

**Západočeská univerzita v Plzni**  
**Fakulta aplikovaných věd**  
**Katedra kybernetiky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**PLZEŇ, 2016**

**JAN PÍCHA**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan PÍCHA**  
Osobní číslo: **A12N0170P**  
Studijní program: **N3918 Aplikované vědy a informatika**  
Studijní obor: **Kybernetika a řídicí technika**  
Název tématu: **Řízení a optimalizace využití fotovoltaické elektrárny v lokalitě  
rodinného domu**  
Zadávací katedra: **Katedra kybernetiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se základními charakteristikami inteligentních sítí (smart grids), viz např. [1,2,3].
2. Seznamte se s problematikou optimalizace odběru elektrické energie, viz např. [4,5,6].
3. Seznamte se s řídicím systémem REX [7].
4. Zformulujte obecnou úlohu optimalizace nákladů na elektrickou energii v lokalitě rodinného domu vybaveného fotovoltaickou elektrárnou a řadou spotřebičů.
5. Navrhněte algoritmus řešení zformulované úlohy.
6. Ověřte navržený algoritmus řízení v reálném provozu malé fotovoltaické elektrárny.

Rozsah grafických prací: dle potřeby  
Rozsah pracovní zprávy: 35-50 stránek A4  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná  
Seznam odborné literatury:


1. Ekanayake, J. B.: Smart grid : technology and applications, Odborná literatura, Wiley-Blackwell 2012
2. Xinghuo Yu: The new frontier of smart grids, Odborný článek, Ingram Publishing 2011
3. Kaygusuz A.,Keles C.:Renewable energy integration for smart sites, Odborný článek, Elsevier B.V., 2013
4. Livengood D.,Larson R.:The energy box: Locally automated optimal control of residential electricity usage, Odborný článek, Service Science, 2009
5. Kowahl N., Kuh A.: Micro-scale smart grid optimization, Odborný článek, WCCI 2010
6. Gota D.I., Vigu C., Capatana O.: A power consumption optimization method for a hybrid renewable energy making system, Odborný článek, IEEE Conference 2010
7. REX Controls: Funkční bloky system REX, Referenční příručka. Plzeň, 2013.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Balda, Ph.D.**  
Katedra kybernetiky

Datum zadání diplomové práce: **23. září 2013**  
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2014**

  
Doc. Ing. František Vávra, CSc.  
děkan



  
Prof. Ing. Josef Psutka, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 23. září 2013

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne .....

.....

Jan Pícha

## Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Pavlovi Baldovi, Ph.D. za rady a odborné vedení během vypracování této práce, ale také za jeho ochotu a vstřícné jednání během konzultací.

Chtěl bych také poděkovat As. Mudr. Vladimírovi Veselému za jeho lékařskou péči, díky které jsem mohl tuto práci dokončit.

V neposlední řadě bych rád poděkoval přítelkyni, přátelům a rodičům za jejich dlouhodobou podporu, bez které by tato práce nevznikla.

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací a řízením elektrické energie vyrobené malou fotovoltaickou elektrárnou, která je připojena do elektrické rozvodné sítě v lokalitě rodinného domu. Tato problematika je vnímána jako součást konceptu inteligentních sítí, jejichž vlastnosti jsou na začátku této práce stručně popsány. Jako optimalizační nástroj je použito dynamické programování, na jehož základě je formulována úloha optimalizace řízení topného výkonu bojlerů a nabíjení baterií použitých pro zajištění osvětlení v rodinném domě. Pro realizaci řešení této úlohy je navržen řídicí systém založený na systému REX, který je instalován na minipočítači Raspberry Pi. S pomocí vývojové desky Arduino UNO a 1-Wire zařízení jsou navrženy měřicí a řídicí prvky systému potřebné pro řízení zátěže a sledování dalších parametrů systému. Vzhledem k tomu, že některé části formulované úlohy nebyly vyřešeny, není požadované optimální řízení nalezeno.

## Klíčová slova

inteligentní síť, fotovoltaická elektrárna, dynamické programování, řídicí systém REX, minipočítač Raspberry Pi, Arduino UNO, 1-Wire sběrnice, 1-Wire zařízení, tyristorová regulace, regulační autotransformátor, akumulace elektrické energie

## Abstract

Energy consumption optimization and load control of the electric energy generated by small On-Grid photovoltaic power plant located at the family house is the main focus of the thesis. It introduces the topic as a part of smart grid technology. Simple overview of the smart grid technology is given in the first part of the thesis. Dynamic programming is used as an optimization method and on its principles is formulated optimization problem concerning water heater load control and battery storage charging. Battery storage is then used for lighting purposes in the house. REX control system installed on Raspberry Pi minicomputer is used as a heart of proposed control system. Measuring and control modules based on Arduino Uno platform and 1-Wire devices needed for load control are described in the last part of the thesis. Due to incomplete solution of the formulated optimization problem an optimal control strategy was not found.

## Key words

smart grid, photovoltaic power plant, dynamic programming, REX control system, Raspberry Pi minicomputer, Arduino Uno, 1-Wire bus, 1-Wire devices, thyristor load control, variable transformer, electric energy storage

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Smart Grids</b>	<b>2</b>
2.1	Současný stav . . . . .	2
2.2	Důvody pro zavedení . . . . .	3
2.3	Definice . . . . .	4
2.4	Požadované vlastnosti . . . . .	6
2.5	Klíčové technologie . . . . .	6
2.5.1	Informační a výpočetní technologie . . . . .	6
2.5.2	Senzorové, měřicí, regulační a automatizační technologie . . . . .	10
2.5.3	Výkonová elektronika a energetická úložiště . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Obecná úloha optimalizace spotřeby energie</b>	<b>16</b>
3.1	Energy Box . . . . .	16
3.1.1	Dynamické programování . . . . .	16
3.1.2	Aplikace na SG . . . . .	17
3.1.3	Reálná implementace . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Úloha optimalizace využití fotovoltaické elektrárny</b>	<b>20</b>
4.1	Motivace . . . . .	20
4.2	Původní stav . . . . .	21
4.2.1	Fotovoltaická elektrárna . . . . .	21
4.2.2	Spotřebiče . . . . .	21
4.3	Formulace úlohy . . . . .	23
4.3.1	Stav . . . . .	23
4.3.2	Řízení . . . . .	24
4.3.3	Model systému . . . . .	24
4.3.4	Ztrátová funkce . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Realizace úlohy</b>	<b>30</b>
5.1	Počáteční problémy . . . . .	30
5.2	Výběr základních hardwarových a softwarových nástrojů . . . . .	31
5.2.1	Raspberry Pi . . . . .	31
5.2.2	REX . . . . .	32
5.2.3	Arduino . . . . .	34
5.3	Měření vyráběného výkonu . . . . .	34
5.4	Měření aktuální spotřeby . . . . .	35
5.5	Převodník i2c/1-Wire . . . . .	37
5.6	Akumulace ve formě tepla . . . . .	37
5.6.1	Topná tělesa . . . . .	37
5.6.2	Regulace výkonu topných těles . . . . .	38
5.7	Akumulace do baterií . . . . .	42
5.8	Měření teplot . . . . .	44
5.9	Jednostavové ovládání spotřebičů . . . . .	45

5.10 Řešení výpadků sítě . . . . .	45
5.11 Vizualizace . . . . .	46
<b>6 Závěr</b>	<b>47</b>
<b>Literatura</b>	<b>48</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>52</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>53</b>
<b>Obsah CD přílohy k DP práci</b>	<b>54</b>



# 1 Úvod

Tato práce se zabývá návrhem a realizací optimalizace a řízení elektrické energie vyrobené malou solární elektrárnou, která je instalována v elektrické rozvodné síti rodinného domu. Práce si klade za úkol nalézt řídicí algoritmus, který by umožnil optimálně využívat elektrickou energii vyrobenou solární elektrárnou s ohledem na náklady za elektrickou energii a komfort lidského života. Druhým cílem práce je představení a realizace řídicího systému, který by implementaci nalezeného algoritmu spolu se všemi jeho aspekty umožňoval.

Motivací pro řešení tohoto problému je požadované snížení nákladů za elektrickou energii zmíněného rodinného domu a také zavedení nástrojů pro jednodušší ovládání a správu některých elektrických zařízení, kterými rodinný dům disponuje.

V úvodní části této práce je přiblížena tematika inteligentních sítí („Smart Grids“), jejichž koncept a různá technologická řešení se zmíněnou úlohou souvisí. Úlohy optimalizace spotřeby a řízení zátěže jsou totiž řešeny i v rámci inteligentních sítí. V této části jsou představeny důvody pro zavedení inteligentních sítí, jejich definice a klíčové technologie, které inteligentní sítě využívají.

Ve druhé části je popsána obecná úloha optimalizace spotřeby elektrické energie založená na optimalizační metodě dynamického programování. Je zde stručně popsána samotná metoda dynamického programování a její možnosti použití pro optimalizaci spotřeby elektrické energie. Na základě těchto možností je pak formulována konkrétní úloha optimalizace řízení topného výkonu bojlerů a nabíjení baterií v závislosti na nákladech a komfortu života. V rámci formulace konkrétní úlohy optimalizace jsou definovány složky stavu a řízení, modely systému a ztrátová funkce.

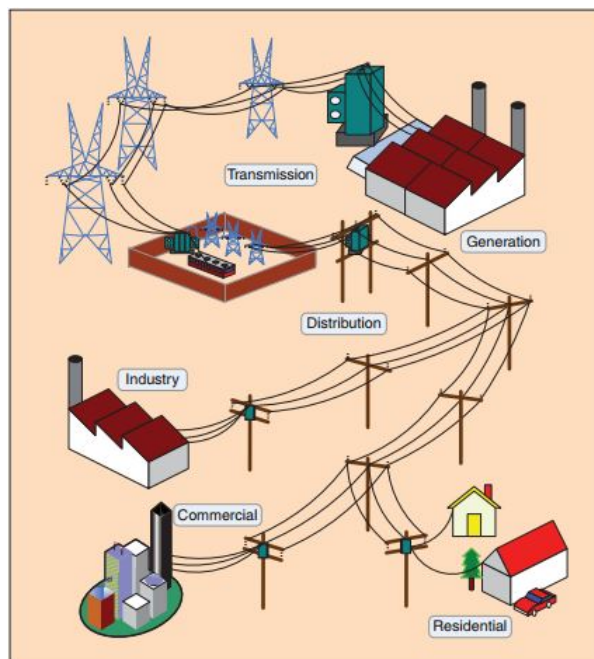
Realizovaný řídicí systém je pak popsán v poslední části této práce. Jsou zde uvedeny všechny dílčí úlohy, které byly během návrhu a realizace řídicího systému řešeny. Tato část práce se mimo jiné zabývá problémy s měřením vyráběného výkonu, měřením spotřeby, problémy spojené s akumulací elektrické energie a možnostmi výkonového řízení zátěže. Řídicí systém je založen na systému REX instalovaném na minipočítači Raspberry Pi. Pro připojení dalších vstupně/výstupních prvků je použita vývojová platforma Arduino UNO a 1-Wire sběrnice umožňující připojení 1-Wire zařízení.

## 2 Smart Grids

Inteligentní sítě nové generace – Smart Grids (dále jen „SG”) je pojem, který v sobě zahrnuje široké množství nových technologických řešení nejen v oblasti energetiky (odkud také pochází pojmenování electric grid = rozvodná elektrická síť), ale i v dalších oblastech jako jsou informační technologie, obnovitelné zdroje energie (dále jen „OZE”), výkonová elektronika, řídicí a monitorovací systémy, elektromobilita a mnohé další. SG přináší nový pohled na to, jak nakládáme s elektrickou energií, a to nejen z hlediska její výroby, přenosu, distribuce, ale současně také z hlediska jejího spotřebování. SG nabízejí výrobcům a distributorům nové nástroje a možnosti jak zajistit spolehlivou, udržitelnou a technologicky i ekonomicky efektivní dodávku elektřiny pro své odběratele. Odběratelům naproti tomu SG poskytují prostor pro větší začlenění do celého procesu koloběhu elektrické energie zavedením malých lokálních zdrojů, představením možností ukládání elektrické energie a následného prodeje a zavedením nových monitorovacích, vyhodnocovacích a přehledových služeb.

### 2.1 Současný stav

V minulosti a z velké části ještě stále v dnešní době, kdy jsme na samém začátku budování SG (podle národního akčního plánu ČR [1] můžeme u nás očekávat plné uvedení všech plánovaných částí SG do provozu až v období 2030–2040), je patrný jednosměrný trend toku elektrické energie – přímý směr od výrobců elektřiny přes elektrickou rozvodnou síť až ke koncovým odběratelům. Současný stav rozvodné elektrické sítě a všech jejích účastníků je dobře vidět z obrázku 2.1. Elektřina vyrobená v elektrárnách je skrze



Obrázek 2.1: Ilustrace současného stavu elektrické rozvodné sítě, zdroj:[3]

přenosovou soustavu (na napět'ových úrovních 400 kV, 220 kV a 110 kV) přenášená přes naše území a dále pak distribuční soustavou (na napět'ových úrovních 110 kV, 35 kV, 25 kV, 22 kV, 10 kV, 6 kV, 3kV, 1,5kV a 0,4/0,23 kV) rozvedená ke koncovým odběratelům. Lokální výroba elektřiny z tzv. zelených obnovitelných zdrojů (vodní, větrné a fotovoltaické zdroje, bioplyn, biomasa a další) zaujímá pouze malou část celkové výroby elektrické energie (podle výroční zprávy Energetického regulačního úřadu [11] se v roce 2015 podílely OZE na celkové výrobě pouze z 13,7 %). Možnosti pro dočasné uchovávání elektřiny v obdobích nízké poptávky pro pozdější využití jsou mizivé. Výměna informací o aktuální spotřebě/výrobě mezi koncovými účastníky a výrobci elektrické energie téměř neexistuje. Koncoví odběratelé elektřiny se nijak významně na koloběhu výroby, přenosu, distribuce a ukládání elektřiny nepodílejí, jsou pouze jejími spotřebiteli.

