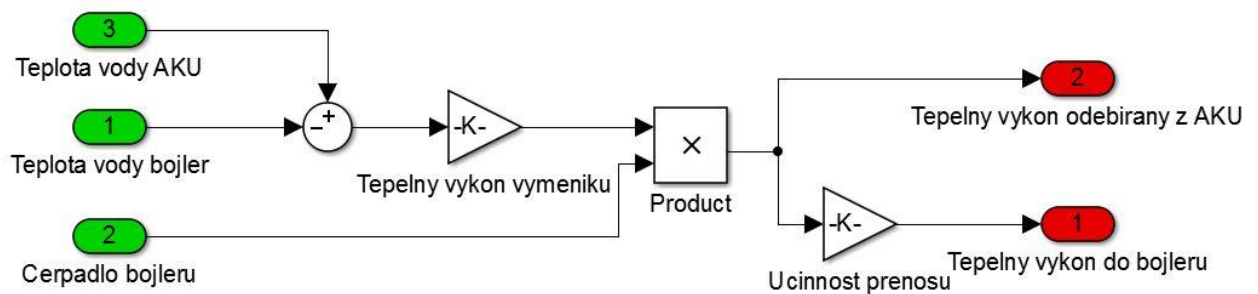
Bojler je vybaven elektrickou patronou o výkonu 6 kW. V modelu je reprezentován jednoduchým blokem, kde je vstupní logická hodnota „Rizeni el. ohřivani bojleru“ vynásobena výkonem patrony bojleru (6 kW).



Obr. 3-8: Matlab - El. ohřívání bojleru

3.2.6 Ohřívání bojleru z akumulární nádrže

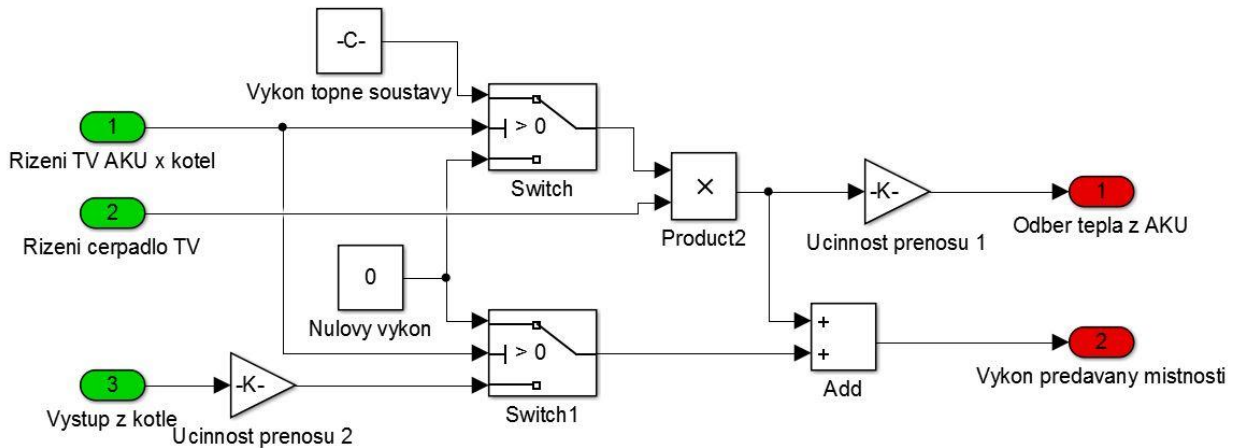
Ohřívání vody v bojleru z akumulární nádrže je zajištěno pomocí velkoplošného tepelného výměníku umístěného v bojleru. V Simulinku je ohřev reprezentován blokem, jehož vstupem je teplota vody akumulární nádrže, teplota vody bojleru a pokyn pro sepnutí čerpadla bojleru. Výkon předávaný bojleru závisí na průtoku vody výměníkem, který je konstantní, a rozdílem teplot, mezi akumulární nádrží a bojlerem. Výstupem modelu je tepelný výkon dodávaný do bojleru a tepelný výkon odebíraný z nádrže.



Obr. 3-9: Blok - Ohřívání bojleru z akumulární nádrže

3.2.7 Otopná soustava

Vytápění domu je zajištěno pomocí kombinace podlahového topení a klasických radiátorů. V Simulinku modeluje tuto funkci blok „Otopná soustava“. Vstupem bloku jsou logické hodnoty rozhodující o zdroji vytápění (Akumulární nádrž x peletový kotel) a spouštění čerpadla okruhu topných těles. Ztráty soustavy jsou modelovány pomocí bloků „Učinnost přenosu“.



Obr. 3-10: Blok - Otopná soustava

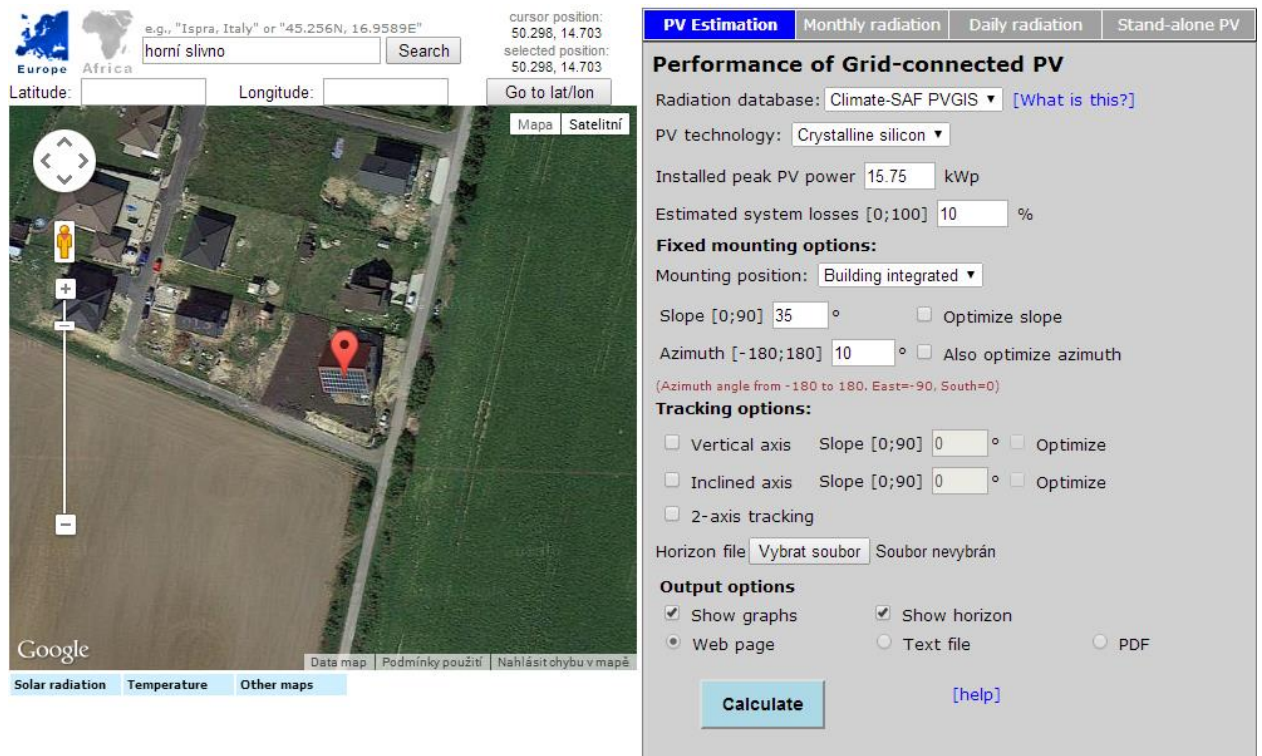
3.3 Vstupy modelu

3.3.1 Aktuální výkon fotovoltaické elektrárny

Pro potřeby modelu bylo třeba získat reálná vstupní data pro modelování výstupního výkonu z fotovoltaických panelů. Základem pro vstupní data jsou solární data naměřená na meteostanici v Počátkách. Data jsou navzorkována po jedné minutě a jsou k dispozici pro celý rok po jednotlivých měsících. Meteostanice se nachází na Vysočině v nadmořské výšce 614 m.n.m.. Data tedy neodpovídají poloze našeho objektu, jsou použity pouze pro simulaci reálné dynamiky systému. Pro náš konkrétní případ jsem data upravil s pomocí hodnot získaných z programu PVGIS. PVGIS je model vytvořený výzkumným centrem Evropské komise. Je zaměřený přímo na využití pro fotovoltaické aplikace, umožňuje kalkulaci výroby elektřiny v konkrétním místě kdekoli v Evropě i v Africe. Je k dispozici on-line a zdarma. Výpočetní model využívá jak údaje ze satelitních měření, tak z pozemních meteostanic. Do online programu jsem zadal data popisující FVE:

Poloha:	Horní Slivno (50°17'53.854"N, 14°42'11.387"E)
FV technologie:	Krystalický křemík
Instalovaný výkon:	15,75 kW _p
Odhadované ztráty:	10 %
Sklon:	35 °
Azimut:	10 ° (téměř jižní orientace)

Tabulka 3-1: Parametry FVE



Obr. 3-11: PVGIS

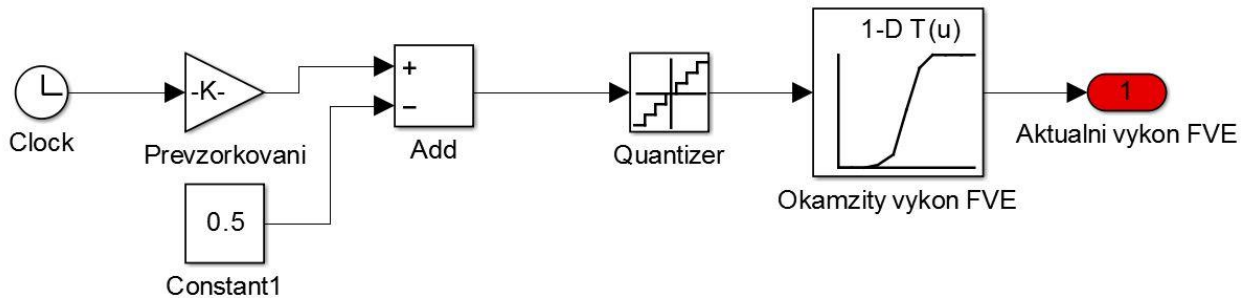
Výstupem modelu jsou odhadované hodnoty vyrobené energie z FVE za jednotlivé měsíce a za celý rok. Výsledné hodnoty jsou v kWh. Nyní porovnáme hodnotu odhadované roční vyrobené energie z modelu PVGIS s hodnotou roční sumy dopadlého slunečního záření naměřené na meteostanici v Počátcích. Jejich poměr nazveme korekční faktor k_r :

$$k_r = \frac{\sum_{PVGIS}}{\sum_{METEO}} = \frac{15400 \text{ kWh}}{1002,1 \text{ kWh}} = 15,4 \quad (9)$$

kde \sum_{PVGIS} roční suma energie vyrobená za rok FVE podle modelu PVGIS (kWh)
 \sum_{METEO} roční suma energie dopadlého slunečního záření naměřená na meteostanici

Korekčním faktorem k_r poté přenásobíme všechny hodnoty naměřené meteostanicí a získáme hodnoty, které odpovídají velikostně konkrétní FVE a zachovávají dynamiku reálných slunečních dat (vliv oblačnosti). Hodnoty jsou uloženy do souborů po měsících.

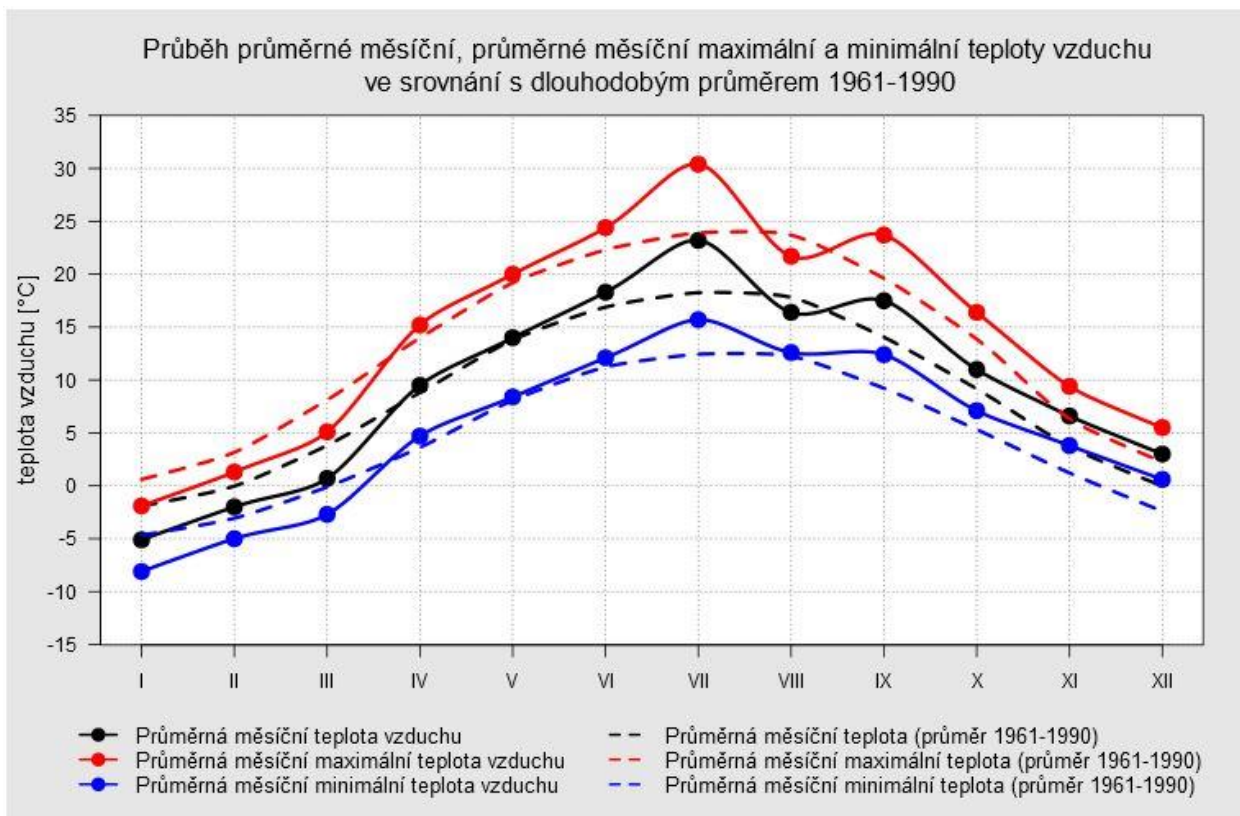
V Simulinku jsou fotovoltaická data realizována blokem „Aktualni vykon FVE“. Blok obsahuje „lookup tabulku“ jejímž vstupem je aktuální čas v minutách. Základní jednotkou času v simulaci je sekunda a tak musí být výstup z hodin „Clock1“ převzorkován (vydělen 60) a kvantován na celá čísla. Konstanta 0,5 se odečítá pro správnou synchronizaci signálu. „Lookup tabulka“ načítá hodnoty z předpřipraveného souboru programu excel příslušného měsíce. Např.: „leden.xls“.