Přehled spotřeby elektrické energie a procentuální rozložení spotřeby za rok 2015 podle výroční zprávy Energetického regulačního úřadu [11] je vidět v tabulce 2.1. Celková spo-

Odběratel	Spotřeba elektřiny [GWh]	Podíl [%]
Velkoodběr z hladiny VVN	7 296,4	12,5
Velkoodběr z hladiny VN	23 354,1	40,2
Maloodběr podnikatelé	7 799,7	13,4
Maloodběr obyvatelstvo	14 381,9	24,7
Spotřeba provozovatelů PS a DS	279,3	0,5
Lokální spotřeba	5054,0	8,7

Tabulka 2.1: Spotřeba elektřiny v ČR za rok 2015, zdroj: [11]

třeba elektřiny za rok 2015 v ČR dosáhla na hodnotu 58 165,3 GWh [11]. Ztráty elektrické energie na přenosové a distribuční síti činily tento rok 4067 GWh z toho 1007,1 GWh (24,8 %) byly ztráty v přenosové soustavě a 3059,9 GWh (75,2 %) ztráty v distribuční soustavě. Tyto ztráty představují 7 % celkové spotřeby elektřiny a jsou také jedním z řady dalších důvodů, proč dochází k vývoji a zavedení SG.

## 2.2 Důvody pro zavedení

Důvodů pro zavedení SG je více a vycházejí nejenom z ekologických, ekonomických, technologických, ale také sociálních oblastí. Ty nejdůležitější podle [2], [3] a [4] jsou:

1. **Ekologické:** Snaha o zvrácení trendu globálního oteplování snížením používání fosilních paliv (uhlí, zemní plyn, ropa), jejichž zásoby na Zemi jsou limitované a podle [3] jsou odhadovány při současné spotřebě pouze na několik desítek let. Jedním z řešení, jak snížit produkci  $CO_2$  a dalších skleníkových plynů, je zavedení nových šetrnějších a efektivnějších zdrojů elektrické energie, jako jsou například obnovitelné zdroje – vodní, fotovoltaické, geotermální a další.
2. **Ekonomické:** Některé tradiční zdroje elektrické energie, například uhelné elektrárny, mají velmi nízkou účinnost a nejsou tedy ekonomické. V některých případech [3] může tato účinnost od zdroje (uhlí) až ke koncovému spotřebiteli (např. domácnost) vzhledem k malé účinnosti samotných termodynamických procesů, ale také například vlivem přenosových a distribučních ztrát dosahovat hodnoty pouze 30 %. Nové zdroje elektrické energie, jako jsou solární a větrné elektrárny, dosáhnou díky vyšší účinnosti samotné výroby spolu s jejich distribuovaným rozmístěním blíže ke koncovým spotřebitelům vyšší celkové účinnosti a tím větší ekonomičnosti.

Možnosti řízení spotřeby, konvenční výroby, lokální výroby a ukládání elektrické energie, jež SG nabízí, by měly vést ke snížení celkové kapacity elektrické rozvodné sítě a tím ke snížení nákladů na výstavbu a údržbu sítě. Zavedení SG s sebou samozřejmě přináší nové náklady při zavádění těchto technologií, ale následné nižší náklady na údržbu a hlavně provoz tyto počáteční náklady ospravedlňují.

Inteligentní měření představené v konceptu SG a s ním spojené nové možnosti zobrazení dat aktuálních a dlouhodobých hodnot nejen spotřeby, výkonu, napětí, proudu, ale také aktuální nákupní a prodejní ceny elektřiny předpokládá představení a osvojení si nových návyků v zacházení odběratelů s elektřinou a tím ke snížení konečné ceny za 1 MWh elektrické energie.

3. **Technologické:** Nové technologie v mnoha oblastech (informační a výpočetní technika, výkonová elektronika, měřicí technika a elektrotechnika, technologie akumulátorů a ukládání elektrické energie, elektromobilita, atd.), které byly za několik posledních let vyvinuty nebo zdokonaleny, nám umožňují příchod SG. Jejich vhodnou kombinací a integrací můžeme docílit všech stanovených cílů projektu SG, pro jehož správnou funkčnost jsou tyto technologie klíčové a umožňující.

Některé části současné elektrické rozvodné sítě jsou vzhledem k jejich stáří a parametrům na pokraji svých možností a rostoucí začleňování OZE do distribuční sítě klade na tyto části stále větší nároky, které by v budoucnu nemusely již vyhovovat. Nový koncept na celkový pohled nakládání s elektřinou je z tohoto pohledu nutností a na to reagují právě SG.

Narůstající trend závislosti na spolehlivosti dodávky elektřiny klade nároky na současnou elektrickou rozvodnou síť. Tyto nároky v mnoha případech znamenají nemalé náklady na nadbytečné zabezpečovací systémy pro případ závady. Tyto zabezpečovací systémy jsou však během své životnosti mnohdy využity pouze částečně. SG nabízí zachování dodávky elektrické energie, snížení počtu nadbytečných systémů (nákladů na tyto systémy) a inteligentní možnost rekonfigurace v případě (nevyhnutelného) výpadku i za cenu větších elektrických ztrát [2].

4. **Sociální:** Jedním z důvodů pro umožnění zavedení SG do praxe je dozajista i současná „digitální doba“, která přináší nejnovější technologie do našich životů, a celková otevřenost společnosti k novým technologiím. Určitá sociální prestiž a snaha o „eco-friendly“ životní styl, který plyne z nákupu a používání nových „zelených“ technologií, se zde také promítá a je dobře patrná například v sektoru elektromobility na území USA, kde výrazně napomáhá prodejem elektromobilů. Spotřebitelé vykazují vyšší zájem o informace, které se týkají spotřeby elektrické energie a o možnosti, jak tuto spotřebu mohou snížit. Tento trend zavedení SG napomáhá. V plánovaných realizacích SG je integrace spotřebitele do procesu nakládání s elektřinou žádoucí a v některých případech dokonce nutná.

## 2.3 Definice

Inteligentní elektrická síť SG nemá jednoznačnou konkrétní definici a vzhledem k rozsáhlosti a velké variaci možností samotné realizace je možné ji definovat mnoha způsoby. European Technology Platform [12] ji ve své vizi z roku 2006 definuje následovně:

*„Smart Grid je elektrická síť, která dokáže inteligentně propojit činy všech účastníků sítě – výrobců, spotřebitelů a těch, kteří plní obě úlohy – za účelem efektivní dodávky udržitelné, ekonomické a zajištěné elektrické energie.“*

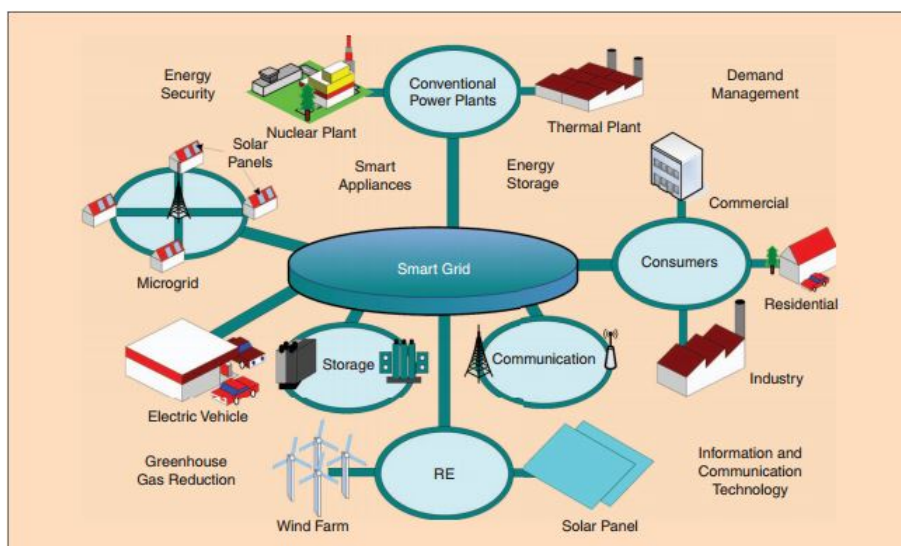
Podle U.S. Department of Energy a jeho výroční zprávy [14] ohledně zavádění inteligentních sítí do praxe můžeme SG chápat v následujícím smyslu:

*„Smart Grid využívá digitální technologie k zlepšení spolehlivosti, zabezpečení a efektivity (ekonomické i energetické) elektrického rozvodného systému od velkých výrobců, skrz přenos a distribuci až k spotřebitelům elektriny a rostoucímu počtu distribuovaných zdrojů a ukládacích možností.”*

Ve zprávě *Smarter Grids: The Opportunity* [13] definují SG takto:

*„Smart Grid využívá měření, embedded processing a digitální komunikace k tomu, aby elektrická rozvodná síť byla sledovatelná (možnost měření a vizualizace), regulovatelná (možnost manipulace a optimalizace), automatizovatelná (možnost adaptace a samoopravy) a plně jednotná (možnost společného provozu s existujícími systémy a možnostmi pro začlenění rozmanité škály zdrojů elektrické energie).”*

Ilustrace konceptu SG skládající se ze všech klíčových částí je vidět na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Ilustrace konceptu inteligentní sítě, zdroj:[3]

Jsou na ní vidět všechny důležité části inteligentní sítě, které jsou vzájemně propojeny nejen výkonově, tedy elektrickou rozvodnou sítí, ale také informačně pomocí komunikačních technologií. Konvenční zdroje elektriny, jako jsou atomové a tepelné elektrárny, jsou doplněny o distribuované zdroje energie z obnovitelných zdrojů (fotovoltaické, vodní, větrné a další). Přebytný výkon v dobách nízké poptávky je ukládán ve vhodně rozmístěných úložištích (baterie, přečerpávací elektrárny a další) pro pozdější spotřebu. Jednou z možností, jak uložit „levnou“ elektřinu, jsou elektromobily, jejichž kompatibilita je zaručena v celé síti. Spotřeba (ale i případná dodávka) velkoodběratelů i maloodběratelů, kteří používají inteligentní spotřebiče a zařízení, je inteligentně řízena z hlediska efektivity, stability a aktuální dostupnosti energie.

Vlastní realizace technologií inteligentních sítí se od ilustrace na obrázku 2.2 mohou lišit a nemusejí obsahovat všechny vyobrazené části. Politika jednotlivých států zavedení SG do praxe se liší a každý stát přizpůsobuje SG svým specifickým požadavkům a územním možnostem. Klíčové vlastnosti SG, které jsou uvedeny v kapitole 2.4, můžeme však u všech pohledů na SG ve větší či menší míře nalézt a jsou pro SG charakteristické.

## 2.4 Požadované vlastnosti

Výše představený koncept SG by měl být podle [2] schopen integrovat a nabídnout všem účastníkům následující vlastnosti a schopnosti:

1. Umožňuje reakci na poptávku elektrické energie a správu nakládání s elektrinou (Demand Side Management) díky integraci inteligentních měřičů spotřeby, inteligentních domácích spotřebičů a inteligentních výkonových spotřebičů, malých zdrojů elektrické energie, úložišť elektriny (a/nebo elektromobilů) a díky poskytování informací souvisejících se spotřebou a náklady na elektrickou energii.
2. Zahrnuje a umožňuje jednoduché začlenění všech obnovitelných zdrojů elektrické energie, distribuovaných zdrojů energie, malých zdrojů umístěných v domácnostech a úložišť a tím redukuje ekologický dopad energetického průmyslu. Poskytuje prostředky pro jednoduché připojení ve stylu „*Plug&Play*”.
3. Optimalizuje a efektivně nakládá s dostupnými zdroji inteligentním řízením (přesměrováním toku energie, autonomním provozem) a snaží se o efektivní správu zdrojů. To zahrnuje využití zdrojů v závislosti na tom, zda-li jsou potřeba, v jakém rozsahu a v jakou dobu.
4. Zaručuje a zlepšuje spolehlivost zajištění dodávky elektrické energie díky odolnosti vůči poruchám, útokům a přírodním katastrofám. Předvídá defekty systému, reaguje na ně (prediktivní údržba a samooprava) a posiluje zabezpečení dodávek elektrické energie zlepšením přenosových schopností.
5. Udržuje kvalitu dodávané elektriny pro bezproblémové použití citlivých zařízení, jejichž počet s „digitálním věkem” narůstá.
6. Otevírá trh s elektrinou díky navýšení přenosových a distribučních tras, reakcím na nabídku a poptávku elektrické energie a poskytování doplňkových služeb.