Obr. 3-12: Blok - Aktualni vykon FVE

3.3.2 Aktuální teplota

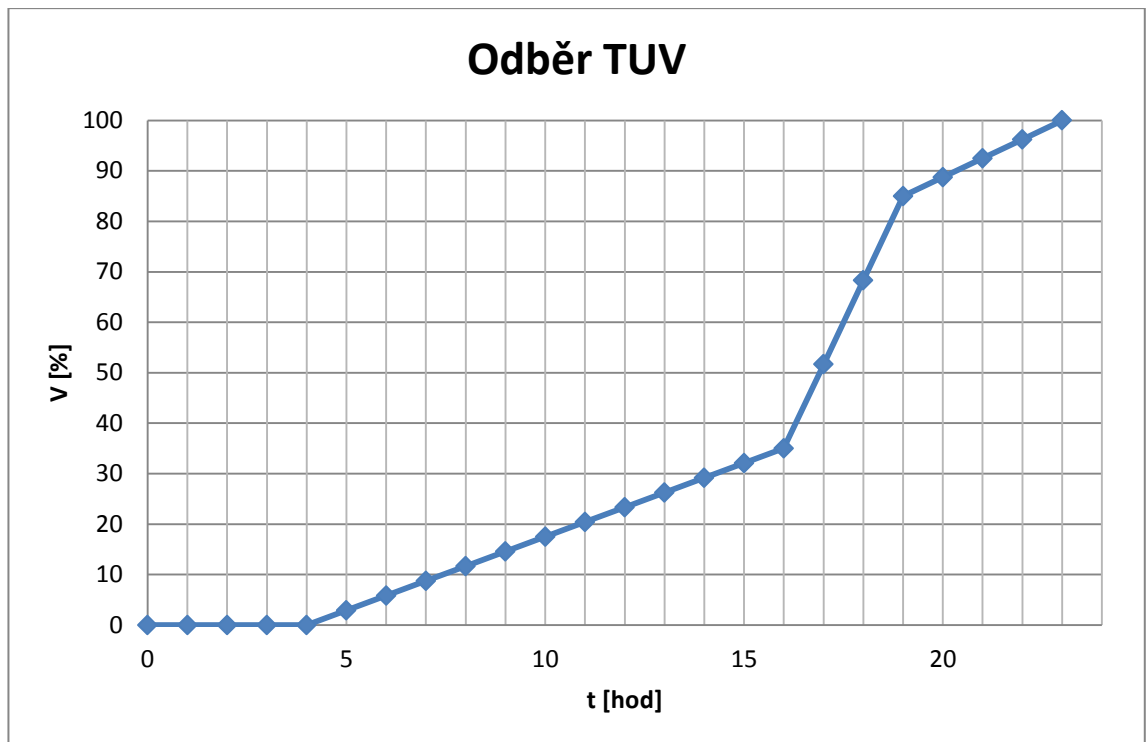
Pro zjištění reálných tepelných ztrát objektu je třeba znát okamžitou venkovní teplotu. Data jsem zajistil podobným způsobem jako data solární. Základem byla minutová data naměřená na meteostanici v Počátkách. Pro větší přesnost byla data korigována pomocí dat z meteostanice ČHMÚ v Semčicích. Semčice se nacházejí 22 km od Horního Slivna a v téměř totožné nadmořské výšce (Horní Slivno: 270 m.n.m., Semčice: 235 m.n.m.), průměrné teploty se tedy dají očekávat téměř totožné. Použil jsem průměrná měsíční data z let 1961 – 1990. Korekce proběhla stejným způsobem pomocí korekčního faktoru jako u solárních dat pro každý měsíc zvlášť. Díky lineární funkci tepelných ztrát objektu budou celkové tepelné ztráty za měsíc shodné pro všechny možné průběhy teplot se stejným aritmetickým průměrem. V Simulinku jsou data zpracována stejným způsobem, pomocí lookup tabulky, jako data solární.



Obr. 3-13: Průběh měsíčních průměrných teplot v Semčicích

3.3.3 Odběr teplé užitkové vody

K modelování odběru TUV jsem použil normu ČSN 06 0320, která se zabývá metodikou výpočtu TV. Norma udává křivky odběru vody pro různé typy budov a jejich využití. Našemu případu odpovídá křivka pro rodinný dům. Lineární aproximaci křivky odpovídá obr. Množství spotřebované TUV udává vyhláška č. 428/2001 Sb. Dle vyhlášky činí spotřeba vody 56 m^3 na osobu a rok. Z toho spotřeba teplé vody tvoří cca 30 % a pro náš případ čtyřčlenné domácnosti je tedy výsledkem spotřeba cca 65 m^3 teplé vody za rok. Teplá voda se dle normy připravuje na teplotu $65 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 3-14.: Odběr TUV

Pro potřeby modelu v Simulinku je třeba určit velikost odebírané energie v čase (výkon). Celkovou energii odpovídající odběru TUV za jeden den určíme jako:

$$Q_{TUV} = \frac{V_{TUV} \cdot \rho \cdot c_V \cdot \Delta T}{365} = 48,38 \text{ MJ} \quad (10)$$

- kde
- V_{TUV} je objem TUV spotřebované za rok (l)
 - ρ je hustota vody ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
 - c_V je měrná tepelná kapacita vody ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 - ΔT je teplota vody ($^{\circ}\text{C}$)

Za hladinu nulové energie uvažujeme 0°C stejně jako v celém modelu. Lineární aproximaci křivky odběru odpovídají hodnoty spotřebované energie:

- Od 0 do 5 hodin se spotřebuje 0 % energie
- Od 5 do 17 hodiny se spotřebuje 35 % energie
- Od 17 do 20 hodin se spotřebuje 50 % energie
- Od 20 do 24 hodin se spotřebuje 15 % energie

Výkon odebíraný z bojleru se pro potřeby modelu tedy spočte jako:

$$P = \frac{Q_{TUV} \cdot k_1}{k_2 \cdot 3600 \cdot 100} \quad (11)$$

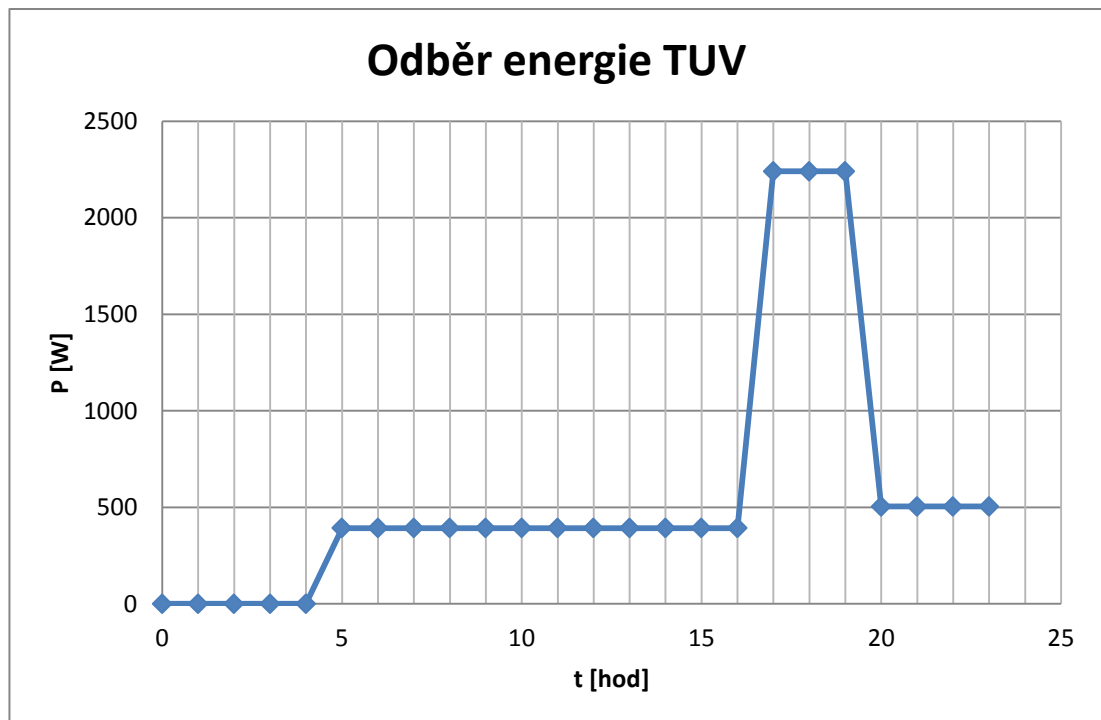
kde Q_{TUV} je celková energie odebraná za den (J)

k_1 je podíl odebrané energie v daném časovém pásmu (%)

k_2 je počet hodin v časovém pásmu (hod)

Pro jednotlivé časové úseky potom odebíraný výkon odpovídá hodnotám:

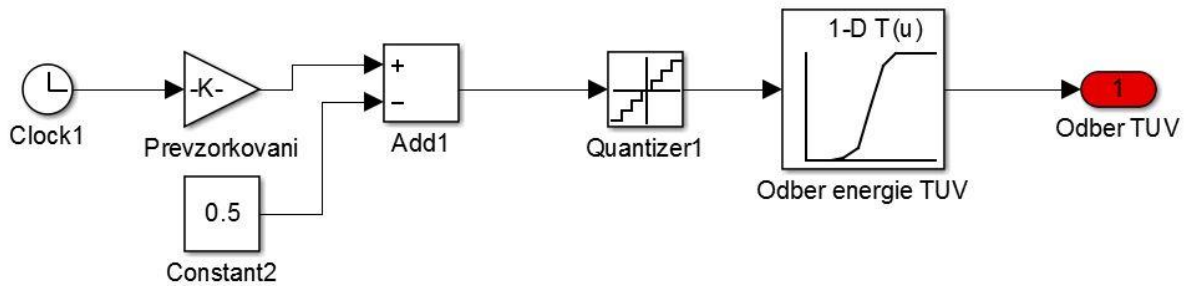
- Od 0 do 5 hodin 0 W
- Od 5 do 17 hodiny 392 W
- Od 17 do 20 hodin 2240 W
- Od 20 do 24 hodin 504 W



Obr. 3-15.:Odběr energie TUV

V Simulinku je odběr TUV reprezentován blokem „Odber TUV“. Blok obsahuje lo-
okup tabulku jejímž vstupem je aktuální čas v minutách. Základní jednotkou času v simulaci

je sekunda a tak musí být výstup z hodin „Clock1“ převzorkován (vydělen 60) a kvantován na celá čísla. Konstanta 0,5 se odečítá pro správnou synchronizaci signálu. Lookup tabulka načítá hodnoty z předpřipraveného souboru programu excel příslušného měsíce. Např.: „leden.xls“.

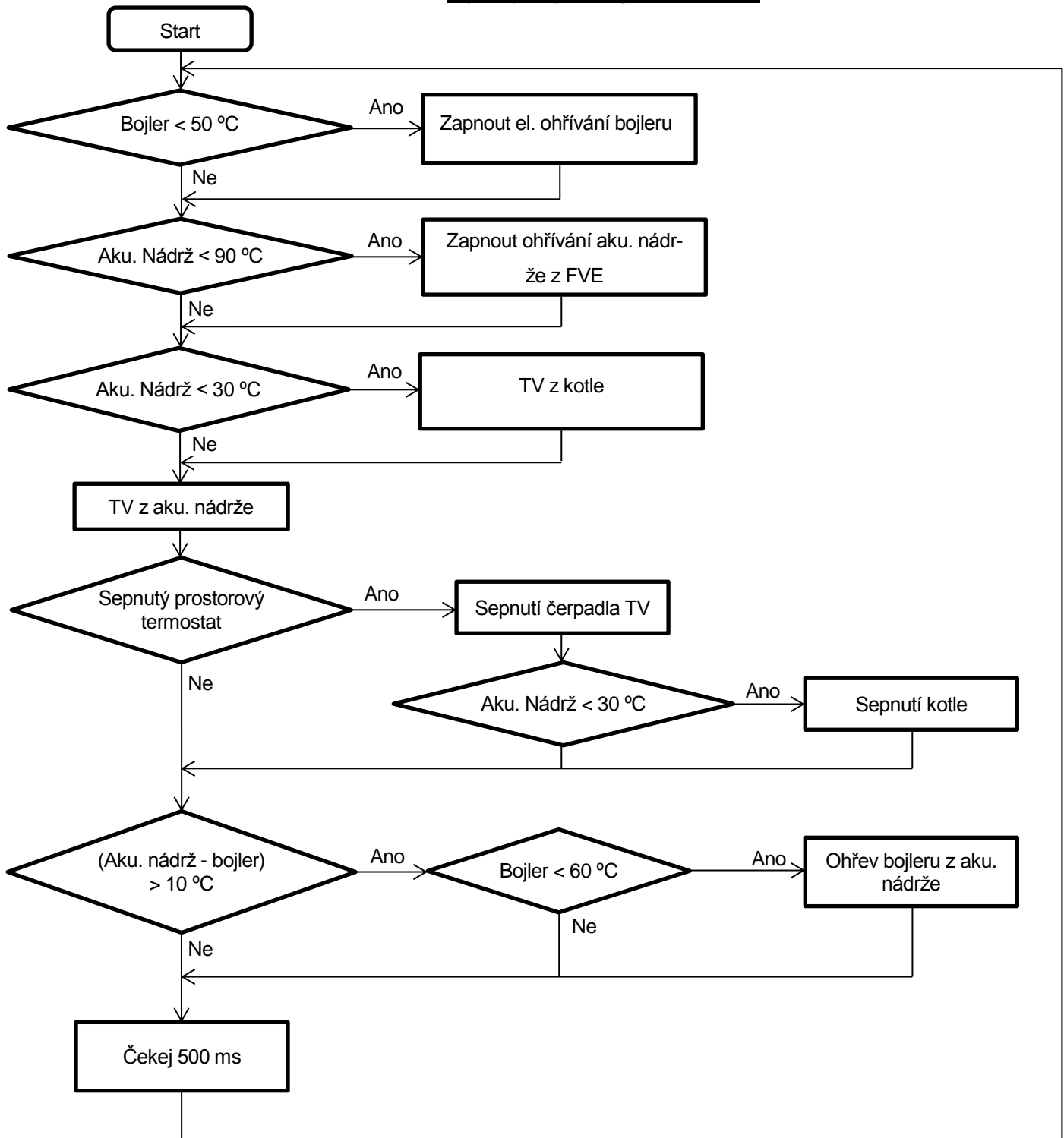


Obr. 3-16: Blok - "Odber TUV"

3.4 Model řízení

Subsystem „Řízení“ obsahuje řídicí algoritmus, který reaguje na vstupy z modelu tepelné soustavy (Prostorový termostat, Teplota vody AKU a Teplota vody bojler) a vstup Aktuální výkon FVE, který představuje okamžitý výkon vyráběný FVE. Výstupní hodnoty (Řízení čerpadla TV, Řízení AKUxkotel, Řízení kotle, Řízení el, ohřívání AKU z FVE, Regulace ohřevu TUV z AKU) jsou použity jako nové hodnoty do modelu tepelné soustavy. Řízení je tedy prováděno v uzavřené smyčce. V Simulinku je model tvořen pomocí logických prvků a logických operátorů. Funkce je zřejmá z vývojového diagramu na následující straně.

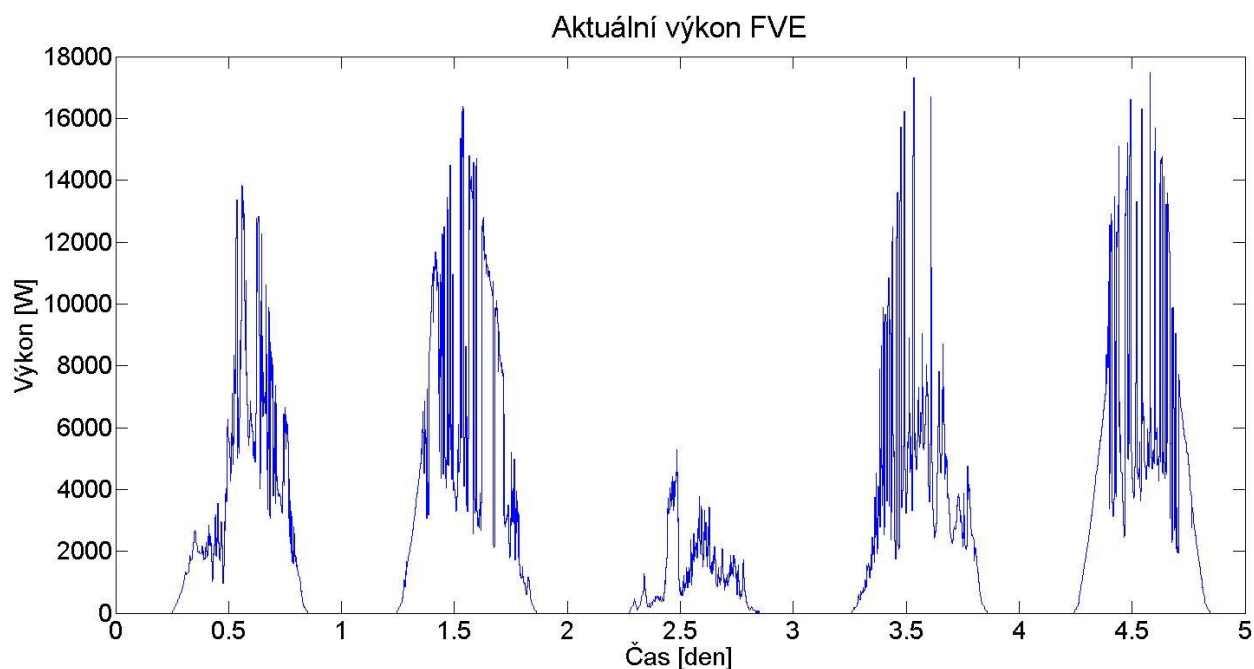
Vývojový diagram řízení



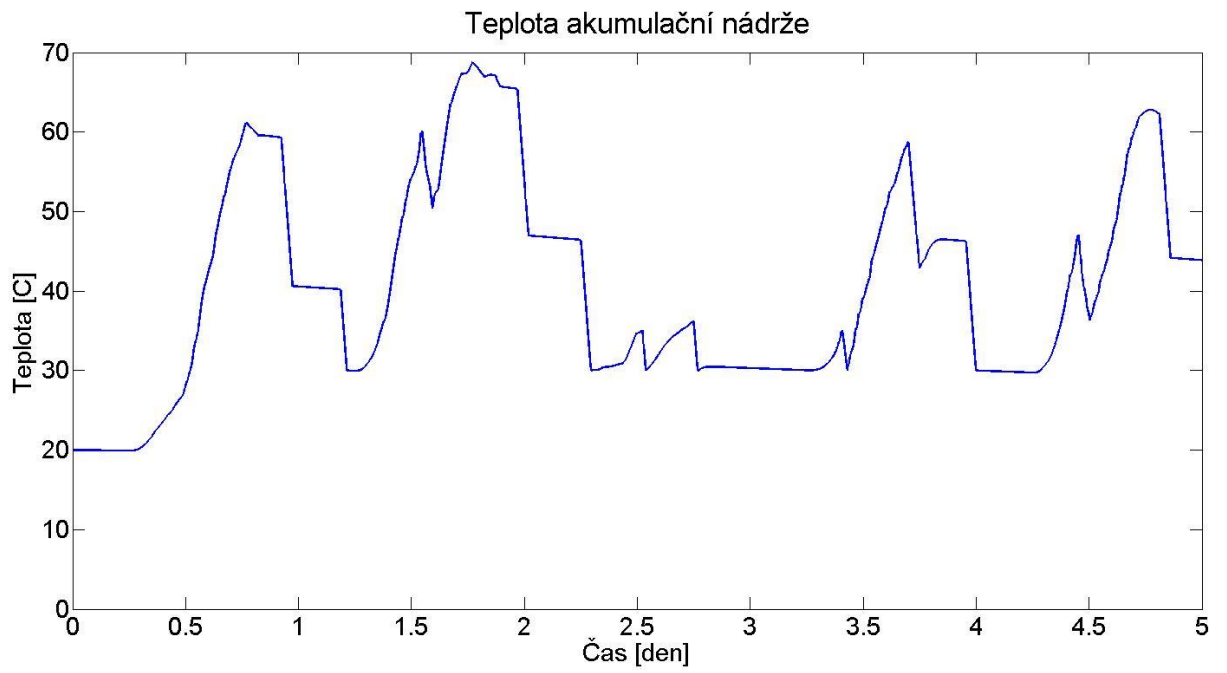
3.5 Výsledky simulací

Výsledkem simulací jsou časové průběhy veličin v modelovaném objektu. Na výsledcích je patrný vliv vnějších podmínek, tedy venkovní teploty a intenzity slunečního záření. Nejdříve si zobrazíme výsledky z průběhu prvních pěti dnů měsíce května pro názornou ukázkou funkce modelu a zásahu regulačních prvků.

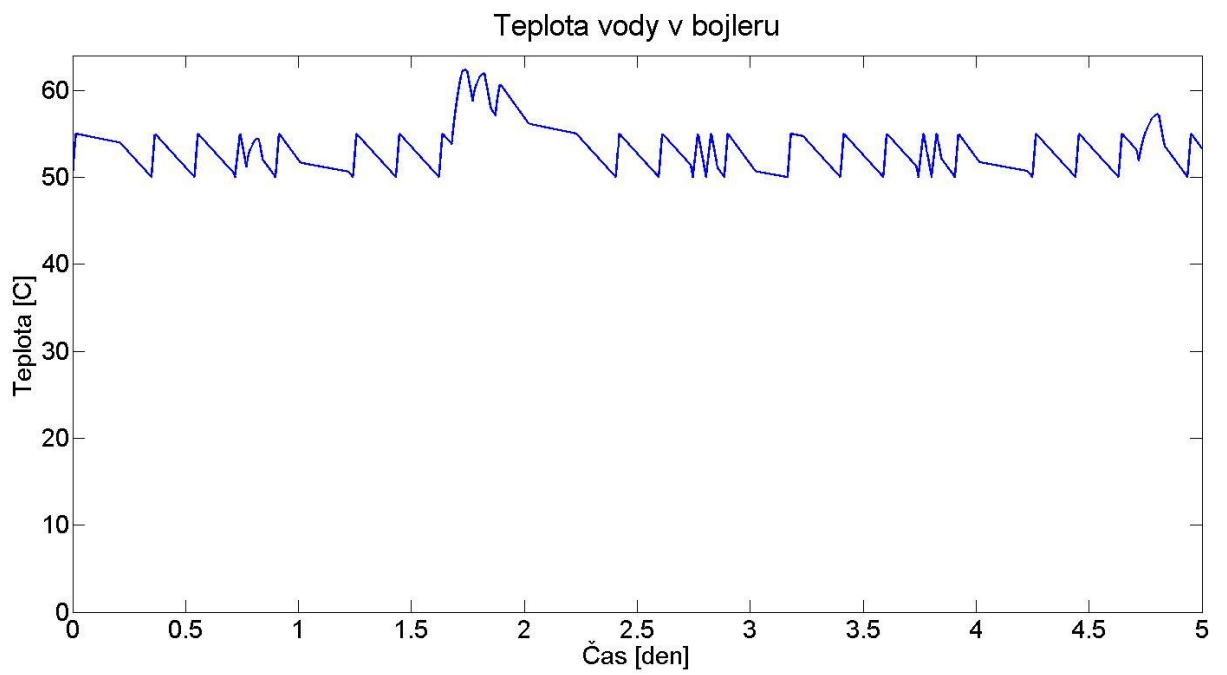
Na následujících grafech je dobře patrná provázanost jednotlivých hodnot v modelu. Na obrázcích (3 – 18) a (3 – 17) je možné pozorovat integraci energie z fotovoltaické elektrárny do akumulární nádrže. Květen byl pro názornost vybrán, jako měsíc kdy je objekt částečně vytápěn pomocí energie z FVE a z peletového kotle. Zajímavé je také porovnání grafů teploty akumulární nádrže, výkonu kotle a řízení vytápění z kotle, nebo z akumulární nádrže (obr. 3 – 23). Na grafu teploty místnosti je dobře patrný vliv venkovní teploty na velikost tepelných ztrát a tím na rychlost poklesu vnitřní teploty.