## 2.5 Klíčové technologie

Výše uvedené požadavky na vlastnosti SG představují pro uvedení do praxe značné nároky. Splnění těchto nároků je možné díky využití nových a stávajících technologií, které s nasazováním SG do provozu souvisí. Vzhledem k rozsáhlosti technologických řešení SG můžeme využití technologie rozdělit do tří kategorií (takto je rozdělení popsáno v [2]):

- Informační a výpočetní technologie
- Senzorové, měřicí, regulační a automatizační technologie
- Výkonová elektronika a energetická úložiště

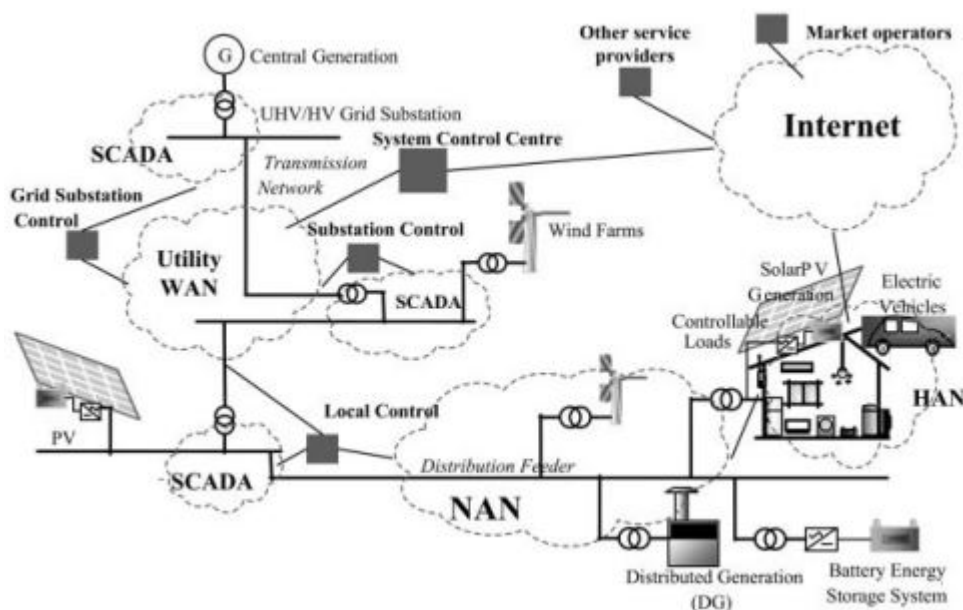
V částech 2.5.1, 2.5.2 a 2.5.3 je uveden přehled těch nejdůležitějších technologií z těchto kategorií. Konkrétní technologie, které byly implementovány při realizaci vlastního řešení, jsou pak podrobněji popsány v kapitole 4.

### 2.5.1 Informační a výpočetní technologie

Do této kategorie spadají především technologie umožňující vytvoření komunikační sítě, díky které dojde k propojení jednotlivých částí SG na informační úrovni. Software a hardware nutný k realizaci a zabezpečení této sítě zde hraje významnou roli.

## Příkladová infrastruktura

Spolehlivá obousměrná komunikace pro zajištění možnosti výměny dat mezi jednotlivými částmi inteligentní sítě na všech jejích úrovních je pro SG nutností. Jedna z možných realizací komunikační infrastruktury podle [2] je dobře znázorněna na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Příklad možné komunikační infrastruktury SG, zdroj:[2]

Skládá se z několika SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition – Nadřazené řízení a sběr dat) systémů s rozličnými komunikačními kanály, které dohromady propojují jednotlivé druhy sítí, jejichž pojmenování a možné technologie jsou v tabulce 2.2. Internet (WWW) jako nejdostupnější a nejrozšířenější možnost komunikace má na sta-

Zkratka	Pojmenování	Technologie
WWW	World Wide Web	Ethernet, Wireless ethernet, EDGE, HSPA, LTE
WAN	Wide Area Network	MPLS, WiMax, LTE, Frame Relay
NAN	Neighbourhood Area Network	Power Line Carrier, Broadband over Power Line, DSL, UMTS, LTE, LoRaWAN
HAN	Home Area Network	Ethernet, WLAN, LoRaWAN, ZigBee, PLC, BPL, 1-wire, Bluetooth, HomePlug

Tabulka 2.2: Možné druhy sítí a použitelné technologie, zdroj: [2]

rost komunikační propojení nejvyšších sfér systému SG a zajišťuje spolehlivý a rychlý přenos dat na téměř neomezené vzdálenosti. Pro propojení výrobců a velkoobdobatelů skrze velké území slouží síť WAN (Wide Area Network), jež může být v několika místech spojena s dalšími specializačními SCADA systémy, které propojují hlavní napájecí

systemy, centrální zdroje, přenosové a distribuční stanice. K přenosu a řízení dat mezi odběrateli v lokaci jednotlivých distribučních přípojních míst je definována síť NAN (Neighbourhood Area Network) a její technologie. Pro potřeby měření, řízení a komunikaci dat na úrovni domácností je navrhována síť HAN (Home Area Network) a její možnosti. Reprezentativním příkladem bodu HAN sítě jsou tzv. smart měřící přístroje (Smart Meter). Vzhledem k nutnosti vzájemné spolupráce jednotlivých částí komunikačního systému a případné zaměnitelnosti a jednoduché integrace nových částí využívají některé zmíněné technologie definované komunikační protokoly a referenční modely, jako jsou například TCP/IP protokol a ISO/OSI model.

## Přehled komunikačních technologií

### 1. Standardy IEEE 802.\*[15]

- a) **Ethernet** – nejrozšířenější síťová technologie pro drátové sítě LAN. Charakterizuje její jednoduchost, snadná údržba, schopnost integrace nových technologií a spolehlivost. Ethernet je založen na standardu IEEE 802.3. Síť Ethernet realizují fyzickou a linkovou vrstvu referenčního modelu OSI.
- b) **WLAN** – IEEE 802.11 je standardem pro bezdrátové LAN sítě. Komponenty sítě jsou: stanice, přístupový bod (AP) a distribuční systém (DS). Jsou definovány rychlostní standardy pro 2,4GHz a 5GHz provoz označovány písmeny *a*, *b*, *g*, *n*, *y*, *ac* a *ad*.
- c) **Bluetooth** – bezdrátová LAN technologie standardu IEEE 802.15.1 navržena pro propojení mobilních zařízení a zařízení s nízkou spotřebou pomocí rádiové komunikace. BT 4.0 je schopen dosahovat přenosové rychlosti 1 Mbps až na vzdálenost 150 m.
- d) **ZigBee & 6LoWPAN** – technologie založené na IEEE 802.15.4. Jedná se o bezdrátové sítě s malou přenosovou rychlostí. Je to velmi populární protokol pro bezdrátové WPAN sítě (Wireless Personal Area Networks) kvůli své nízké spotřebě, vysoké flexibilitě a dostupné ceně.
- e) **WiMax** – Worldwide Interoperability for Microwave Access – bezdrátová technologie standardu IEEE 802.16. Je schopná pokrýt komunikaci až do vzdáleností 50 km s datovým tokem až 75 Mbps pro pevné stanice a až 15 Mbps pro stanice mobilní.

### 2. Mobilní komunikace

Prvotní mobilní technologie umožňující přenos dat skrze telekomunikační bezdrátovou síť byla technologie GPRS, která rozšiřovala standard GSM. Od té doby došlo k řadě pokroků a vývoji nových technologických standardů jako jsou EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution), HSPA (High Speed Packet Access) a LTE (Long Term Evolution), jež tvoří rodinu tzv. standardů 3. generace a nové standardy 4. generace LTE Advanced, které mohou dosahovat až teoretických přenosových rychlostí 500 Mbps pro upload a 1000 Mbps pro download.

### 3. Multi Protocol Label Switching (MPLS)

Jedná se o škálovatelnou, protokolově nezávislou technologii přenosu dat. V MPLS síti jsou datovým paketům přiřazena návěští. Rozhodnutí o tom, kam se má paket poslat, se uskutečňují výhradně podle hodnoty tohoto návěští, bez potřeby kontrolovat vlastní paket. To umožňuje vytvářet koncové okruhy pro přenos libovolného protokolu s použitím libovolného typu transportních medií. Hlavní výhodou je odstranění závislosti na určité technologii linkové vrstvy ISO/OSI modelu.



#### 4. Přenos dat po elektrické síti

- a) **IEEE P1901** – zahrnuje Power Line Carrier (PLC) a Broadband over Power Line (BPL) technologie pro dálkový přenos dat po elektrické rozvodné síti stejně tak, jako lokální přenos dat po elektrické síti s rychlostními možnostmi dosahujícími rychlostí více než 100 Mbps. Standard má mimo jiné také na starosti, aby zmíněný přenos dat po síti dodržel stanovené limity EMC pro rozvodnou síť.
  - b) **HomePlug** – širokopásmová nestandardizovaná technologie navržená Home Plug Powerline aliancí, jejíž členové jsou hlavní společnosti v komunikačním a energetickém průmyslu. Aliance definuje své čtyři standardy:
    - i. *HomePlug 1.0* – propojuje zařízení v domácnostech (1-10 Mbps)
    - ii. *HomePlug AV a AV2* - pro přenos HDTV, VoIP v domácnostech (200 Mbps/ 600 Mbps AV1/AV2)
    - iii. *HomePlug CC* – Command and Control pro implementaci dalších jiných funkcí
    - iv. *HomePlug BPL* – BPL podle standardu IEEE P1901
5. **1-Wire** – sběrnice navržená firmou Dallas Semiconductor Corp. pro komunikaci zařízení nízkou datovou rychlostí, signalizaci i napájení. Sběrnice je i přes zavádějící název dvou vodičová, jedním vodičem je vedena společná zem a druhým je veden datový kanál sběrnice. Základem každé 1-Wire sběrnice je tzv. 1-Wire master, který řídí veškerou komunikaci na sběrnici. Master komunikuje s tzv. slave zařízeními, tedy 1-Wire obvody. Souhrně tyto obvody/zařízení nazývá jejich výrobce 1-Wire Devices a nabízí širokou škálu obvodů pro různé účely (měření teploty, měření vlastností baterií, identifikace, ROM paměti a mnohé další). Jednotlivé obvody jsou všechny připojeny na společnou zem a paralelně k datovému vodiči. Master do sběrnice posílá příkazy jednotlivým (nebo všem připojeným) 1-Wire obvodům, které se podle druhu příkazu náležitě zachovají. Standardní rychlost komunikace je 16 kbit/s, ale je zde také možnost použít komunikaci ve formě overdrive, kdy je rychlost 125 kbit/s, doporučuje se však pouze na krátká, ničím nerušená spojení.
6. **LoRaWAN** – je typem „Low Power Wide Area Network“ (LPWAN), tj. bezdrátová síť umožňující připojit řadu koncových bodů do centrálního bodu prostřednictvím přenosové sítě, jejíž základnové stanice jsou rozmístěné po celém území. Využívá rádiovou modulaci LoRa (CDMA) [16]. Je pro ni charakteristická nízká spotřeba a dlouhý dosah vysílaného signálu. Tato bezdrátová síť je v současné době nástupu „Internet of Things“ velmi populární a díky svým vlastnostem a cenové dostupnosti poskytuje výborné možnosti pro připojení zařízení k této „IoT“ síti.

#### Možnosti vizualizace

Důležitou součástí komunikační infrastruktury SG je také potřebný software a hardware pro zobrazení a interpretaci přenášených dat, tzv. Human Machine Interface (HMI) a vizualizační nástroje. Pro koncového odběratele jsou tyto nástroje jednoduchou možností jak se více zapojit do trhu s elektrickou energií a reagovat tak na aktuální vývoj cen elektřiny v reálném čase a tím upravit své energetické návyky. Ve většině případů jsou tyto technologie založeny na webových aplikacích.

## Zabezpečení komunikace

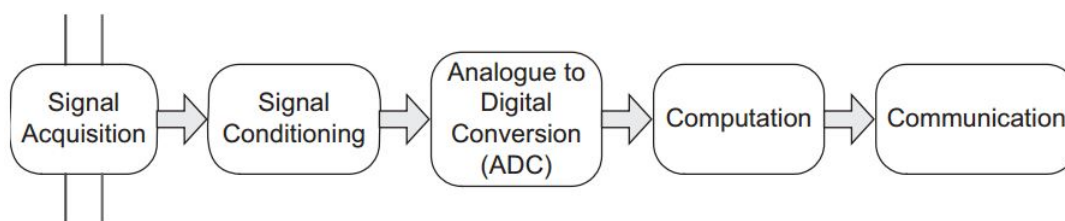
Nárůst komunikační struktury, objemu přenášených dat a navýšení počtů účastníků s sebou nese svá rizika z pohledu zabezpečení komunikace proti vnějším útokům. Celou komunikační strukturou mohou být přenášena nejenom citlivá regulační data o stavu sítě, data spojená s řízením sítě, ale také citlivá osobní data odběratelů. Vzhledem k distribuovanému řízení sítě se také naskýtá větší prostor pro útoky snažící se o narušení správného chodu sítě. Na všechny tyto aspekty a mnohé další musí komunikační zabezpečení SG reagovat a implementovat nástroje a postupy pro jejich zabezpečení. Některé z těchto postupů jsou:

1. **Šifrování komunikace** – jedním z příkladů šifrování komunikace je DES (Data Encryption Standard) či šifrování pomocí veřejného klíče.
2. **Ověření identity** – před navázáním komunikace a potenciálním odesláním citlivých dat jsou účastníci komunikace nuceni provést ověření identity. V případě, že ověření selže, k odeslání komunikačních dat vůbec nedojde. Jednou z možností identifikace účastníků komunikace mohou být tzv. digitální podpisy.
3. **IEEE 1686** – je IEEE standard pro IED (Intelligent Electronic Devices), který definuje, jaké bezpečnostní mechanismy a nástroje by měly být v inteligentních zařízeních připojených do SG implementovány. Jedním z těchto mechanismů je požadavek na to, aby zařízení připojené do sítě nemělo k dispozici žádnou možnost jak obejít uživatelem nastavené heslo – tedy žádné master heslo, HW rutiny pro obnovení hesla ani HW reset tlačítka pro obnovu hesla [2].

## 2.5.2 Senzorové, měřicí, regulační a automatizační technologie

### Smart Meters – inteligentní měření

Inteligentní měřiče představují základní IED (Intelligent Electronic Device). Nahrazují původní AMR (Automatic Meter Reading), jež umožňovaly pouze jednosměrnou komunikaci, tedy odesílání naměřených dat. Smart Meters (SM) přichází s možností obousměrné komunikace, měřením a zaznamenáváním hodnot v reálném čase, možností vzdáleného ovládání, napojením na HAN, NAN, případně další SCADA systémy, integrují v sobě možnosti DSM (Demand Side Management), tedy řízení poptávky po elektrické energii. Zjednodušené blokové schéma takového SM tak, jak je představeno v literatuře [2], je zobrazeno na obrázku 2.4. Toto schéma je prototypem každého SM, jež má ambice být



Obrázek 2.4: Zjednodušené blokové schéma SM, zdroj:[2]

zapojen do SG.

1. **Signal acquisition** – přesné a rychlé získávání základních požadovaných parametrů: velikost a frekvence napětí, velikost a fázový posuv proudu oproti napětí. Ostatní doplňkové parametry, jako jsou účinník, velikost činného a jalového výkonu a další

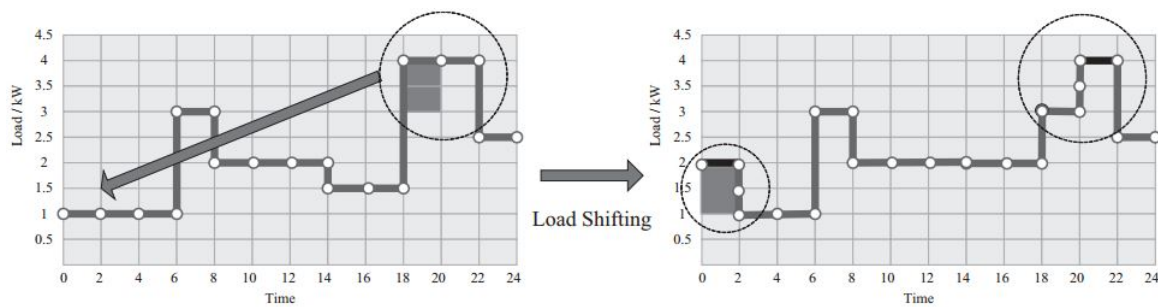
jsou vypočteny z těchto základních parametrů v bloku *Computation*. Pro získání hodnoty velikosti proudu mohou být použity proudové transformátory, Rogowskiho cívka, optické metody a nebo senzory založené na efektu Hallovo napětí.

2. **Signal conditioning** – úprava získaných napět'ových signálů pro následující krok digitalizace. Obvykle zahrnuje úpravu offsetu, zesílení a filtraci z důvodu aliasingu.
3. **ADC** – převod upravených analogových napět'ových signálů do digitální podoby, aby mohly být dále zpracovány. Rozlišení AD převodníku je dáno počtem jeho bitů a velikostí referenčního napětí. Obvyklé hodnoty jsou 8, 10 bitů, ale existují i 16 a 32 bitové převodníky. Rychlost převodu analogového signálu na digitální hodnotu závisí na typu převodníku a jeho parametrech. Používají se převodníky s postupnou aproximací,  $\Sigma - \Delta$  převodníky, převodníky s dvojitou integrací a další.
4. **Computation** – výpočetní jádro SM. Umožňuje provádět se získanými hodnotami základní aritmetické, ale i pokročilé funkce: detekce nuly, Fourierova analýza, trigonometrické funkce, násobení, integrace a mnohé další. Ukládání naměřených a vypočtených hodnot, kalkulace ceny za elektřinu, reakce na uživatelské ovládání, update systému, příprava dat pro komunikační část, ale i možnost správy přídatných řídicích a I/O modulů jsou všechno úlohy, které má výpočetní jádro na starosti.
5. **Communication** – komunikační rozhraní umožňuje vzdálený, ale i lokální přístup k vyhodnoceným datům, přijímání řídicích a ovládacích signálů a odesílání všech nutných dat. Může se jednat o drátové či bezdrátové technologie, jež jsou uvedeny ve třetím sloupci tabulky 2.2. Může také sloužit jako rozhraní mezi místní HAN a nadřazenou WAN či dalšími SCADA systémy.

## Technologie řízení poptávky

Systémy pro řízení spotřeby elektrické energie (DSM) jsou jednou z možností, jak docílit snížení výkyvu poptávky po elektrické energii a tím i její ceny. Využívají všech dostupných částí SG, jako jsou zdroje (centrální konvenční zdroje, distribuované zdroje, OZE, malé lokální zdroje, úložiště, atd.), přenosové a distribuční schopnosti (rekonfigurovatelné části sítě, kompenzace, atd.) a možnosti řízení koncové spotřeby. Techniky, jež systém řízení poptávky využívá, jsou dle literatury [2]:

1. **Load shifting** – technika přesunutí odběru elektřiny z časových úseků během dne, kdy je zatížení elektrické sítě nejvyšší (období nejvyšší poptávky – odběrová špička), do časových úseků, kdy je zatížení sítě nižší. Má za následek snížení maximálního zatížení sítě, jež vede k větší stabilitě, nižším ztrátám a snazší regulaci elektrické rozvodné sítě. Příkladem může být přesunutí pracího cyklu pračky ze špičky do nočního času. Grafická reprezentace této techniky je na obrázku 2.5.
2. **Valley filling** – technika zvýšení odběru v dobách nízké zátěže. Počítá s představením nových možností ukládání energie v podobě baterií, elektromobilů nebo akumulace v podobě tepla. Tato uložená energie může být později použita v době velké poptávky.
3. **Peak clipping** – technika snížení aktuálního zatížení sítě v době, kdy dosahuje maximálních kritických hodnot z hlediska přenosových a distribučních limitů. Využívá k tomu přímé řízení zátěže některých spotřebičů, jako jsou například elektrická topení, klimatizace, ohřevy vody a další. Tato technika může mít za následek částečné snížení komfortu koncového odběratele.



Obrázek 2.5: Jedna z technik DSM: load shifting, zdroj: [2]

4. **Energy efficiency improvement** – souhrnné techniky pro snížení spotřeby elektrické energie a jejího efektivního využívání. Mezi tyto techniky můžeme počítat používání spotřebičů s nízkou spotřebou (osvětlení, vytápění, chlazení, atd.) nebo také zlepšení prezentace a vizualizace spotřeby a cen elektřiny, jež může vést ke změnám návyků spotřebitele a tím ke snížení spotřeby.

Možné implementace systémů řízení poptávky v praxi mohou být založeny například na flexibilní ceně 1 MWh elektrické energie během dne. Takto implementované systémy mohou představit podle [2] následující cenová schémata:

1. **Time of Use (ToU)** – cena za 1 MWh je závislá na časovém období během dne. Ceny v jednotlivých časových obdobích odrážejí cenu výroby a přenosu a distribuce elektřiny během dne. Obvykle jsou ceny pro jednotlivá časová období stanovena 24 hodin dopředu.
2. **Real-time pricing (RTP)** – cena za 1 MWh je závislá na aktuálním stavu sítě, cenách výroby a přenosu a distribuce a během dne může v hodinových (0,5hodinových) cyklech nabývat různých hodnot. Ceny mohou být stanoveny s 24hodinovým, ale i jen hodinovým předstihem.
3. **Critical peak pricing (CPP)** – kombinace ToU a RTP. Cena za 1 MWh v kritických obdobích, jež nejsou dopředu známa, může být až několikanásobně větší než cena obvyklá. V kritických případech zatížení sítě může toto schéma vést k razantnímu snížení spotřeby a tím stabilizaci sítě.

### Analytické nástroje pro řízení poptávky

Výše představený koncept pro řízení poptávky předpokládá s využitím všech dostupných komponent SG. Jednou z těchto komponent jsou různé softwarové nástroje a analytické metody, jež napomáhají správnému chodu SG.

1. **Modelování** – modelovány jsou nejen aktivní prvky sítě (transformátory, kompenzační kondenzátory, distribuované zdroje a další), ale také jejich vzájemné chování v rámci sítě. Příkladem takového modelu je model toku proudu sítě.
2. **Predikce zatížení** – predikce a estimace zatížení sítě můžeme z časového hlediska rozdělit na krátkodobé (1 hodina až 1 týden), střednědobé (1 týden až 1 rok) a dlouhodobé (1 rok) a z hlediska územního rozsahu na regionální předpověď (rozsáhlé území) a uzlovou předpověď (konkrétní distribuční uzel SG).

3. **Predikce výroby** – úzce souvisí s obnovitelnými zdroji elektrické energie, jako jsou fotovoltaické a větrné elektrárny, jejichž výrobní výkon je přímo závislý na přírodních podmínkách. Díky hodnotám predikovaného výrobního výkonu může SG správně reagovat a nastavovat některé své parametry.
4. **Odhad stavu** – i přes zvýšený počet naměřených dat a získaných informací není možné plně celý systém SG popsat a pro zajištění plné pozorovatelnosti systému a tím i jeho plné říditelnosti musí být některé parametry systému odhadovány. K tomuto účelu slouží právě estimační metody.
5. **Optimalizační metody** – tyto metody mohou být v jednotlivých částech SG implementovány k rozdílným účelům – optimalizace rozmístění lokálních zdrojů, velikosti kapacit úložišť, spotřeby, nákladů na spotřebu a další. Pro optimalizaci nákladů za elektřinu mohou být použity například metody dynamického programování, zpětnovazebního učení a mnohé další. Jeden obecný příklad optimalizace spotřeby, jež využívá metody dynamického programování, je popsán v kapitole 3.

### Hardwarové prostředky pro řízení poptávky

Další z komponent důležitých pro správný chod řízení poptávky souvisí s fyzickým řízením konkrétních spotřebičů. Jedná se o hardware a hardwarová řešení, která mají fyzické řízení na starost. Některá HW řešení, jež souvisejí se SG, jsou samostatně popsána v samotné kapitole 2.5.3. Konkrétních řešení existuje celá řada, zde jsou uvedeny ty nejzmiňovanější v [2], [3], [4] a [5].

1. **Spínače zátěže** – zařízení umožňující vzdálené spínání spotřebičů. Obvykle spínají elektrická topení, akumulární ohříváče vody nebo klimatizační jednotky.
2. **Ovladatelné termostaty** – zařízení, jež rozšiřuje funkčnost klasických termostatů o komunikační modul a umožňuje tím vzdáleně nastavovat požadovanou teplotu. Snížením požadované teploty dochází ke snížení spotřeby elektrické energie.
3. **Regulátory osvětlení** – zařízení pro regulaci spotřeby světelných prvků. Tyto zařízení jsou nejvíce využitelné ve velkých komerčních budovách a komplexech. Mohou zde být implementovány například funkce regulace osvětlení v závislosti na přírodním světle nebo časový plán osvětlení a další.
4. **Adjustable Speed Drives (ASDs)** – zařízení pro regulaci otáček elektrických motorů umístěných v čerpadlech, ventilačních jednotkách, kompresorech a dalších zařízeních. Vyjmenovaná zařízení jsou schopna fungovat v rozmezí od nízkých až do maximálních otáček. Snížením otáček dochází i ke snížení spotřebované elektrické energie.

### 2.5.3 Výkonová elektronika a energetická úložiště

Narůstající hodnota přenášeného výkonu v rozvodné síti, zvyšující se počet distribuovaných zdrojů, nároky na udržení parametrů rozvodné sítě a snaha o zefektivnění přenosu energie mají za následek vývoj nových a vylepšení stávajících výkonových technologií. Získávání energie z obnovitelných zdrojů a možnosti jejího ukládání jsou další odvětví, která k těmto technologiím také patří.

## Parametry sítě

Kolísání a stabilita napětí, přítomnost vyšších harmonických a podíl přenášeného jalového výkonu jsou všechno parametry rozvodné sítě, jež mají vliv na kvalitu dodávané elektřiny a je nutné je kompenzovat. Tyto kompenzační technologie pro řízení toku činného a jalového výkonu se souhrně nazývají FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) [2]. Některé z těchto systémů jsou:

1. SVC – Statický kompenzátor (Static Var Compensator)
  - a) TCR – Tyristorově řízená tlumivka (Thyristor Controlled Reactor)
  - b) TSC – Tyristorově spínaný kondenzátor (Thyristor Switched Capacitor)
  - c) MSC/MSR – Mechanicky spínaný kondenzátor/reaktor (Mechanically Switched Capacitor or Reactor)
2. STATCOM – Statický synchronní kompenzátor (Static Synchronous Compensator)
3. TCSC – Tyristorově řízený sériový kompenzátor (Thyristor Controlled Series Compensator)
4. UPFC – Univerzální regulátor výkonu (Unified Power Flow Controller)

## High Voltage Direct Current (HVDC)

S narůstajícím podílem OZE na celkovém množství vyrobené elektřiny dochází k budování velkých decentralizovaných zdrojů vzdálených od míst spotřeby většinou stovky, případně až tisíce kilometrů. Pro tyto případy přenosů se technologie HVDC hodí více než klasické střídavé sítě UVN či VVN. Vysokonapět'ový stejnosměrný přenos je s ohledem na nižší ztráty a vyšší stabilitu výhodnější [17].