Obr. 3-17: Květen - výkon FVE

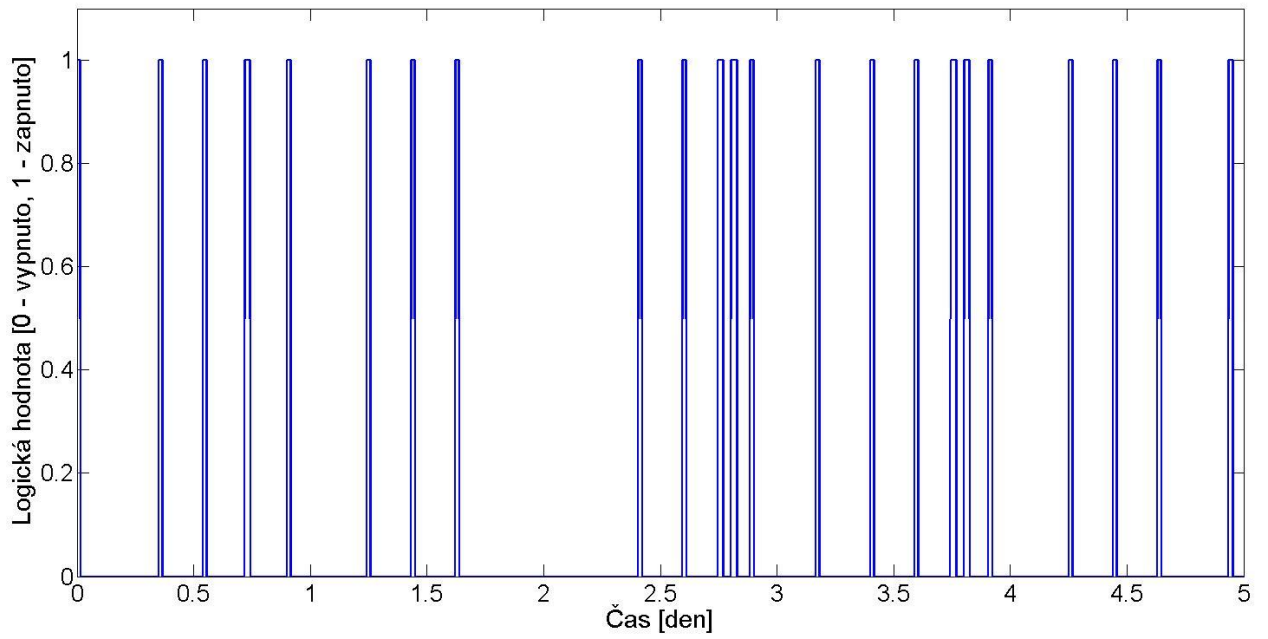


Obr. 3-18: Květen - teplota v akumulční nádrži



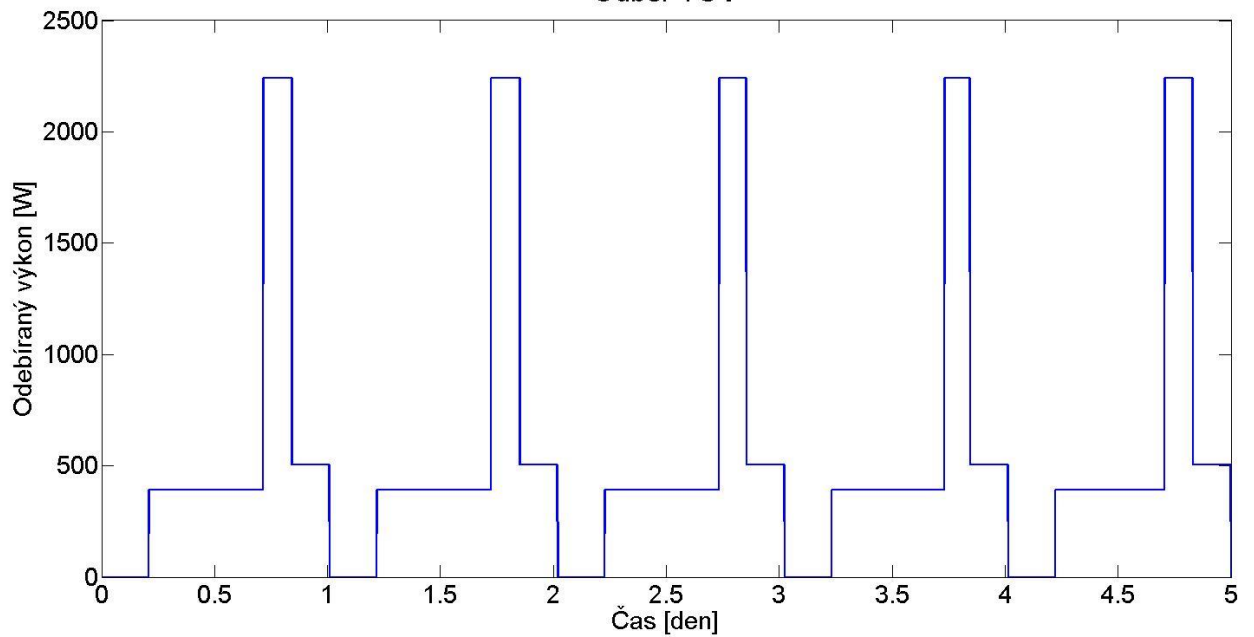
Obr. 3-19: Květen - teplota vody bojler

Řízení elektrického ohřívání bojleru

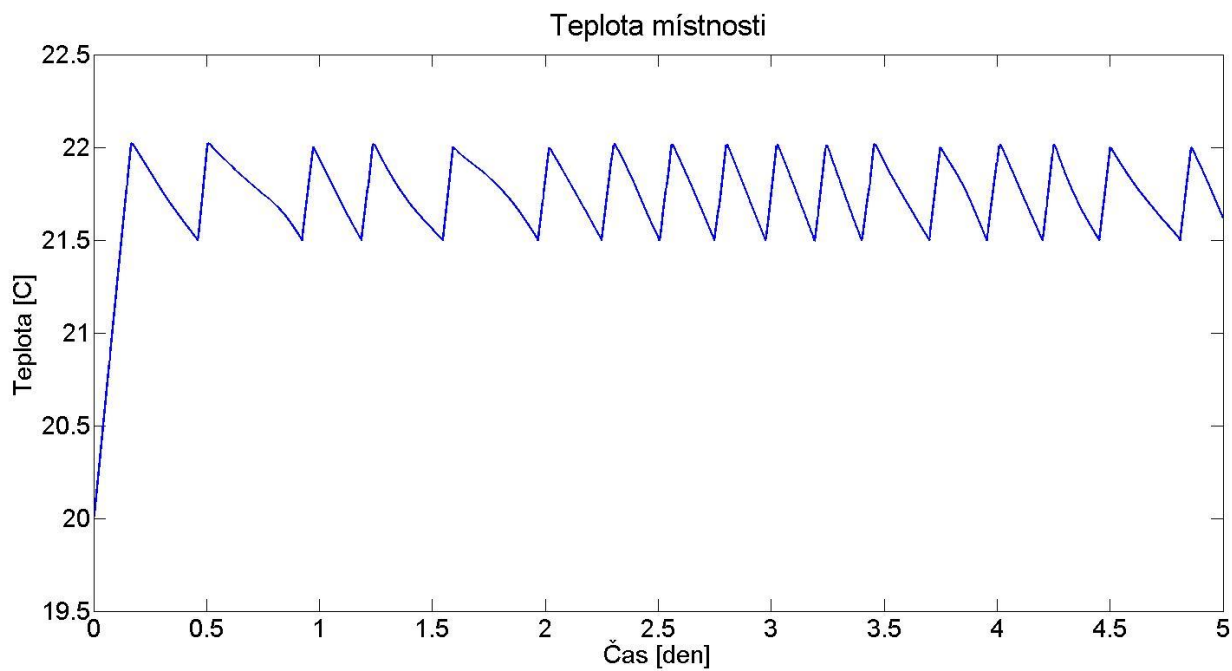


Obr. 3-20: Květen - řízení elektrického ohřívání bojleru

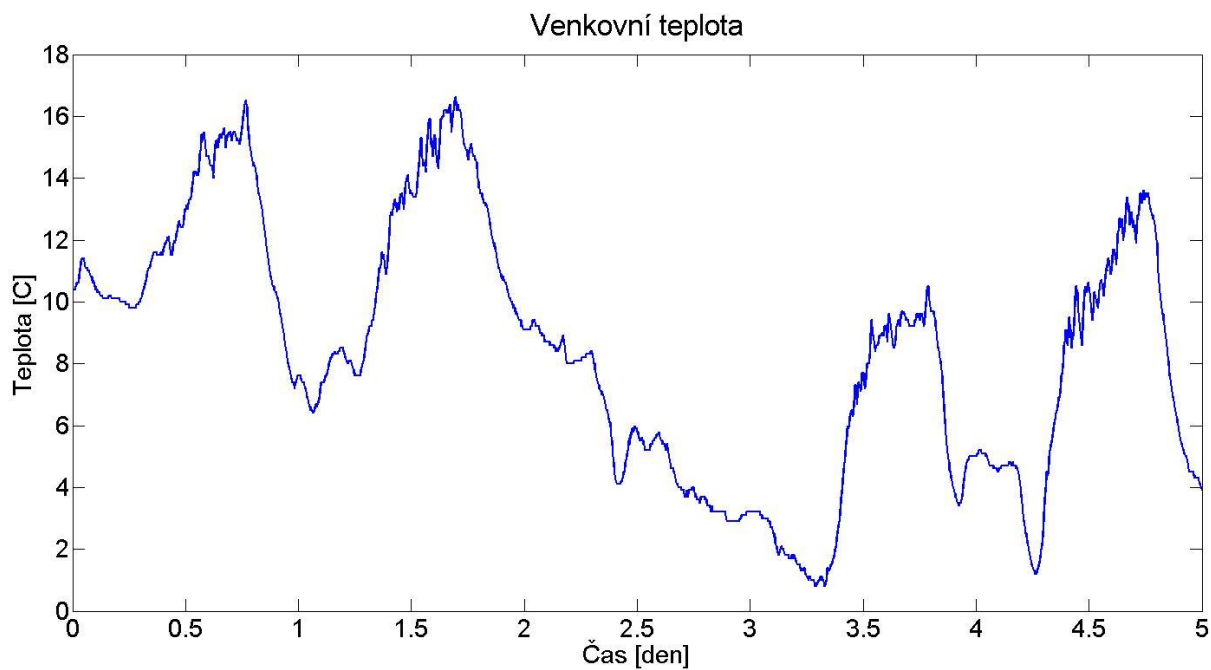
Odběr TUV



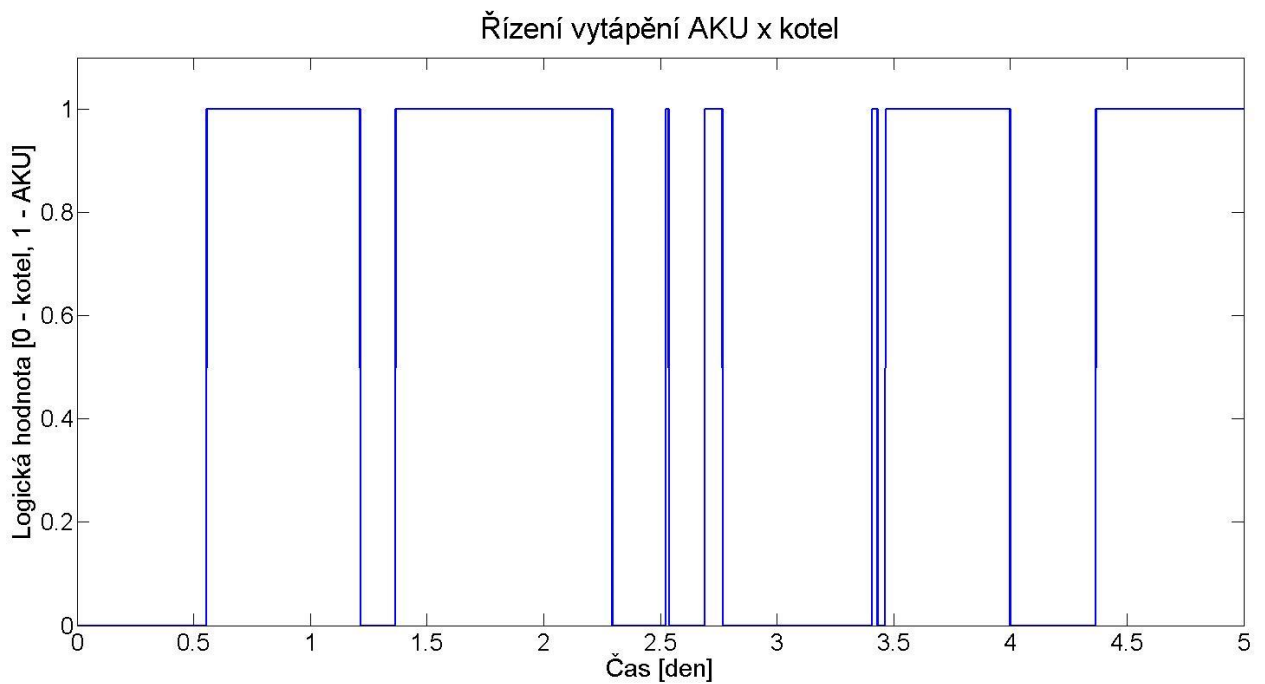
Obr. 3-21: Květen - odběr TUV z bojleru



Obr. 3-22: Květen - teplota místnosti



Obr. 3-23: Květen - venkovní teplota



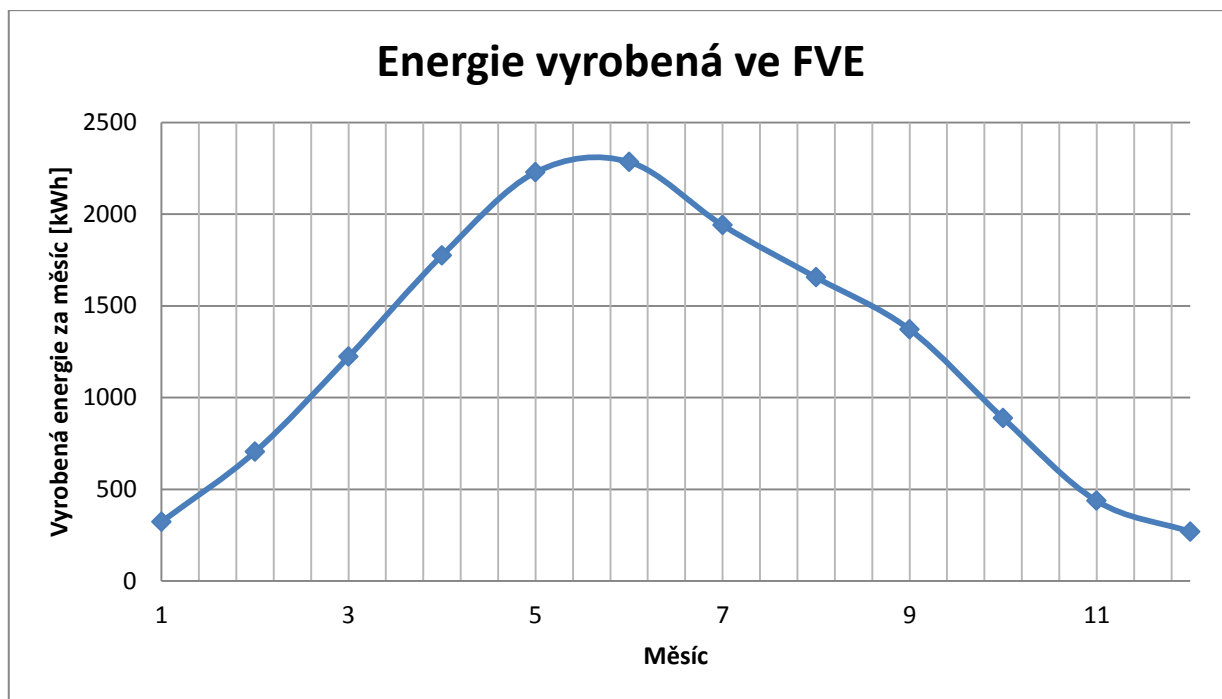
Obr. 3-24: Květen - řízení AKU x kotel

3.6 Interpretace výsledků

Následující grafy a tabulky představují matematicky získané údaje z modelu rodinného domu. Celková energie vyrobená FVE elektrárnou během celého roku je rovna 15380 kWh. Nejvíce energie se přirozeně vyrobí během letních měsíců a nejméně během zimních, kdy je délka dne menší, slunce je níže nad obzorem a vlivem větší tloušťky atmosféry, kterou záření prochází (Air Mass) je menší i intenzita slunečního záření.