## Obnovitelné zdroje energie

Na získávání maximálního výkonu elektrické energie z OZE (fotovoltaické, vodní, větrné) je navázáno mnoho technologických řešení, zde jsou příklady některých z nich:

1. DC-DC konvertory pro MPPT (Maximum Power Point Tracking) – napět'ové konvertory zajišť'ují maximální využití výkonu solárních panelů
2. DFIG (Double Fed Induction Generators) asynchronní generátory s dvojitě napájeným vinutím pro větrné elektrárny
3. Větrné elektrárny s vertikální osou rotace
4. Vlnové a přílivové elektrárny
5. Fotovoltaické panely s vysokou účinností

## Ukládání energie

Vývoj a výzkum nových, efektivních a finančně dostupných způsobů pro ukládání elektrické energie je důsledkem kolísavé dodávky výkonu z některých OZE a její nesynchronnosti s trendem poptávky. Nejvýznamnější způsoby ukládání energie dle [2], [18] jsou:

1. Baterie

- a) NaS – velkokapacitní sodíkovo-sírová baterie s provozní teplotou 300-400 °C a tekutými elektrodami. Často jsou používány jako kompenzační jednotky pro fotovoltaické a větrné elektrárny. Kapacita celého kompenzačního systému může dosahovat až řádu MWh.
  - b) Li-ion – díky vývoji efektivnějších typů li-ion baterií pro použití v automobilovém průmyslu a plánované masové produkci má potenciál stát se cenově nej dostupnějším způsobem ukládání energie pro malé a střední odběratele.
  - c) Flow baterie – stejně jako konvenční baterie se skládá ze záporné a kladné elektrody a elektrolytu, ten je však rozdělen na negativní a pozitivní a uskladněn do dvou velkých vnějších nádrží. Každá nádrž má své čerpadlo a vhání elektrolyty do reaktoru, kde přes iontoměničovou membránu probíhá chemická reakce. Kapacita se odvíjí od objemu elektrolytu, dosahuje až řádu MWh.
2. Přečerpávací vodní elektrárny – voda je čerpána ze spodní nádrže do horní nádrže, přičemž dochází ke spotřebě elektrické energie. Následně je v době špičky voda vpuštěna do přívodních potrubí, kde pohání turbínu, která je hřídelí spojena s generátorem, jež generuje elektrický výkon.
  3. Uskladnění energie v podobě tepla – nejčastější implementací ukládání elektrické energie v podobě tepla je akumulace tepla do tekutého nebo pevného média pro pozdější využití. Akumulace teplé vody v akumulacích nádrží a její následné využití pro ohřev užitkové vody nebo vytápění je jedním z příkladů, jež je využito i při vlastní realizaci SG blíže popsány v kapitole 4.
  4. Superkapacitory – elektrina je akumulována v elektrostatickém poli mezi dvěma elektrodami. Tato technologie umožňuje rychlé ukládání a vypuštění elektrické energie.
  5. Supravodivé cívky – uskladnění elektrické energie v magnetickém poli, které je vytvořeno průchodem stejnosměrného proudu supravodivou cívkou.

# 3 Obecná úloha optimalizace spotřeby energie

V konceptu SG, který je plně popsán výše, představuje optimalizace spotřeby jednu z mnoha klíčových rolí. Faktory jako jsou nové proměnlivé ceny za energii, nestálost dodávky výkonu OZE, nové možnosti akumulace elektrické energie, aktuální odebíraný a dodávaný výkon změřený inteligentními měřiči, chytré spotřebiče s možností ovládání příkonu a úroveň komfortu lidského života musí takový optimalizační algoritmus brát v potaz. Jedním z možných řešení takové optimalizační úlohy může být „The Energy Box” představený v [6].

## 3.1 Energy Box

Koncept „Energy Box” ukazuje jeden z obecných pohledů na možnost optimalizace spotřeby. Tento koncept je založen na metodě dynamického programování. Pro bližší seznámení s problematikou optimalizace je níže uvedena obecná formulace dynamického programování a základní myšlenka návrhu řešení.

### 3.1.1 Dynamické programování

Dynamické programování představuje nástroj pro hledání řešení optimalizačních úloh. Počátek dynamického programování spadá do přelomu 50. a 60. let 20. století a je spojen se jménem Richard E. Bellman. Tento optimalizační nástroj má široké uplatnění od operační analýzy, přes detekci chyb, až po automatické řízení. Základní myšlenku tvoří rozklad složitého problému na dílčí podproblémy. Dynamické programování je založeno na zhodnocení kompromisu mezi minimalizací (resp. maximalizací) aktuálních a budoucích ztrát (resp. zisku). V případě řízení systému inteligentní budovy může být obvyklým požadavkem minimalizace ztrát, které se odvíjí od ceny elektrické energie nebo od hranice komfortu uživatele domácnosti. Zároveň zde existuje nejistota týkající se vývoje ceny elektrické energie nebo například vývoje počasí. Z těchto důvodů bude v této části uvažován případ, kdy úkolem je minimalizovat předem definované ztráty a zároveň systém respektuje neurčitost. Navíc v [6] je uvažována úloha na konečném časovém horizontu řízení, což z hlediska úlohy optimalizace nákladů pro inteligentní dům představuje návrh řízení pro pevně daný časový úsek, například den nebo týden.

Nechť se v časovém okamžiku  $k = 0, 1, \dots, F$  nachází systém ve stavu  $\mathbf{x}_k \in \mathcal{X}$ . V závislosti na stavu  $\mathbf{x}_k$  systém automatického řízení vygeneruje řízení  $\mathbf{u}_k \in \mathcal{U}$  vstupující do systému. Poté ztráta způsobená aplikací vstupu  $\mathbf{u}_k$  pro stav  $\mathbf{x}_k$  je dána ztrátovou funkcí  $Z_k : \mathcal{X} \times \mathcal{U} \mapsto \mathbb{R}^+$ , která vrací skalární hodnotu. Ztrátová funkce se může měnit v čase v závislosti na dalších faktorech. Závislost budoucího stavu  $\mathbf{x}_{k+1}$  na současném stavu  $\mathbf{x}_k$  a současném řízení  $\mathbf{u}_k$  je obecně dána přechodovou funkcí  $\mathbf{f}_k : \mathcal{X} \times \mathcal{U} \mapsto \mathcal{X}$ , neboli

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k). \quad (3.1)$$

Funkce  $\mathbf{f}_k$  může být definována stavovým modelem nebo například maticí pravděpodobností přechodů v případě diskrétního stavového prostoru a prostoru řízení s konečným



počtem stavů a řízení. Je také nutné poznamenat, že  $\mathbf{f}_k$  může být časově proměnná funkce, jelikož se chování systémů může v čase měnit. Konečně, úkolem je najít pravidlo řízení, které minimalizuje celkové očekávané ztráty na daném horizontu řízení.

Základní stavební kámen dynamického programování tvoří tzv. princip optimality [9], který definuje vlastnosti optimální strategie řízení. Optimální strategie řízení má takovou vlastnost, že ať se systém nachází v jakémkoliv stavu a je zvoleno jakékoliv prvotní řízení, zbytek řízení musí představovat optimální strategii vzhledem ke stavu, který pramenil z prvotního rozhodnutí. Pojem strategie je vysvětlen v následujícím odstavci.

Úkolem optimalizačních úloh je minimalizace nějakého vhodně zvoleného kritéria kvality, které ohodnotí posloupnost stavů a řízení na konečném horizontu řízení. Necht' je tedy definováno kritérium optimality jako

$$J = \mathbb{E} \left\{ \sum_{\tau=0}^F Z_{\tau}(\mathbf{x}_{\tau}, \mathbf{u}_{\tau}) \right\}, \quad (3.2)$$

kde  $\mathbb{E}\{\cdot\}$  je operátor střední hodnoty. Matematicky zapsáno je tedy hlavním cílem najít takový řídicí zákon  $\boldsymbol{\pi}$ , který v každém časovém okamžiku  $k$  poskytuje takové řízení, jež minimalizuje kritérium optimality (3.2),

$$\min_{\boldsymbol{\pi}} J. \quad (3.3)$$

Strategie řízení  $\boldsymbol{\pi} = \{\boldsymbol{\pi}_0, \boldsymbol{\pi}_1, \dots, \boldsymbol{\pi}_F\}$  představuje posloupnost funkcí  $\boldsymbol{\pi}_k : \mathcal{X} \mapsto \mathcal{U}$ , které generují příslušné optimální řízení  $\mathbf{u}_k = \boldsymbol{\pi}_k(x_k)$ . Bellmanova funkce  $V_k : \mathcal{X} \mapsto \mathbb{R}$  definuje minimální očekávané ztráty konečného úseku řízení. V důsledku principu optimality a vlastnosti Bellmanovy funkce je možné sestavit následující rekurzivní rovnici, tzv. Bellmanovu optimalizační rekurzi,

$$V_k(\mathbf{x}_k) = \min_{\mathbf{u}_k \in \mathcal{U}} \mathbb{E}\{Z_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + V_{k+1}(\mathbf{x}_{k+1}) | \mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k\}, \quad (3.4)$$

kde  $k = F, F-1, \dots, 1, 0$ . V případě, že by přechod mezi stavy systému v závislosti na řízení byl deterministický, pak střední hodnota může být vynechána. Zároveň je nutné poznamenat, že řešení rovnice (3.4) využívá rekurzivního posunu od konečného časového okamžiku  $F$  až do počátku časového úseku. V důsledku Bellmanovy optimalizační rekurze pak optimální řízení vyhovuje

$$\mathbf{u}_k = \boldsymbol{\pi}_k(\mathbf{x}_k) = \arg \min_{\mathbf{u}_k \in \mathcal{U}} \mathbb{E}\{Z_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + V_{k+1}(\mathbf{x}_{k+1}) | \mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k\}. \quad (3.5)$$

Strategie řízení  $\boldsymbol{\pi}$  tedy minimalizuje předem definované kritérium  $J$ .

### 3.1.2 Aplikace na SG

Tato část propojuje teoretickou rovinu spojenou s dynamickým programováním se systémem řízení spotřeby elektrické energie, jak jej definuje [6]. V úloze optimalizace nákladů elektrické energie v SG mohou stav, řízení, ztrátová funkce, přechodová funkce a strategie řízení představovat následující veličiny.

1. Stav  $\mathbf{x}_k$  může být tvořen souborem atributů spotřebičů elektrické energie stejně tak, jako atributy inteligentní sítě a okolními meteorologickými podmínkami. Struktura stavu může být tedy definována jako

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k^d \\ \mathbf{x}_k^s \\ \mathbf{x}_k^p \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

kde  $\mathbf{x}_k^d$  je vektorová složka stavu představující stav domácnosti zahrnující elektrické spotřebiče,  $\mathbf{x}_k^s$  je vektorová složka stavu inteligentní sítě, ze které je odebírána elektrická energie a  $\mathbf{x}_k^p$  je vektorová složka stavu zahrnující meteorologické podmínky.

2. Vstupní signál do systému, neboli řízení, je tvořen souborem atributů, které určují pokyny týkající se využití elektrické energie. Ta může být odebírána ze sítě, ukládána do zařízení pro ukládání energie a nebo naopak dodávána zpět do sítě. Pro tyto účely může být postačující uvažovat následující strukturu vstupu

$$\mathbf{u}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_k^- \\ \mathbf{u}_k^0 \\ \mathbf{u}_k^+ \end{bmatrix}, \quad (3.7)$$

kde  $\mathbf{u}_k^-$  je vektorová složka vstupu shrnující veškeré kroky vedoucí ke spotřebě elektrické energie,  $\mathbf{u}_k^0$  je vektorová složka vstupu představující veškeré kroky vedoucí k uložení elektrické energie a  $\mathbf{u}_k^+$  je vektorová složka vstupu vedoucí k prodeji elektrické energie.

3. Ztrátová funkce může být tvořena kompromisem mezi dvěma základními prvky: cenou elektrické energie a komfortem spotřebitele. Odebírání elektrické energie ze sítě představuje vynaložení finančních prostředků, neboli zatížení rozpočtu. Naopak dodáváním elektrické energie do sítě jsou finanční prostředky získány. Avšak je nutné uvažovat neustále se měnící prodejní a výkupní ceny energie. Navíc, v případě snížení komfortu uživatele mohou být zásadně sníženy finanční výdaje. Je nutné ale doplnit, že v případě dobře navrženého řídicího algoritmu může dojít k zachování požadovaného standardu při minimálních finančních výdajích. Ztrátovou funkci je možné definovat jako vážený součet dílčích složek

$$Z_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) = \alpha Z_k^k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + (1 - \alpha) Z_k^n(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k), \quad (3.8)$$

kde  $\alpha \in [0; 1]$  je pevně zvolená váha,  $Z_k^k \in \mathbb{R}^+$  představuje náklady spojené s komfortem uživatele a  $Z_k^n \in \mathbb{R}^+$  představuje náklady spojené se spotřebou a cenou elektrické energie. V závislosti na  $\alpha$  je možné nastavit kompromis mezi uvedenými dvěma požadavky. Pokud  $\alpha = 1$ , je plný důraz kladen pouze na komfort uživatele bez ohledu na finance, které uživatel zaplatí. Naopak v případě  $\alpha = 0$  je plný důraz kladen na finanční úspory a komfort uživatele je postaven stranou.

4. Funkce systému zahrnuje veškeré dílčí systémy spojené s řízením inteligentního domu. Každý z dílčích systémů je dále možné rozdělit do dalších úrovní.
  - a) V případě systému samotné domácnosti je možné například uvažovat systém představující vývoj teploty v místnostech v závislosti na otáčení termostatu, systém spotřeby energie jednotlivých spotřebičů, jako je pračka nebo veškeré osvětlení nebo systém ukládání elektrické energie do zásobníků.
  - b) Dalším podsystémem, který tvoří celý řízený systém, je inteligentní síť. Systém inteligentní sítě může dále tvořit například systém definující vývoj cen nebo systém definující aktuální dostupnou energii.
  - c) Systém samotné domácnosti a systém inteligentní sítě je ovlivňován systémem meteorologických podmínek.

Celkovou funkci systému  $\mathbf{f}_k$  je tedy možné definovat pomocí dílčích složek  $\mathbf{f}_k^d$ ,  $\mathbf{f}_k^s$ ,  $\mathbf{f}_k^p$ , kde  $\mathbf{f}_k^d$  modeluje systém domácnosti,  $\mathbf{f}_k^s$  modeluje systém inteligentní sítě a  $\mathbf{f}_k^p$  modeluje systém počasí. Dílčí složky mohou mít opět stochastický charakter respektující neurčitost v systému a při modelování.