měsíc	Energie vyrobená FVE [kWh]
leden	322
únor	704
březen	1222
duben	1775
květen	2228
červen	2285
červenec	1940
srpen	1655
září	1371
říjen	888
listopad	437
prosinec	269
celková	15380

Tabulka 3-2: Energie vyrobená FVE

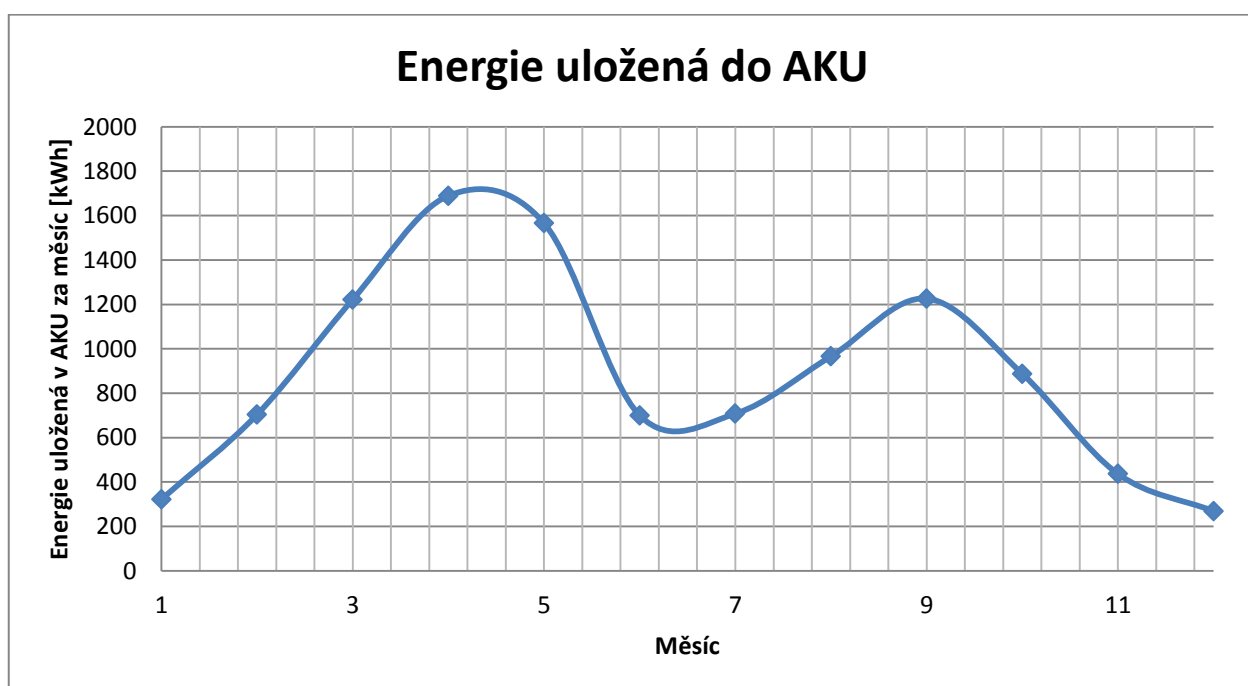


Obr. 3-25: Energie vyrobená v FVE

Energie vyrobená FVE je přednostně ukládána do akumulční nádrže. Omezení tvoří množství vyrobené energie a kapacita zásobníku. Maximální teplota vody v akumulční nádrži je 90 °C. Během zimních měsíců je veškerá energie vyrobená ve fotovoltaické elektrárně spotřebována na vytápění a ohřev TUV, během letních měsíců mimo topnou sezónu se část energie nespotřebuje a je spotřebována jako elektřina v domě, nebo prodána do distribuční sítě. Energie uložená během roku do akumulční nádrže je rovna 10439 kWh, množství prodané a spotřebované elektřiny je rovno 4942 kWh. Přibližně 2/3 energie z FVE je tedy přeměněno na teplo v akumulční nádrži.

měsíc	Energie uložená do AKU [kWh]
leden	322
únor	704
březen	1222
duben	1689
květen	1566
červen	700
červenec	708
srpen	966
září	1226
říjen	888
listopad	437
prosinec	269
celková	10439

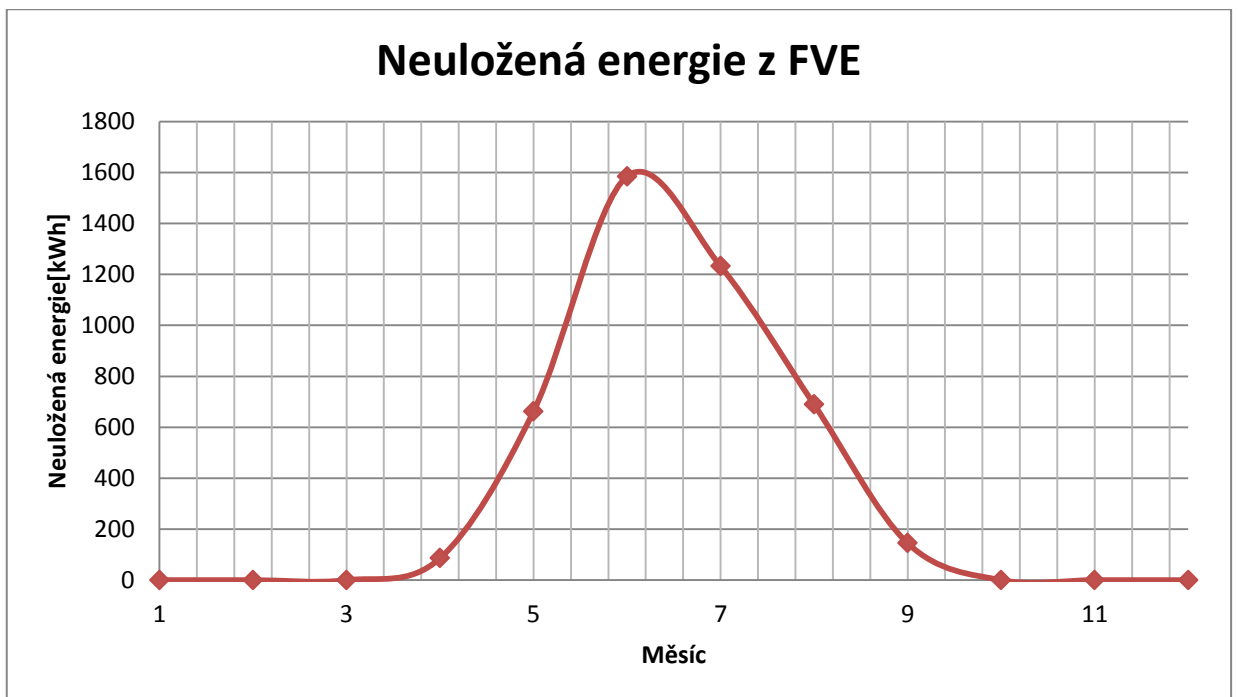
Tabulka 3-3: Energie uložená do AKU



Obr. 3-26: Energie uložená do AKU

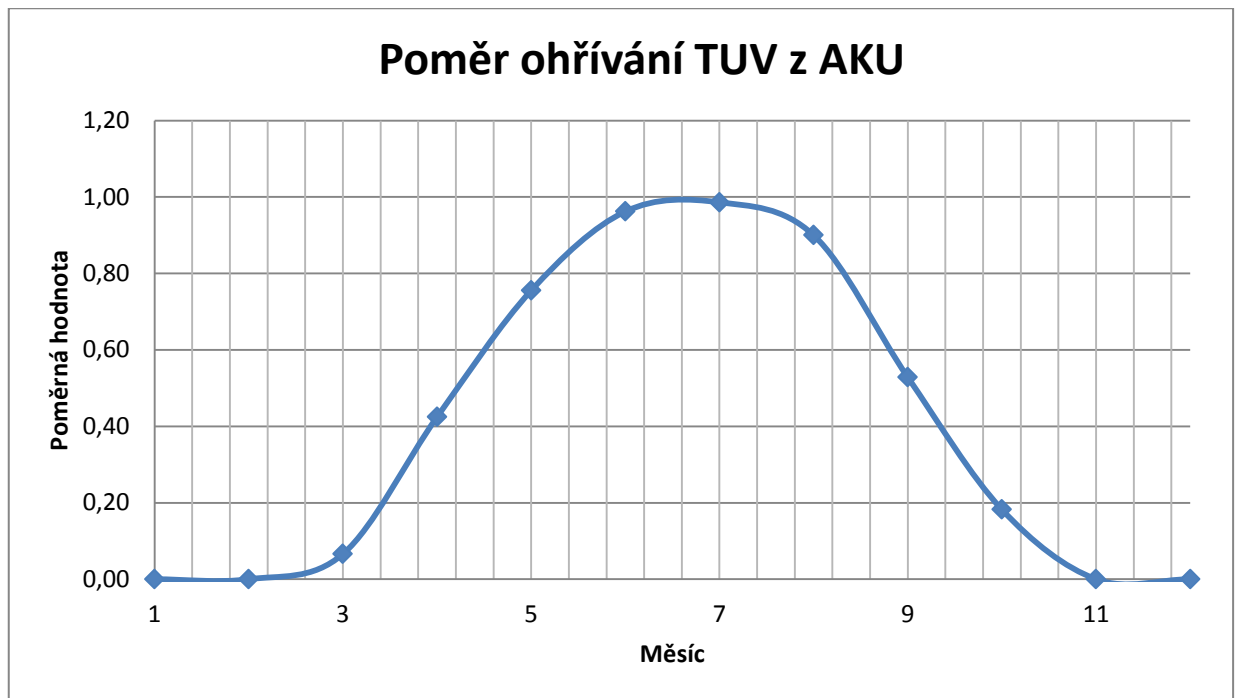
měsíc	Neuložená energie z FVE [kWh]
leden	0
únor	0
březen	0
duben	86
květen	662
červen	1585
červenec	1232
srpen	1232
září	145
říjen	0
listopad	0
prosinec	0
celková	4942

Tabulka 3-4: Neuložená energie z FVE



Obr. 3-27: Neuložená energie z FVE

V bojleru je voda ohřívána dvěma způsoby, jednak elektrickou patronou s topnou spirálou a jednak pomocí výměníku z akumulční nádrže. To je možné pouze tehdy, pokud je v nádrži dostatečné množství energie. To znamená, že teplota v akumulční nádrži musí být vyšší, než je teplota v bojleru. K tomu dochází zejména v letních měsících mimo topnou sezonu a s vysokým výkonem FVE. Během zimních měsíců je bojler ohříván téměř výhradně pomocí elektřiny ze sítě.

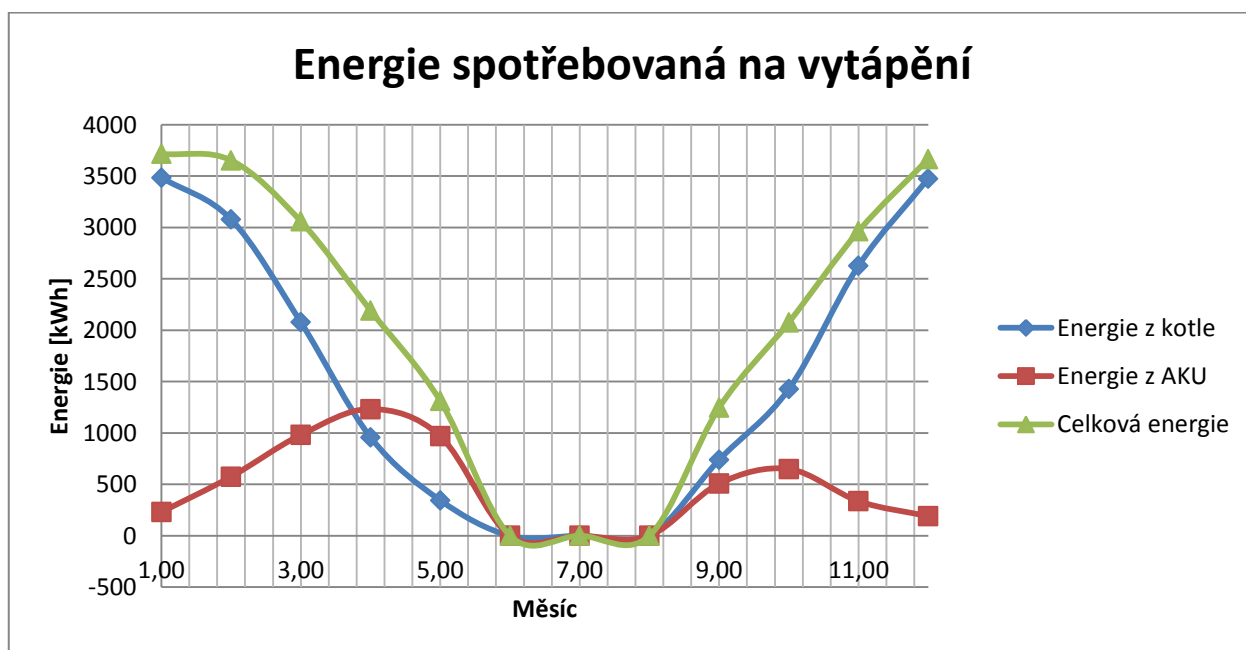


Obr. 3-28:Poměr ohřívání TUV z AKU

Celková roční spotřeba energie na vytápění je rovna 23900 kWh. Z toho přibližně 76 % je pokryto pomocí peletového kotle a jen 24 % z energie z FVE. Důvod je zřejmý při pohledu na obrázky (3-30) a (3-25). Je to způsobeno nesoudobostí výroby elektřiny z FVE a spotřeby energie na vytápění. V letních měsících můžeme pozorovat velký přebytek výroby nad spotřebou a v zimních naopak velký nedostatek výroby z FVE, který musí být krytý pomocí kotle. Možností by bylo zvětšit výkon FVE, což by již však zřejmě nebylo rentabilní.

Energie spotřebovaná na vytápění			
měsíc	Celková energie [kWh]	Energie z kotle [kWh]	Energie z AKU [kWh]
leden	3715	3484	231
únor	3653	3078	575
březen	3060	2078	982
duben	2191	958	1233
květen	1313	345	968
červen	0	0	0
červenec	0	0	0
srpen	0	0	0
září	1246	739	507
říjen	2077	1427	650
listopad	2964	2627	337
prosinec	3666	3475	190
celková	23884	18211	5673

Tabulka 3-5: Energie spotřebovaná na vytápění



Obr. 3-29: Energie spotřebovaná na vytápění

4 Implementace modelu a řízení do hardwaru

Při vývoji řídicího systému bylo postupováno metodou Model Based Design. Posledním krokem diplomové práce je tedy tzv. „Processor in the Loop test“. Řídicí program jsem napsal v prostředí Visual Studio Express v jazyce C#. Řídicí algoritmus je totožný, jako na straně 44. Pro ověření správnosti napsaného programu bylo třeba přepsat do jazyka C# i celý zbytek modelu vytvořeného v Simulinku a nahrát ho do EMX modulu.

4.1 Popis programu

Model jsem přepsal a dodržel jsem stejnou strukturu tím, že každý subsystém modelu v programu představuje samostatnou metodu, která je volána jejími vstupními hodnotami (stejný princip jako v modelu). Program začíná inicializací, která v Simulinku probíhala pomocí skriptu s názvem *init.m*. Podobně v programu byla provedena inicializace potřebných proměnných a konstant, jejíž ukázka následuje:

```
#region GLOBAL VARIABLES AND CONSTANTS
// merna tepelna kapacita vody
public const double cv = 4180;
#region POMOCNE PROMENNE
public static string[] parts = null; // promenna pro ulozeni dat z SD
public static int Time = 0; // cas simulace
public static bool stav = false; // false...vypnuto... stav termostatu
#endregion
#region MODELOVE VSTUPY
// MODELOVE VSTUPY
// Odber TUV z bojleru
public static double OdberBojler = 0;
// Venkovni teplota
public static double TempAmbient = 0;
// Aktualni vykon FVE
public static double PowerFVE = 0;
#endregion
...
```

Následuje metoda *main*, ve které bylo nejprve provedeno čtení vstupních dat z SD karty. Jelikož model obsahuje velké množství dat – průběhy venkovních teplot, odběrové diagramy TUV a průběhy výkonu FVE, byla tato data nahrána v PC na SD kartu ve formátu CSV. SD karta byla vložena do slotu, kterým disponuje řídicí deska, na které test běžel.

Vstupní data byla vzorkována po minutě, stejně jako v případě modelu. Test řídicího programu probíhal ve smyčce s virtuálním krokem 1 vteřina. Pro každých 60 po sobě následujících výpočtů byla tedy použita stejná vstupní data z SD karty (stejně jako v Simulinku).

Čtení z SD karty bylo provedeno voláním metody *ReadSD*, která navrácí pole „stringů“ představujících jednotlivé řádky CSV souboru. Zápis na diody je prováděn pouze kvůli orientační signalizaci stavu.

```
public static string[] ReadSD()
    { // cteni z SD karty
        LEDgreen.Write(true);
        sdPS = new PersistentStorage("SD");
        sdPS.MountFileSystem();
        string rootDirectory = VolumeInfo.GetVolumes()[0].RootDirectory;
        FileStream fHandle = new FileStream(rootDirectory + @"\leden.csv", FileMode.Open, FileAccess.Read);
        byte[] data = new byte[fHandle.Length];
        fHandle.Read(data, 0, data.Length);
        fHandle.Close();
        sdPS.UnmountFileSystem();
        LEDgreen.Write(false);
        LEDred.Write(false);
        string s = string.Empty;
        for (int a = 0; a < data.Length; ++a)
            s += (char)data[a];
        string[] parts = s.Split('\r');
        LEDred.Write(true);
        return parts;
    }
```

V metodě *main* poté následuje průběh výpočtu samotného modelu. Ve *for cyklu*, který má počet opakování totožný s délkou simulace ve vteřinách se volají metody odpovídající Simulinkovým subsystémům. Nejprve se pomocí metod *ReadFVE*, *ReadOutTemp* a *ReadTUV* načtou hodnoty modelových vstupů odpovídající danému času simulace. Následně se uloží mezivýsledek přechodícího kroku simulace do pomocných proměnných např.:

```
TempBojlerplus1 = TempBojler;
```

Je tomu tak proto, aby vstupními hodnotami do metod byly vždy hodnoty z předchozího cyklu. Poté se volají metody *ModelTeplneSoustavy* a *Rizeni*, ve kterých probíhá výpočet hodnot dalšího kroku simulace. Nakonec cyklu probíhá uložení hodnot na SD kartu do formátu CSV, pomocí volání metody *WriteToSD*, se vzorkovacím virtuálním časem 1 minuta.

Následuje zdrojový kód *for cyklu*:

```
for (Time = 0; Time <= pocetRadku*60; Time++)
    {
        LEDred.Write(svit);
        svit = !svit;
        int radek = Time/60;
        // Načtení hodnot modelových vstupů
        PowerFVE = ReadFVE(radek);
```



```

TempAmbient = ReadOutTemp(radek);
OdberBojler = ReadTUV(radek);

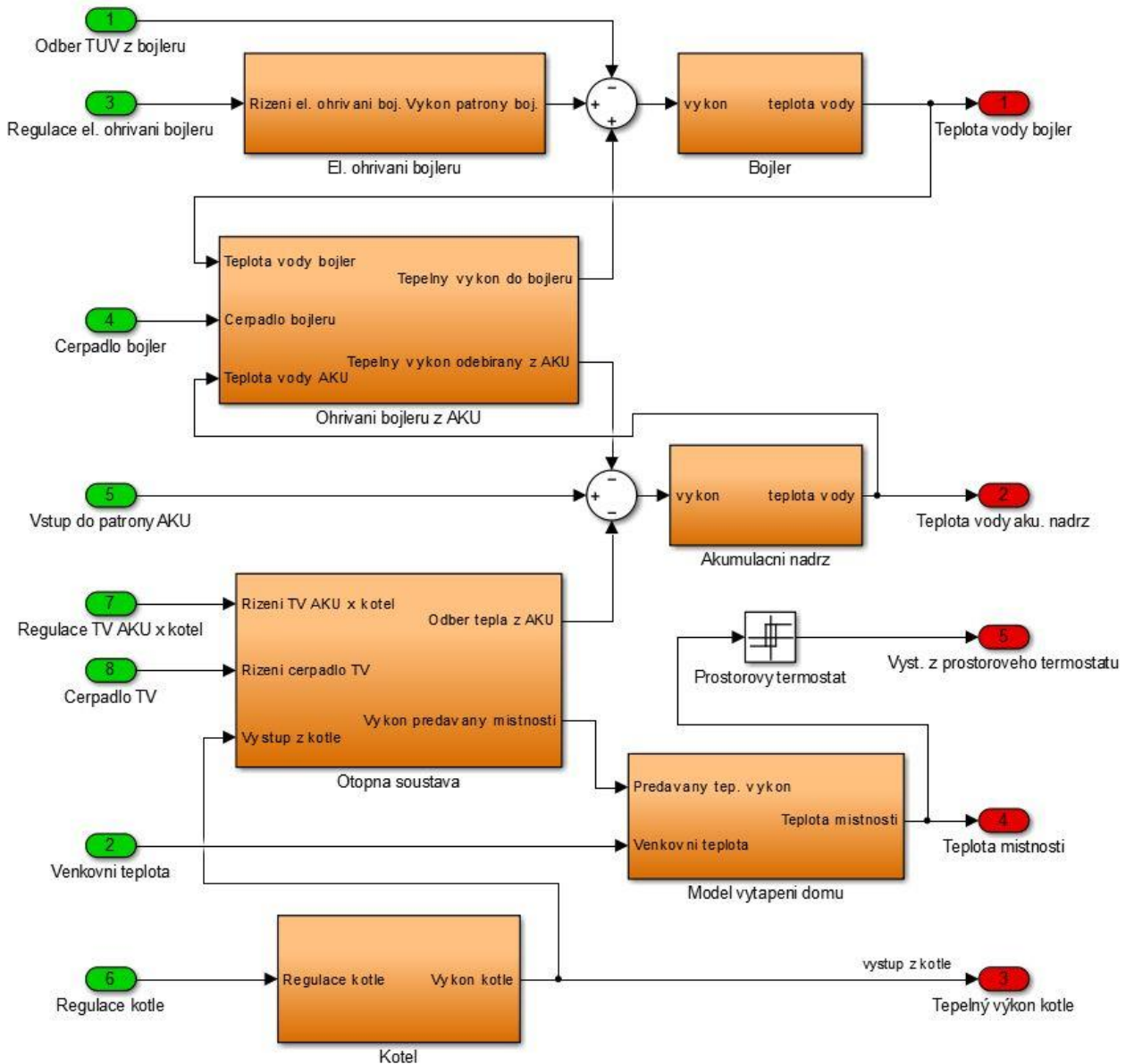
TempBojlerplus1 = TempBojler;
TempAkuplus1 = TempAku;
PowerKotelplus1 = PowerKotel;
TempRoomplus1 = TempRoom;
TermostatOutplus1 = TermostatOut;

double[] VystupModelTS = ModelTepelneSoustavy(OdberBojler, TempAmbient, RegBojler, RegPumpBojler, PowerAKU, RegKotel, RegAKUxKotel, PumpTV);
TempBojler = VystupModelTS[0];
TempAku = VystupModelTS[1];
PowerKotel = VystupModelTS[2];
TempRoom = VystupModelTS[3];
TermostatOut = VystupModelTS[4];

double[] VystupRizeni = Rizeni(PowerFVE, TempAkuplus1, TempBojlerplus1, TermostatOutplus1);
RegBojler = VystupRizeni[0];
RegPumpBojler = VystupRizeni[1];
PowerAKU = VystupRizeni[2];
RegKotel = VystupRizeni[3];
RegAKUxKotel = VystupRizeni[4];
PumpTV = VystupRizeni[5];
if (Time%60 ==0)
WriteToSD(TempBojler, TempAku, PowerKotel, TempRoom, TermostatOut);

```

Metody *ModelTepelneSoustavy* a *Rizeni*, obsahují podobnou strukturu jako jim odpovídající subsystémy v Simulinku. Každý další subsystém je realizován voláním další metody. Pro lepší představu následuje obrázek modelu a jemu odpovídajícímu kódu:



Obr. 4-1: Matlab - Model tepelné soustavy

Zdrojový kód:

```
public static double[] ModelTepelneSoustavy(double OdberBojler, double TempAmbient,
double RegBojler, double RegPumpBojler, double PowerAKU, double RegKotel, double RegAKUx-
Kotel, double PumpTV)
{
    double VykonPatronyBoj = ElOhrivaniBojleru(RegBojler);
    double TepelnyVykonDoBojleru = OhrivaniBojleruZAKU(TempAku, TempBojler, Reg-
PumpBojler)[1];
    double TepenyVykonOdebiranyZAKU = OhrivaniBojleruZAKU(TempAku, TempBojler,
RegPumpBojler)[0];
```

```

        double OdberTeplaZAKU = OtopnaSoustava(RegAKUxKotel, PumpTV, PowerKotel)[0];
        double VykonPredavanyMistnosti = OtopnaSoustava(RegAKUxKotel, PumpTV, Power-
Kotel)[1];
        PowerKotel = Kotel(RegKotel);
        TermostatOut = Termostat(TempRoom);
        TempRoom = ModelVytapeniDomu(TempAmbient, VykonPredavanyMistnosti);
        TempAku = AkumulacniNadrz((PowerAKU - TepenyVykonOdebiranyZAKU - OdberTepla-
ZAKU));
        TempBojler = Bojler(VykonPatronyBoj - OdberBojler + TepelnyVykonDoBojleru);
        double[] n = { TempBojler, TempAku, PowerKotel, TempRoom, TermostatOut, };
        return n;
    }