Pro zjednodušení je možné předpokládat, že systém inteligentní sítě a systém počasí není ovlivněn akčními zásahy, neboli řízenými vstupy  $\mathbf{u}_k$ , které ovlivňují pouze systém samotné domácnosti. Matematický zápis tohoto předpokladu je možné zapsat jako

$$\mathbf{x}_{k+1}^d = \mathbf{f}_k^d(\mathbf{x}_k^d, \mathbf{u}_k^-, \mathbf{u}_k^0, \mathbf{u}_k^+), \quad (3.9)$$

$$\mathbf{x}_{k+1}^s = \mathbf{f}_k^s(\mathbf{x}_k^s), \quad (3.10)$$

$$\mathbf{x}_{k+1}^p = \mathbf{f}_k^p(\mathbf{x}_k^p). \quad (3.11)$$

5. Strategie řízení  $\pi$  plní funkci optimálního regulátoru a rozhoduje o akčních zásahách v systému. Jejím vstupem je stav systému složený ze všech uvažovaných dílčích složek  $\mathbf{x}_k^d, \mathbf{x}_k^s, \mathbf{x}_k^p$ . Výstupem strategie řízení jsou akční zásahy v podobě kroků  $\mathbf{u}_k^-$  vedoucích ke spotřebě elektrické energie například zapnutím bojleru, kroků  $\mathbf{u}_k^0$  vedoucích k uložení elektrické energie například povel k nabíjení baterie, a kroků  $\mathbf{u}_k^+$  vedoucích k prodeji elektrické energie neboli povel k dodávání elektrické energie do distribuční sítě.

### 3.1.3 Reálná implementace

Reálná implementace tohoto optimalizačního algoritmu v lokalitě rodinné domu vybaveného solární elektrárnou však naráží na problémy spojené s přesným určením modelů systému (model venkovních a vnitřních teplot, model cen elektřiny, model dodávky elektřiny z OZE). Dalším problémem je fakt, že implementace dynamického programování není triviální. Hlavní problém, který značně ovlivňuje složitost úlohy, spočívá v tzv. prokletí rozměrnosti (dimenzionality) [10]. Jedná se o jev, který vychází na povrch v mnoha vědeckých disciplínách. Z hlediska dynamického programování způsobují prokletí rozměrnosti hlavně dva faktory: velikost stavového prostoru a velikost prostoru řízení.

# 4 Úloha optimalizace využití fotovoltaické elektrárny

Tato část práce se zabývá důvody, proč je žádoucí zabývat se optimalizací využití elektrické energie vyrobené solární elektrárnou, v jakém stavu je současné řešení a v poslední části je formulována konkrétní zjednodušená úloha optimalizace.

## 4.1 Motivace

Hlavní, ale ne jedinou motivací pro řešení této úlohy, je požadované snížení finančních nákladů za elektrickou energii. V tabulce 4.1 jsou pro představu uvedeny jednotlivé složky, které se podílejí na měsíčních nákladech za elektrickou energii. V posledním sloupci jsou uvedeny aktuální ceny využívaného tarifu zmiňovaného rodinného domu. U složek, které

	<b>Položka</b>	<b>Způsob účtování</b>	<b>Cena [Kč]</b>
<b>Související služby</b>	spotřeba VT	za MWh	219
	spotřeba NT	za MWh	68
	systémové služby	za MWh	100
	podpora OZE	za MWh	495
	činnost OTE	měsíční	7
	instalovaný příkon	měsíční	260
<b>Dodávka elektřiny</b>	spotřeba VT	za MWh	1648
	spotřeba NT	za MWh	1254
	daň z elektřiny	za MWh	28

Tabulka 4.1: Složení nákladů za elektřinu, zdroj: vyúčtování dodavatele elektřiny

jsou účtovány měsíčně, nejsou kromě možnosti změny tarifu či distributora žádné možnosti optimalizace. Složky, které jsou účtovány za skutečně odebranou elektrickou energii však představují potenciál pro jejich aktivní snížení. Nástrojem pro snížení odběru elektrické energie může být právě optimální využití vyráběné energie fotovoltaické elektrárny. Fotovoltaická elektrárna uvažovaná v této práci je zapojena do sítě jako státem podporovaný zdroj v tzv. režimu „zelený bonus“. V tomto režimu je provozovateli FVE vyplácena podpora za vyrobenou energii nezávisle na tom, jak je tato energie využita. Elektřina může být lokálně spotřebována (v tom případě je její cena za MWh nulová – při neuvažování pořizovacích nákladů na výstavbu FVE) nebo prodána distributorovi (v případě připojení FVE v podporovaném režimu jsou výkupní ceny velmi nízké, cca. 0,40 Kč/kWh). Dalším potenciálem, jak optimalizovat náklady, je rozdělení cen elektřiny na vysoký a nízký tarif (VT a NT). Pokud by bylo možné zajistit minimální, v nejlepším případě nulový odběr z vysokého tarifu jeho přesunutím do tarifu nízkého, docílili bychom tím také snížení nákladů.

Osobní motivací pro vypracování této úlohy je i snaha o vylepšení řešení, jež bylo realizováno v rámci bakalářské práce [21] vzhledem k jeho neúplné funkčnosti a současné

ne použitelnosti (kvůli změnám uvedeným v části 5.1), proto je i další motivací nabídnutí prostředků a nástrojů pro snazší a jednodušší správu některých domácích spotřebičů a pro zachování alespoň částečného komfortu lidského života v případě přerušení dodávky elektrické energie, kdy není možné využít fotovoltaickou elektrárnu v „ostrovním režimu“.

## 4.2 Původní stav

V této části je popsán původní stav všech důležitých částí rodinného domu, jež jsou součástí elektrické rozvodné sítě, aspektů souvisejících s možností využití energie získané solární elektrárnou a je zde také popsáno původní implementované řízení, jež bylo navrženo v minulosti v rámci vypracování bakalářské práce a důvody, proč je nyní nevyhovující.

### 4.2.1 Fotovoltaická elektrárna



(a) FVE Střecha



(b) FVE Stěna



(c) Invertory Piko 5.5

Obrázek 4.1: Solární elektrárna, zdroj: vlastní zpracování

Solární elektrárna (výrobna elektrické energie) s celkovým výkonem 9 920 W je složená ze dvou odlišně koncipovaných solárních polí (obrázek 4.1). První solární pole (1. zdroj) s monokrystalickými solárními panely o výkonu 5 760 W je konvenčně umístěno na střeše parkovacího stání (obrázek 4.1a). Druhé solární pole (2. zdroj) o výkonu 4 160 W, složené z tenkovrstvých panelů, je umístěno na stěně garážového stání orientovaného západojihozápadním směrem (obrázek 4.1b). I přes neideální umístění poskytuje tato solární stěna dostatečný výkon díky tenkovrstvým panelům, jež mají větší citlivost na rozptýlené světlo. Tato kombinace poskytuje plošší charakteristiku výkonu v závislosti na denní době. Každé pole je připojeno ke svému střídači Piko 5.5 [19] (obrázek 4.1c). Původní datové spojení prvního z měničů Piko 5.5 bezdrátovým spojem bylo během výstavby nové elektrárny odstraněno a během realizace návrhu řešení, které je blíže popsáno v kapitole 5, bylo nahrazeno drátovým spojením datovým kabelem.

### 4.2.2 Spotřebiče

Na druhé straně bilance elektrické energie, stojí všechny domácí spotřebiče, které ji spotřebovávají. V tabulce 4.2 je uveden seznam spotřebičů, kterými disponuje rodinný dům, pro něž je řešení uvedené v kapitole 5 realizováno.

#### Neovladatelné spotřebiče

Neovladatelnými spotřebiči jsou myšleny ty spotřebiče, které z hlediska jejich charakteru používání není možné programově řídit za účelem snížení spotřeby elektrické energie.

Spotřebič	Příkon [W]
Tepelné čerpadlo	6500
Varná deska	5500
Pečící trouba	2500
Bojler	2000
Rychlovarná konvice	2000
Pračka	1500
Myčka	1500
Bazénové čerpadlo	750
Osvětlení	500
Televizor	200
Počítače	400
Ostatní	1000

Tabulka 4.2: Seznam spotřebičů s jejich maximálním příkonem, zdroj: vlastní zpracování

V rámci rodinného domu se jedná o následující spotřebiče: varná deska, pečící trouba, osvětlení, počítač, televizor a některé další spotřebiče spadající do kategorie „ostatní“ jako například rádio, mikrovlnná trouba, lednice a mrazák.

### Ovladatelné spotřebiče

Ovladatelnými spotřebiči jsou myšleny ty spotřebiče, které je možné z hlediska jejich charakteru používání programově řídit za účelem snížení spotřeby elektrické energie. V rámci rodinného domu se jedná o následující spotřebiče: bojler pro ohřev užitkové vody, tepelné čerpadlo při ohřevu bazénové vody v letním období, tepelné čerpadlo při vytápění rodinného domu v zimním období, oběhové čerpadlo bazénové filtrace a pračka.

Bojler jsou v rodinném domě umístěny celkem dva. Oba dva bylo možné v původní implementaci ovládat způsobem VYP/ZAP. Jedná se o bojler s jednofázovými topnými tělesy – každým o výkonu 2000 W. Vzhledem k vyhlášce 82/2011 Sb., o měření elektřiny a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru [20], paragrafu 6, bodu 6, dochází u nových instalací nebo měněných měřicích zařízení v třífázové soustavě k vyhodnocování směru toku elektřiny v *jednotlivých* fázích. Vzhledem ke změně měřicího zařízení při instalaci druhé solární elektrárny dopadá vyhláška i na tento rodinný dům. V praxi znění vyhlášky znamená, že výpočet hodnoty energetické bilance nemůže být proveden součtem toků energie v jednotlivých fázích, ale musí být řešen pro každou fázi zvlášť. Původní způsob měření toku energie uvažoval sumu všech fází a ne jednotlivé fáze, vzhledem k tomu není již toto realizované ovládání efektivní a pro zamýšlenou optimalizaci použitelné, neboť s rozdělením výkonu mezi jednotlivé fáze nekalkuluje.

Pračka představuje spotřebič, který během svého funkčního cyklu mění svůj aktuální příkon vzhledem k aktuálním vykonávaným úkonům. Jedná se například o následující úkony a jejich možné příkony: ohřev vody 1500 W, máchání prádla 300 W a ždímání 600 W. Na tyto změny v příkonu by mělo případné řízení spotřebičů reagovat. Možnosti ovládání pračky jsou velice omezené vzhledem k tomu, že není možné prací cyklus přerušit, neboť by mohlo dojít ke snížení kvality vyprání nebo zničení praného oblečení dlouhým kontaktem s pracími prostředky. Díky tomu jediné možné řízení, které pro pračku připadá v úvahu, je programově říditelná doba zapnutí pracího cyklu.

Tepelné čerpadlo používané v zimním období pro vytápění rodinného domu je v současné době řízeno programovatelným prostorovým termostatem, který spíná chod čerpadla. Teplota topné oběhové vody je řízena ekvitermní regulací v závislosti na vnější

teplotě.

Tepelné čerpadlo používané v letním období pro ohřev bazénové vody je v současné době ovládáno manuálně v závislosti na požadavku ohřevu bazénu. Řízení bere v potaz přebytkovou elektrickou energii pouze částečně, kdy ohřev bazénu není zapínán přes noc, ale v denním čase a to podle času, možností a požadavku majitele.

Bazénové čerpadlo pro filtraci je ovládáno podobným způsobem jako ohřev bazénové vody, tedy spínáno manuálně v denní době na rozdílně dlouhé doby.

## 4.3 Formulace úlohy

Vzhledem k problémům s přesným určením modelů a implementací dynamického programování, které byly nastíněny v části 3.1.3, zjednodušíme formulaci úlohy na případ, kdy budeme uvažovat, že chceme optimálně řídit pouze topný výkon obou bojlerů a režim nabíjení baterií. Akumulovaná energie v bojlerech ve formě teplé užitkové vody je spotřebovávána při mytí, vaření a dalších činnostech (problémy spojené s akumulací energie ve formě tepla jsou následně popsány v části 5.6). Akumulovaná energie v bateriích je spotřebovávána při svícení ve večerních a nočních hodinách (problémy spojené s akumulací energie do baterií jsou následně popsány v části 5.7). Pro splnění požadavku vyhodnocení výkonu v jednotlivých fázích (přesněji popsáno v části 4.2.2) budeme zjednodušeně uvažovat, že celkový výkon fotovoltaické elektrárny je rovnoměrně rozdělen mezi jednotlivé fáze (přesný popis rozdělení výkonu do jednotlivých fází je popsán v části 5.3). Můžeme také uvažovat, že požadovaný řídicí výkon topných těles bojlerů a nabíjecí výkon baterií je rovnoměrně rozdělen mezi všechny tři fáze, vzhledem k realizaci výkonového řízení, které je uvedeno v částech 5.6 a 5.7. Protože jsou další neovladatelné spotřebiče fyzicky zapojeny na jednotlivé různé fáze, budeme uvažovat jejich souhrnný výkon jako rovnoměrně rozdělený mezi jednotlivé fáze. Zároveň nebude pro jednoduchost při modelování uvažována neurčitost, například v důsledku různých meteorologických podmínek nebo nepřesnosti modelu.

Pro nalezení optimální strategie řízení  $\pi$  pro bojlerů a nabíjení baterií je třeba vhodně stanovit složky stavu  $\mathbf{x}_k$ , složky řízení  $\mathbf{u}_k$ , vhodnou ztrátovou funkci  $Z_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)$  a celkovou funkci systému  $\mathbf{f}_k$ , která definuje chování systému v závislosti na  $\mathbf{u}_k$  a  $\mathbf{x}_k$ . Horizont řízení budeme uvažovat stejný jako je ten představený v [6], tedy 24 hodin – od půlnoci do půlnoci s periodou vzorkování 1 hodina.