```

V metodách volaných metodou *ModelTepelneSoustavy* již probíhá samotý výpočet dle matematického popisu. Například kód metody *Bojler* odpovídá obrázku 3-6:

```

public static double Bojler(double VstupdoBOJ)
{
    double n = 0;
    bojlerInt = bojlerInt + VstupdoBOJ - (bojlerChladnuti * (TempBojler - bojler-
TempAmb));
    TempBojler = bojlerInt / (bojlerHmotnost * cv);
    n = TempBojler;
    return n;
}

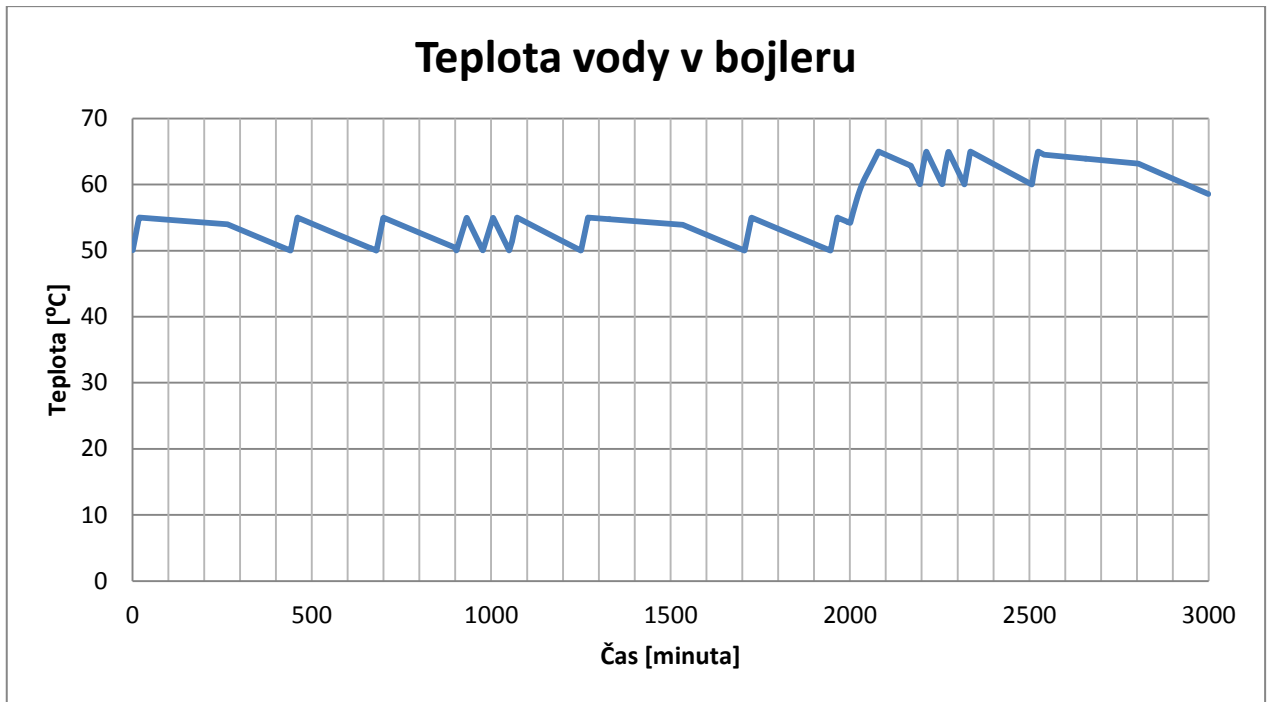
```

Proměnná *bojlerInt* odpovídá hodnotě intergrátoru v bojleru, její hodnota musí být uchována do dalšího cyklu.

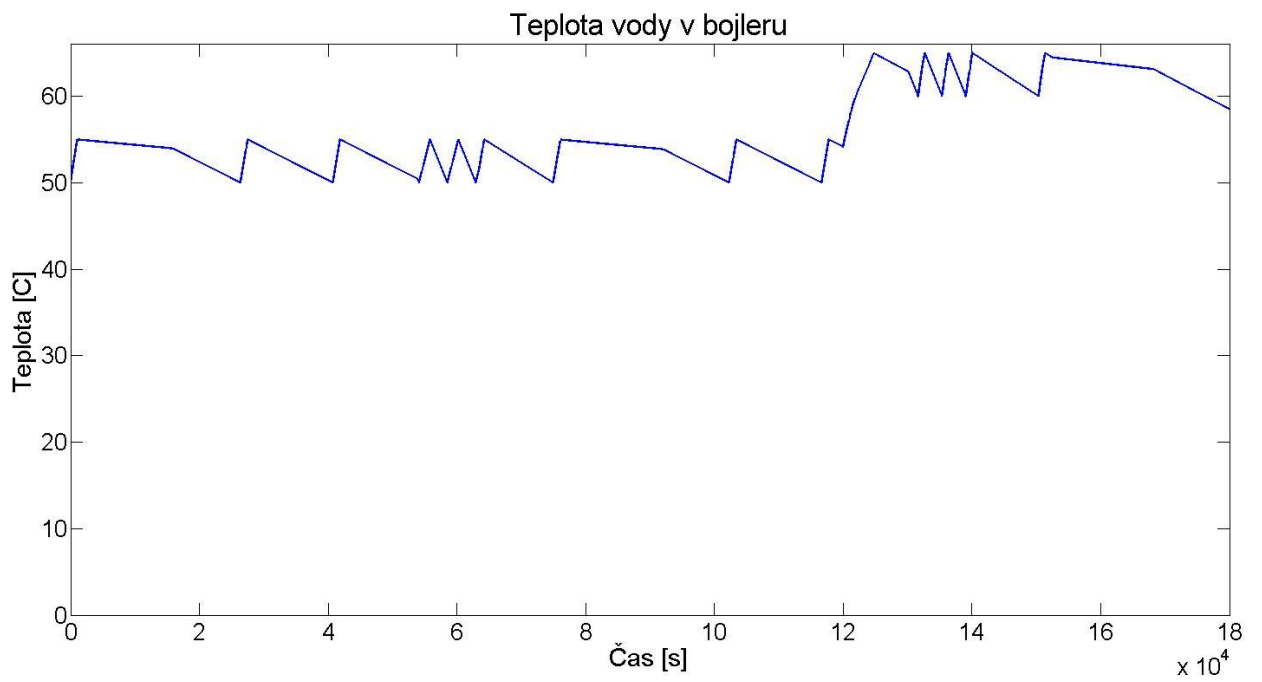
Stejný princip jako v metodě *ModelTepelneSoustavy* je použit v metodě *Řízení*. Celý zdrojový kód je uložen na přiloženém CD na konci diplomové práce, kde jsou samozřejmě i popsány jednotlivé proměnné a kód je přehledně členěn do jednotlivých „regionů“. Na CD je rovněž uložen celý model v programu MATLAB/Simulink

4.2 Test

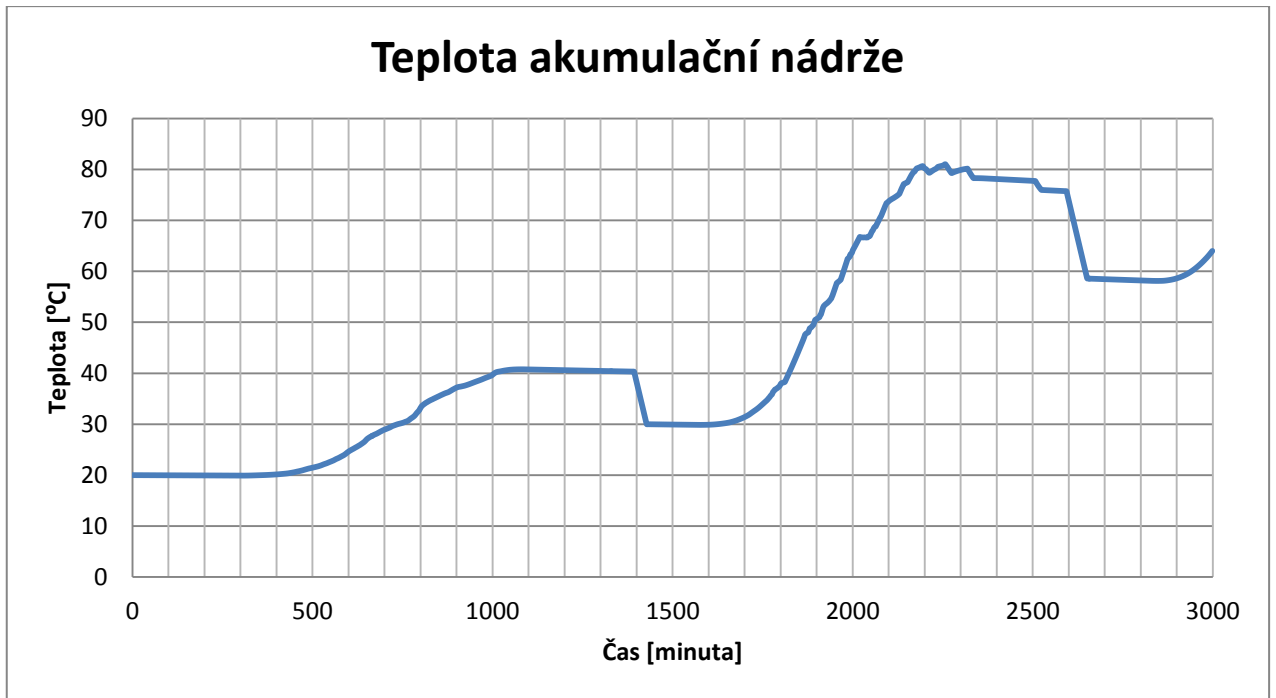
Kontrola správnosti spočívá v porovnání dat ze Simulinku a dat nahraných na SD kartu. Náhodně byla vybrána data odpovídající prvním 3000 minutám začátku srpna. Jak je možné vidět na následujících obrázcích, data si přesně odpovídají. Data jsem samozřejmě rovněž zkontroloval číselně. Hodnoty jsou naprosto totožné. Z toho plyne, že program napsaný pro řídicí mikroprocesor je totožný s algoritmem navrženým a odzkoušeným v Simulinku.



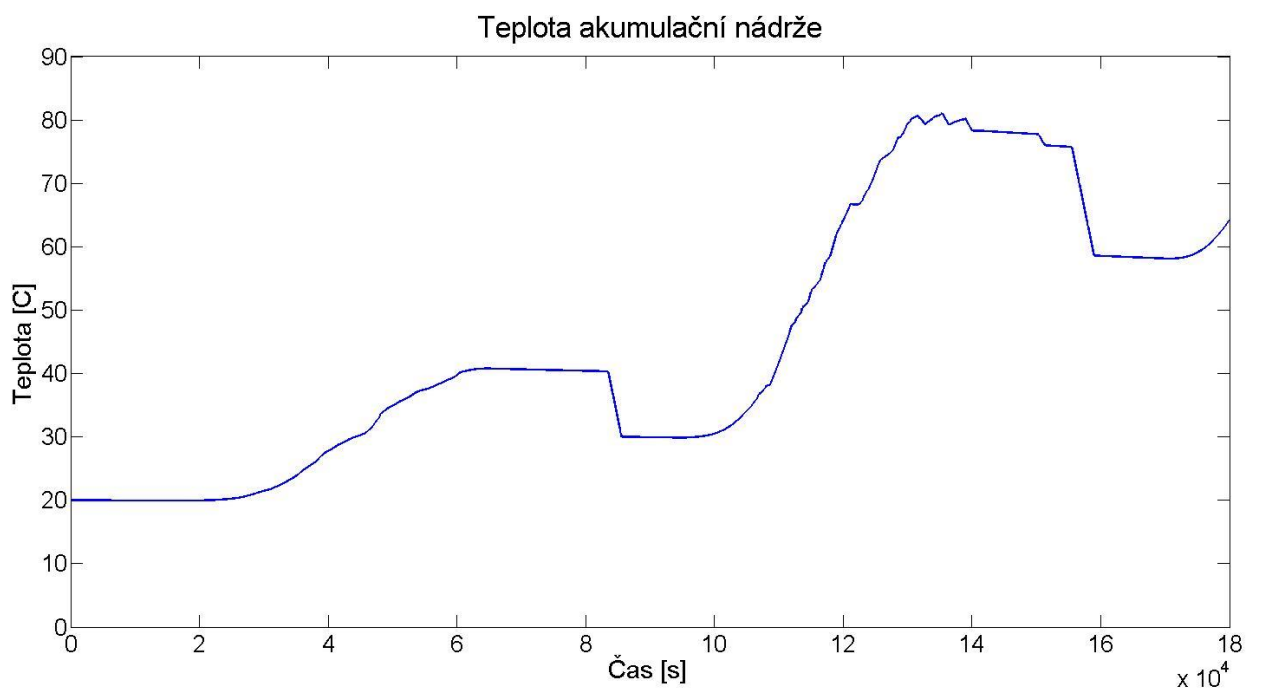
Obr. 4-2: Hardware – TUV



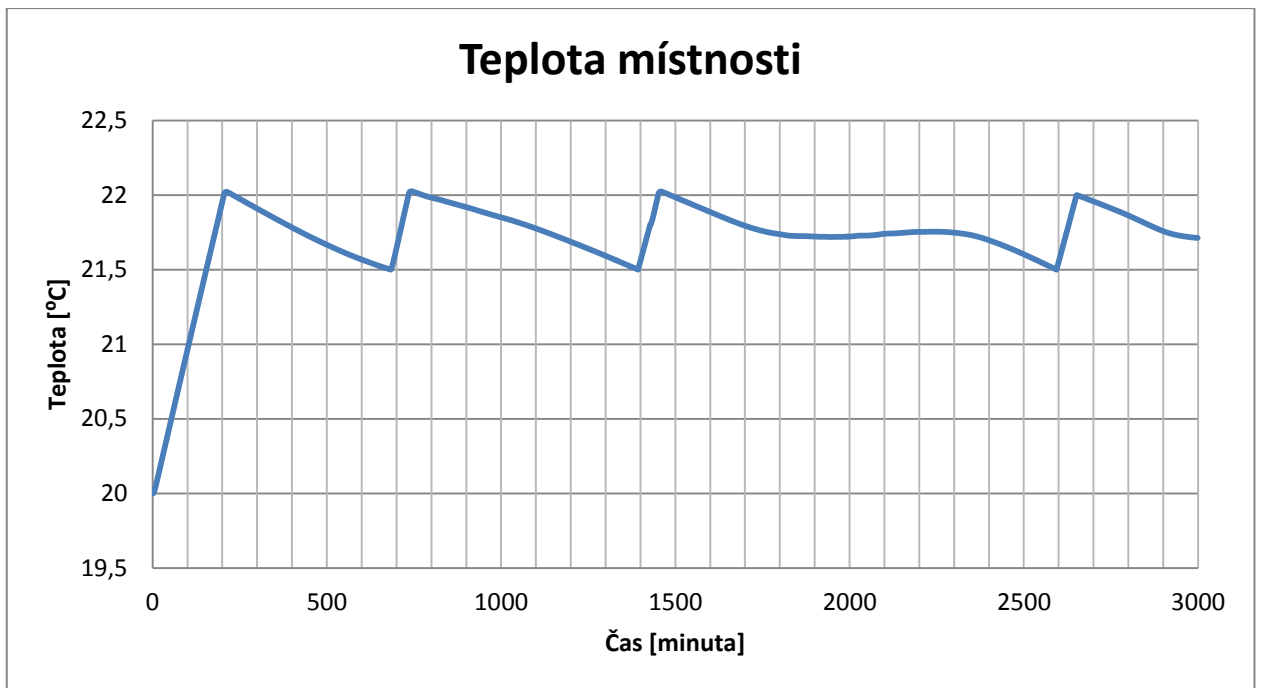
Obr. 4-3: Model - TUV



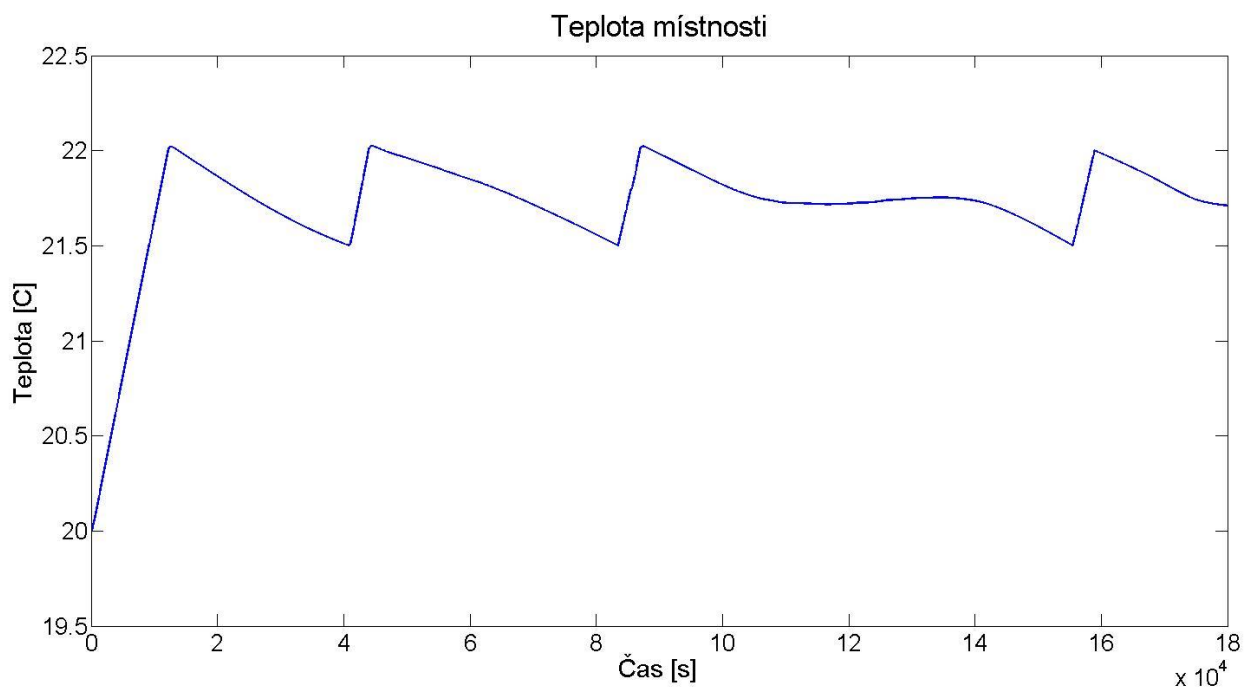
Obr. 4-4: Hardware - Teplota AKU



Obr. 4-5: Model - Teplota AKU



Obr. 4-6: Hardware - Teplota místnosti



Obr. 4-7: Model - Teplota místnosti

5 Závěr

V první části se práce zabývá vytvořením hardwaru pro řídicí systém. Pro tyto účely jsem navrhl a osadil dvě desky plošných spojů. Desky jsem navrhl v prostředí programu Eagle. Desky jsou navrženy jako dvouvrstvé a osazeny v nejvyšší možné míře běžně dostupnými součástkami pro povrchovou montáž (SMD). Základem obou desek plošných spojů je digitální signálový procesor EMX Module. První deska plní převážně funkci řídicí, druhá měřicí. Obě desky jsou vybaveny množstvím vstupně výstupních zařízení jako relé, optočleny, teplotními čidly, slotem na SD kartu a dalšími. Pro komunikaci s měničem fotovoltaické elektrárny bude využíváno rozhraní RS 485. Cílem je zjištění aktuálního elektrického výkonu produkovaného měničem. Komunikace bude probíhat pomocí protokolu ComLynx. Pro komunikaci s AC/DC řízeným měničem pro ohřívání okumulační nádrže je k dispozici CAN sběrnice. Obě desky spolu budou komunikovat po rozhraní ethernet.

V druhé části je provedena identifikace rodinného domu na základě jeho vybavení a základních fyzikálních vlastností. Dle těchto parametrů je vytvořen v prostředí MATLAB/Simulink model domu. Model se skládá ze tří základních částí. Modelu řízení, modelu tepelné soustavy a modelových vstupů. Řízení je navrženo pro maximální využití elektrické energie z fotovoltaické elektrárny pro výrobu tepla v akumulární nádrži pomocí řízeného měniče. Teplo z akumulární nádrže je využíváno pro vytápění domu a doplňkový ohřev teplé užitkové vody. Model tepelné soustavy popisuje základní fyzikální děje probíhající v otopné soustavě domu. Modeluje základní zařízení jako akumulární nádrž, bojler a kotel a vzájemný tok energií mezi otopnou soustavou, domem a fotovoltaickou elektrárnou. Modelové vstupy reprezentují reálné vstupní hodnoty modelu – aktuální výkon FVE, odběr TUV a venkovní teplotu. Vstupy byly získány na základě měření na meteorologické stanici a korigovány na skutečnou polohu domu. Odběr TUV byl získán dle normy ČSN 06 0320.

Poslední částí práce je implementace modelu a řízení do hardwaru. Model i řídicí algoritmus jsem naprogramoval v jazyce C# a otestoval na mikroprocesoru. Data modelových vstupů byla načítána z SD karty, kam byly také ukládány výsledky simulace. Porovnáním výstupů ze Simulinku a z mikroprocesoru byla ověřena správnost napsaného řídicího programu.

Jako další postup práce na řídicím systému navrhuji zajistit prostředek pro měření vlastní okamžité spotřeby elektrické energie pro každou fázi. Absence tohoto měření je hlavním nedostatkem systému. Vlastní spotřeba se velmi obtížně modeluje a bez její

znalosti není možné přesně řídit dům z hlediska co nejnižší spotřeby energie z distribuční sítě. Prozatím je systém optimalizován pro co největší možnou přeměnu energie vyrobené v FVE na tepelnou energii v akumulární nádrži, což byl i požadavek majitele rodinného domu.

6 Seznam použité literatury:

- [1] Příprava teplé vody. [online]. [cit. 2014-03-22]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/~vavrirom/Kurz%20Vytapeni/Priprava%20teple%20vody.pdf>
- [2] PVGIS. EkoWATT [online]. [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://fotovoltaika.ekowatt.cz/pvgis.php>
- [3] LEHMAN, Zdeněk. ČVUT, Fakulta elektrotechnická. *AC/DC měnič výkonu pro tepelné zdroje ve zdravotnictví*. 2014.
- [4] GHI Electronics [online]. 2014 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <https://www.ghielectronics.com/>
- [5] Melzer, Michal. ČVUT, Fakulta elektrotechnická. *Návrh a modelování fotovoltaického systému*. 2014.
- [6] Grid parity [online]. 2014 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Grid_parity
- [7] ČSN 06 0320. Ohřívání užitkové vody - Navrhování a projektování. 1998.
- [8] Accessing Inverter Parameters via RS485: using the ComLynx protocol [online]. 2014 [cit. 2014-04-19]. Dostupné z: http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/18FA1022-2FF1-484A-8460-B6A51BE202BF/0/ComLynx_User_Guide_16_20120817_A7.pdf
- [9] CANADIANSOLAR. CS6P-250 I 255P [online]. 2014 [cit. 2014-04-19]. Dostupné z: http://www.canadiansolar.com/down/en/CS6P-P_en.pdf

7 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1: EMX modul - horní a dolní pohled.....	12
Obr. 2-2:Napájení	14
Obr. 2-3: Měníče +5V a +3,3V	15
Obr. 2-4: Zvyšující měnič 15V	15
Obr. 2-5: Obvod dobíjení baterií	16
Obr. 2-6: Měření napětí a proudu	18
Obr. 2-7: Butterworthův filtr	19
Obr. 2-8: Zapojení relé.....	20
Obr. 2-9: GPS modul	20
Obr. 2-10: SD karta.....	21
Obr. 2-11: Připojení OneWire čidla.....	21
Obr. 2-12: Optočlen	22
Obr. 2-13: CAN řadič	22
Obr. 2-14: Pinheader s popsanými výstupy	23
Obr. 2-15: Řídicí deska	24
Obr. 2-16.: Měřicí deska - schéma	25
Obr. 2-17: Měřicí deska – fotografie vrchní strany	26
Obr. 3-1: Matlab - Model rodinného domu	27
Obr. 3-2:Schéma rodinného domu	29
Obr. 3-3: Matlab - Model tepelné soustavy	30
Obr. 3-4: Matlab – Kotel.....	31
Obr. 3-5 Matlab - Akumulační nádrž.....	32
Obr. 3-6: Matlab – Bojler.....	34
Obr. 3-7: Matlab - Model vytápění domu.....	35
Obr. 3-8: Matlab - El. ohřívání bojleru.....	35
Obr. 3-9: Blok - Ohřívání bojleru z akumulací nádrže.....	36
Obr. 3-10: Blok - Otopná soustava.....	37
Obr. 3-11: PVGIS.....	38
Obr. 3-12: Blok - Aktualni výkon FVE	39
Obr. 3-13: Průběh měsíčních průměrných teplot v Semčicích	40
Obr. 3-14.: Odběr TUV	41
Obr. 3-15.:Odběr energie TUV	42

Obr. 3-16: Blok - "Odber TUV"	43
Obr. 3-17: Květen - výkon FVE.....	45
Obr. 3-18: Květen - teplota v akumulární nádrži.....	46
Obr. 3-19: Květen - teplota vody bojler.....	46
Obr. 3-20: Květen - řízení elektrického ohřívání bojleru.....	47
Obr. 3-21: Květen - odběr TUV z bojleru.....	47
Obr. 3-22: Květen - teplota místnosti.....	48
Obr. 3-23: Květen - venkovní teplota.....	48
Obr. 3-24: Květen - řízení AKU x kotel.....	49
Obr. 3-25: Energie vyrobená v FVE.....	50
Obr. 3-26: Energie uložená do AKU.....	51
Obr. 3-27: Neuložená energie z FVE.....	52
Obr. 3-28: Poměr ohřívání TUV z AKU.....	53
Obr. 3-29: Energie spotřebovaná na vytápění.....	54
Obr. 4-1: Matlab - Model tepelné soustavy.....	58
Obr. 4-2: Hardware – TUV.....	60
Obr. 4-3: Model - TUV.....	60
Obr. 4-4: Hardware - Teplota AKU.....	61
Obr. 4-5: Model - Teplota AKU.....	61
Obr. 4-6: Hardware - Teplota místnosti.....	62
Obr. 4-7: Model - Teplota místnosti.....	62

8 SEZNAM TABULEK

Tabulka 2-1: Parametry relé	19
Tabulka 3-1: Parametry FVE	37
Tabulka 3-2: Energie vyrobená FVE	49
Tabulka 3-3: Energie uložená do AKU	51
Tabulka 3-4: Neuložená energie z FVE	52
Tabulka 3-5: Energie spotřebovaná na vytápění	54

9 DEFINICE A ROZMĚR POUŽITÝCH SYMBOLŮ

R	(Ω)	Elektrický odpor
U	(V)	Elektrické napětí
I	(A)	Elektrický proud
l	(mm)	Vzdálenost
P	(W)	Výkon
G	()	Přenos
K	()	Zesílení
t	(s)	Čas
Q	(J)	Teplo
T	($^{\circ}\text{C}$)	Teplota
c_v	($\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$)	Měrná tepelná kapacita vody
P_z	(W)	Ztrátový výkon
α	(W K^{-1})	Součinitel tepelných ztrát
m	(kg)	Hmotnost
T_{amb}	($^{\circ}\text{C}$)	Teplota okolí
ρ	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Hustota

10 Obsah CD

- Návrh desek plošných spojů
- Řídicí program
- Model v Simulinku
- Samotná práce