### 4.3.1 Stav

Vektor stavu  $\mathbf{x}_k$ :

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k^d \\ \mathbf{x}_k^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k^{d1} \\ x_k^{d2} \\ x_k^{d3} \\ x_k^{d4} \\ x_k^{d5} \\ x_k^{s1} \\ x_k^{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Výkon elektrárny}_k \\ \text{Neovladatelná spotřeba}_k \\ \text{Energie baterie}_k \\ \text{Energie bojler 1}_k \\ \text{Energie bojler 2}_k \\ \text{Cena vykupu}_k \\ \text{Cena nakupu}_k \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

je složen ze dvou vektorů  $\mathbf{x}_k^d$  a  $\mathbf{x}_k^s$ . Složky vektoru  $\mathbf{x}_k^d$  zahrnují stavy, které souvisejí se samotným rodinným domem a složky vektoru  $\mathbf{x}_k^s$  souvisejí s elektrickou rozvodnou sítí.

Aktuální vyráběný výkon elektrárny reprezentuje hodnota  $x_k^{d1}$  a výkon spotřebičů, které nelze ovládat je  $x_k^{d2}$ . Elektrická energie akumulovaná v bateriích je  $x_k^{d3}$ . Energie akumulovaná v podobě tepla v prvním a druhém bojleru je  $x_k^{d4}$  a  $x_k^{d5}$ . Cena za přebytkovou

elektrickou energii, která není lokálně spotřebována a je předána do distribuční sítě, je dána hodnotou  $x_k^{s1}$ . Cena nakupované elektrické energie pro případy, kdy není dostatek elektrické energie ze solární elektrárny, je  $x_k^{s2}$ .

### 4.3.2 Řízení

Vektor řízení  $\mathbf{u}_k$ :

$$\mathbf{u}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_k^t \\ \mathbf{u}_k^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_k^{1t} \\ u_k^{2t} \\ u_k^{1e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Řidici výkon bojler 1}_k \\ \text{Řidici výkon bojler 2}_k \\ \text{Nabijeni baterii}_k \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

je složen ze dvou vektorů  $\mathbf{u}_k^t$  a  $\mathbf{u}_k^e$ . Řízení vedoucí k uložení elektrické energie ve formě tepla je obsaženo v  $u_k^{1t}$  a  $u_k^{2t}$  a řízení vedoucí k uložení elektrické energie do baterií je  $u_k^{1e}$ .

### 4.3.3 Model systému

V této části jsou popsány zjednodušené modely, které zachycují funkci systému a jsou navrženy obdobným způsobem, který je ukázán v [7].

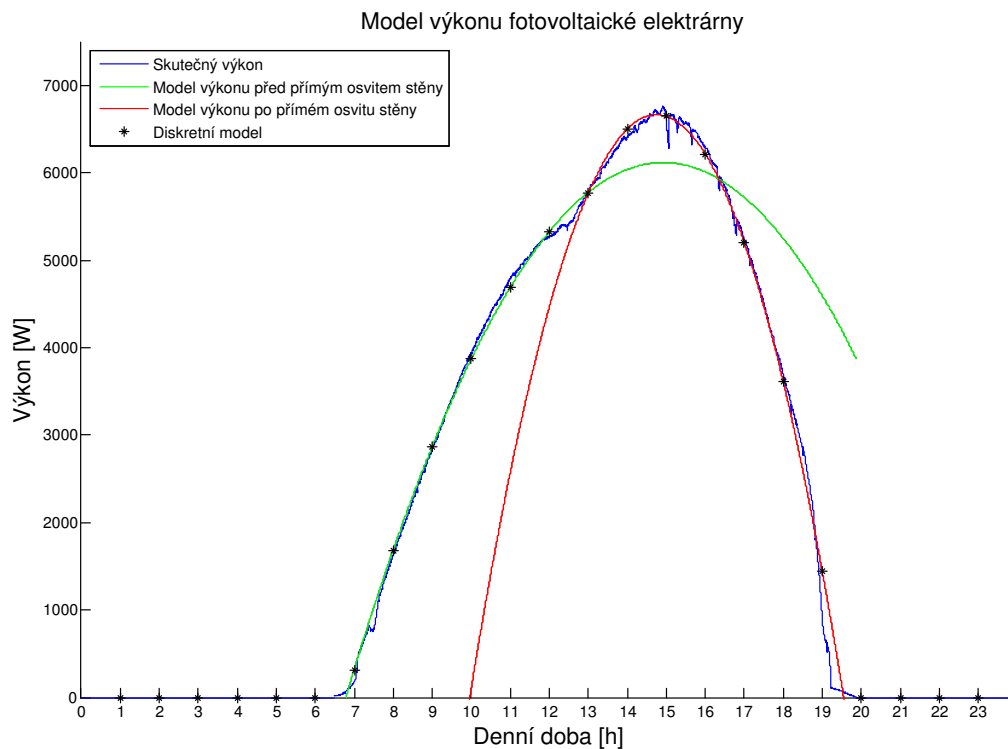
#### Výkon elektrárny

Model denního vývoje výkonu fotovoltaické elektrárny instalované v rodinném domě je závislý na mnoha faktorech. Ty nejvýznamnější z nich jsou roční období, okolní teplota a počasí. V závislosti na dni v roce se mění parametry denního pohybu Slunce vůči místu, kde je solární elektrárna umístěna. Mezi tyto parametry patří úhel dopadajících slunečních paprsků vzhledem k solárním panelům, intenzita slunečních paprsků nebo čas východu a západu Slunce. Okolní teplota ovlivňuje účinnost samotných fotovoltaických panelů a aktuální zamračení oblohy může mít za následek dočasné snížení výkonu.

Model vývoje výkonu během dne lze rozdělit do čtyř časových období, které je možné parametrizovat v závislosti na ročním období. Jedná se o následující čtyři období:

1. **Fáze před zahájením výroby** – doba mezi půlnocí a zahájením výroby. V tuto dobu je výrobní výkon solární elektrárny nulový.
2. **První fáze výroby** – doba od zahájení výroby do doby, kdy začnou sluneční paprsky dopadat přímo na druhou solární elektrárnu. Výkon solární elektrárny v tomto časovém období může být modelován polynomiální funkcí druhého řádu, tak jak je ukázáno na obrázku 4.2 (zelená křivka). Nalezení této funkce, závislé na ročním období, okolní teplotě a počasí, není triviální a na obrázku 4.2 byla nalezena proložením konkrétních naměřených dat.
3. **Druhá fáze výroby** – doba od okamžiku, kdy sluneční paprsky dopadají přímo na druhou solární elektrárnu, do ukončení výroby. V tomto časovém období je možné modelovat výkon solární elektrárny další polynomiální funkcí druhého řádu. I nalezení této funkce závislé na ročním období, okolní teplotě a počasí není triviální a na obrázku 4.2 (červená křivka) byla nalezena proložením konkrétních naměřených dat.
4. **Fáze po ukončení výroby** – doba mezi ukončením výroby a půlnocí. V tuto dobu je výrobní výkon solární elektrárny nulový.





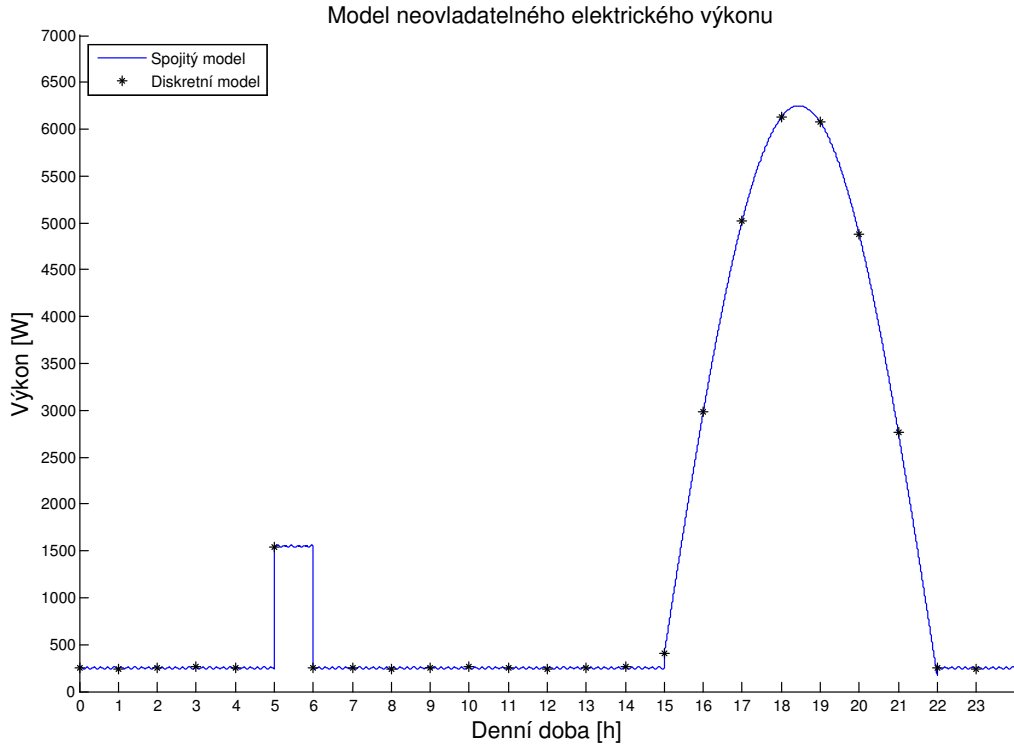
Obrázek 4.2: Model výkonu elektrické elektrárny, zdroj: vlastní zpracování

Nalezení modelu vývoje výkonu fotovoltaické elektrárny pro konkrétní den může být stanoveno na základě času zahájení výroby, přímého osvitom druhé solární elektrárny a ukončení výroby. Tyto časy jsou přímo závislé na dni v roce. Polynomiální funkce mohou být určeny na základě historických měření, které odpovídají danému dni v roce v předchozích letech a mohou být korigovány na základě aktuální předpovědi počasí pro daný den.

### Neovladatelná spotřeba

Tento model představuje vývoj odběru elektriny neovladatelných spotřebičů rodinného domu. Rozložení aktuálního výkonu během dne koresponduje s životními návyky domácnosti rodinného domu a může se lišit pro různé dny v týdnu (např. vzhledem k pracovním dnům) nebo také pro roční období (např. nutnost vytápění v zimním období).

Na obrázku 4.3 je vidět možný model vývoje neovladatelného výkonu pro jeden konkrétní den. Stálý kolísavý odběr mimo doby zvýšeného odběru představuje odběr zařízení jako je lednička nebo mrazák a také tzv. „standby“ odběr elektronických zařízení jako jsou televizor, rádio a další. Zvýšení výkonu v době mezi pátou a šestou hodinou ranní představuje zvýšenou spotřebu elektriny v době vstávání a přípravy snídani. Průběh výkonu mezi patnáctou a dvaadvacátou hodinou reprezentuje možný nárůst výkonu v odpolední době po návratu z práce způsobený např. vařením, žehlením, sledováním televize a dalšími činnostmi lidského života. Model na obrázku 4.3 by odpovídal pracovnímu dni v letním období bez požadavku na vytápění bazénu. Nalezení modelu vývoje neovladatelného výkonu konkrétního dne může být stanoveno na základě dne v týdnu, ročním období a předchozích zkušenostech s odběrem neovladatelného výkonu. Do tohoto modelu bychom zařadili i případný výkon tepelného čerpadla pro vytápění rodinného domu a bazénu.



Obrázek 4.3: Model neovladatelného elektrického výkonu, zdroj: vlastní zpracování

### Energie baterií a bojlerů

V této části je popsáno dynamické chování akumulované energie v bateriích a bojlerech. Rovnice

$$\dot{x}^{d3}(t) = -a_{11}x^{d3}(t) + a_{12}u^{1e}(t) - w(t) \quad (4.3)$$

představuje dynamické chování akumulované elektrické energie v bateriích. Člen  $a_{11}$  představuje parametr samovybíjení baterií, člen  $a_{12}$  parametr účinnosti nabíjení a člen  $w(t)$  odběr výkonu z baterií během svícení. Počáteční stav akumulované energie  $x^{d3}(0)$  může být určen na základě znalosti napětí baterií. Akumulovaná energie  $x^{d3}(t)$  je shora omezena kapacitou baterií. Pomocí dopředné Eulerovy metody můžeme tento spojitý model chování diskretizovat a získat tak diskretní model,

$$\dot{x}^{d3}(t) \approx \frac{x_{k+1}^{d3} - x_k^{d3}}{T_s}, \quad (4.4)$$

kde  $T_s$  je perioda vzorkování. Diskretní model má pak následující tvar:

$$x_{k+1}^{d3} = (1 - a_{11}T_s)x_k^{d3} + a_{12}T_s u_k^{1e} - T_s w_k \quad (4.5)$$

Obdobně můžeme stanovit rovnice vyjadřující dynamické chování akumulované tepelné energie v bojlerech:

$$\dot{x}^{d4}(t) = -a_{21}x^{d4}(t) + a_{22}u^{1t}(t) - c^{1t}(t) \quad (4.6)$$

$$\dot{x}^{d5}(t) = -a_{31}x^{d5}(t) + a_{32}u^{2t}(t) - c^{2t}(t), \quad (4.7)$$

kde členy  $a_{21}$  a  $a_{31}$  představují parametry samovolného úniku tepelné energie, tedy samovolné ochlazování vody v bojleru 1 respektive bojleru 2. Členy  $a_{22}$  a  $a_{32}$  reprezentují parametry účinnosti přeměny elektrické energie na tepelnou při ohřevu elektrickým topným tělesem a členy  $c^{1t}(t)$  a  $c^{2t}(t)$  odběr tepelného výkonu v podobě užívání teplé užitkové vody. Počáteční hodnotu akumulované tepelné energie  $x^{d4}(0)$ ,  $x^{d5}(0)$  je možné zjistit na základě počáteční teploty vody v bojleru a musí být vztažena vzhledem k referenční teplotě. Maximální hodnota akumulované tepelné energie je omezena maximální teplotou vody v bojleru. Po diskretizaci Eulerovou dopřednou metodou získáme dva diskrétní modely:

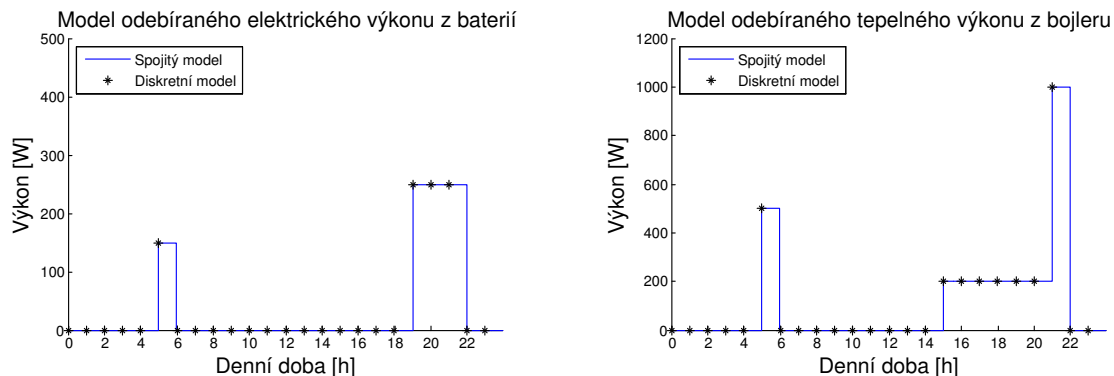
$$x_{k+1}^{d4} = (1 - a_{21}T_s)x_k^{d4} + a_{22}T_s u_k^{1t} - T_s c_k^{1t} \quad (4.8)$$

$$x_{k+1}^{d5} = (1 - a_{31}T_s)x_k^{d5} + a_{32}T_s u_k^{2t} - T_s c_k^{2t}. \quad (4.9)$$

Tyto tři diskrétní modely reprezentovány rovnicemi 4.5, 4.6 a 4.7 jasně definují chování akumulované energie.

### Odebíraný výkon z baterií a bojlerů

Výše popsané diskrétní modely obsahují členy  $w_k$ ,  $c_k^{1t}$  a  $c_k^{2t}$ , které souvisejí se spotřebou akumulované energie. Eventuální závislost odebíraného elektrického výkonu z baterií na čase je vidět na obrázku 4.4a. Reprezentuje odběr způsobený svícením v ranním a večerním období. Průběh výkonu během dne je závislý na ročním období vzhledem k rozdílným dobám nutnosti osvětlení. Na obrázku 4.4b je vidět graf závislosti odebíraného tepelného



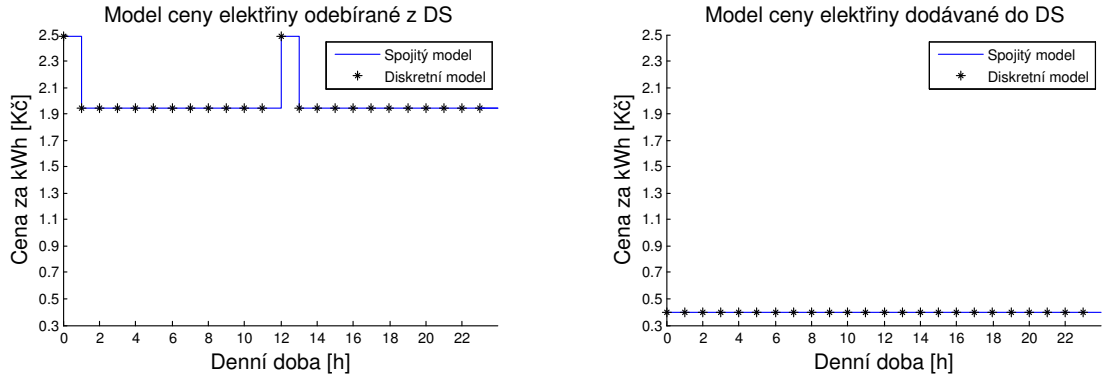
(a) Závislost odebíraného elektrického výkonu z baterií na čase (b) Závislost odebíraného tepelného výkonu z bojlerů na čase

Obrázek 4.4: Odebírané výkony z baterií a bojlerů, zdroj: vlastní zpracování

výkonu  $c_k^{1t}$  na čase. Tento odebíraný tepelný výkon reprezentuje spotřebu teplé vody v ranním období mezi pátou a šestou hodinou a odpoledních a večerních hodinách způsobený mytím, vařením a dalšími činnostmi. Závislost odběru výkonu na čase pro druhý bojler je shodná s tou pro první bojler.

### Cena elektrické energie

Na obrázku 4.5 jsou zobrazeny dva grafy závislosti cen za elektrickou energii na čase během dne. Obrázek 4.5a se týká ceny elektrické energie, která je odebírána z distribuční sítě a na druhém obrázku 4.5b je závislost ceny elektrické energie dodané do distribuční sítě.



(a) Závislost ceny elektrické energie odebrané z DS na čase (b) Závislost ceny elektrické energie dodané do DS na čase

Obrázek 4.5: Ceny za dodávanou a odebíranou elektřinu, zdroj: vlastní zpracování

### 4.3.4 Ztrátová funkce

Ztrátu způsobenou aplikací vstupu  $\mathbf{u}_k$  pro stav  $\mathbf{x}_k$  definuje ztrátová funkce  $Z_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)$ . Optimální strategie řízení  $\pi$  pak musí minimalizovat kritérium optimality

$$J = \sum_{\tau=0}^F Z_{\tau}(\mathbf{x}_{\tau}, \mathbf{u}_{\tau}). \quad (4.10)$$

Ztrátová funkce musí vhodně vyčíslit požadavek na snížení nákladů za elektrickou energii a požadavek na udržení komfortu lidského života, kterým je myšleno, že v bojlerch a bateriích bude dostatek akumulované energie (dostatečně teplá voda a nabitá baterie). Proto ztrátovou funkci definujeme jako

$$Z_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) = (1 - \alpha)Z_k^n(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \alpha Z_k^k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k), \quad (4.11)$$

kde  $Z_k^n(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)$  představuje ztrátovou funkci vzhledem k nákladům a  $Z_k^k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)$  představuje ztrátovou funkci vzhledem ke komfortu. Koeficient  $\alpha \in [0; 1]$  pak definuje rozložení váhy mezi náklady a komfortem. Zavedeme funkci

$$\gamma_k = (x_k^{d2} + u_k^{1-} + u_k^{2-} + u_k^{10} - x_k^{d1}), \quad (4.12)$$

která vyčísluje hodnotu přebytečné energie FVE ( $\gamma_k \leq 0$ ) a hodnotu dokupované elektřiny z distribuční sítě ( $\gamma_k > 0$ ). Ztrátová funkce pak bude mít tvar

$$Z_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) = \begin{cases} (1 - \alpha)x_k^{s1}\gamma_k + \alpha[\delta_k^{ba}(x_k^{d3}) + \delta_k^{bo1}(x_k^{d4}) + \delta_k^{bo2}(x_k^{d5})] & \text{pokud } \gamma_k > 0 \\ (1 - \alpha)x_k^{s2}\gamma_k + \alpha[\delta_k^{ba}(x_k^{d3}) + \delta_k^{bo1}(x_k^{d4}) + \delta_k^{bo2}(x_k^{d5})] & \text{pokud } \gamma_k \leq 0, \end{cases} \quad (4.13)$$

kde funkce  $\delta_k^{ba}$ ,  $\delta_k^{bo1}$  a  $\delta_k^{bo2}$  jsou ztrátové funkce pro systém baterií a bojlerů. Tyto ztrátové funkce mohou být navrženy pro různé požadavky na komfort různě. V případě požadavku na minimální hodnotu akumulované energie v bojleru může být ztrátová funkce  $\delta_k^{bo1}$  definována:

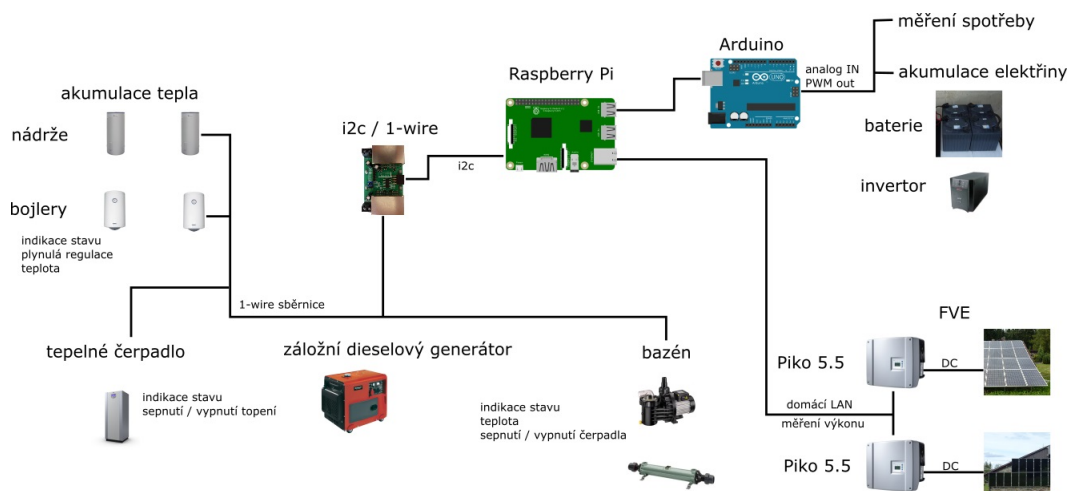
$$\delta_k^{bo1}(x_k^{d4}) = \begin{cases} Z^v & , \text{ pož. hodnota } > x_k^{d4} \geq \text{maximální hodnota} \\ \text{lineární klesající funkce} & , \text{ pož. hodnota } \leq x_k^{d4} < \text{maximální hodnota} \end{cases} \quad (4.14)$$

kde  $Z^v$  představuje velkou ztrátu a hodnota *lineární klesající funkce* klesá se zvyšujícím se  $x_k^{d4}$ . Ztrátová funkce, definovaná tímto způsobem, bere v potaz požadavek na minimální

teplotu vody v bojleru, ale také na případy, kdy je vysoká teplota vody v bojleru nežádoucí. Obdobně mohou být navrženy i funkce  $\delta_k^{ba}$  a  $\delta_k^{bo2}$ . Ztrátové funkce  $\delta_k^{ba}$ ,  $\delta_k^{bo1}$  a  $\delta_k^{bo2}$  by měly být navrženy tak, aby jejich hodnoty velikostně odpovídaly hodnotám ztrátové funkce nákladů, aby bylo zaručeno správné rozložení váhy koeficientem  $\alpha$ .

Řízení realizované podle nalezené strategie  $\pi$  takto formulované úlohy by vedlo k optimálnímu řízení z hlediska stanoveného kritéria. Vzhledem k tomu, že některé modely a ztrátové funkce nebyly do termínu odevzdání této práce konkrétně definovány, nebyla strategie řízení  $\pi$  nalezena. Po přesném definování všech modelů a ztrátových funkcí by bylo nutné vhodně zvolit velikost stavového i řídicího prostoru vzhledem k výpočetním možnostem z hlediska doby trvání výpočtu.

## 5 Realizace úlohy



Obrázek 5.1: Schéma realizovaného řešení, zdroj: vlastní zpracování

V této části jsou uvedeny jednotlivé dílčí problémy a úlohy, které byly během vypracování diplomové práce řešeny. Na obrázku 5.1 jsou vidět všechny části realizovaného řešení. Nad rámec formulace úlohy, která je uvedena v části 4.3 byly řešeny některé další úlohy, které souvisejí s inteligentními sítěmi a umožňují realizování komplexněji formulované úlohy (např. akumulace energie do akumulacích nádrží pro ohřev topné vody).

### 5.1 Počáteční problémy

Zde jsou uvedeny základní počáteční problémy, kterým bylo nutné věnovat pozornost před samotným realizováním řešení. Následná řešení a realizace dílčích úloh se od těchto počátečních problémů odvíjí.

#### 1. Problém rozdělení výkonu

Jak už bylo zmíněno v části 4.2.2, došlo po instalaci nového elektroměru ke změně metodiky měření toku energie, jež má zásadní vliv na realizované řešení. Tok energie je vyhodnocován v každé ze tří fází elektrické sítě zvlášť oproti sumě fází, jak tomu bylo v minulosti. Pro realizaci maximálního využití energie, jež vyrábí solární elektrárna, to znamená rozpad řízení na tři případy, pro každou fázi zvlášť.

#### 2. Problém akumulace

Akumulace elektrické energie hraje v konceptu inteligentních sítí významnou roli a i v tomto případě by tomu tak mělo být, vzhledem ke snaze využít energii FVE zapojené v režimu „zelený bonus“. V případě rodinného domu a jeho současných spotřebičů, uvedených v tabulce 4.2, jsou však možnosti akumulace velmi omezené. Jedinou možností akumulace elektrické energie je ohřev užitkové vody v bojlerch.

### 3. Problém výkonového řízení zátěže

Tento problém navazuje na 1. problém. Spotřebiče, které budou součástí řešení, musejí být řízeny z hlediska výkonu řízeny v každé fázi zvlášť. Pro co nejefektivnější využití přebytečného výkonu je plynulá regulace odebíraného výkonu z jednotlivých fází nutností.

### 4. Problémy původního řešení

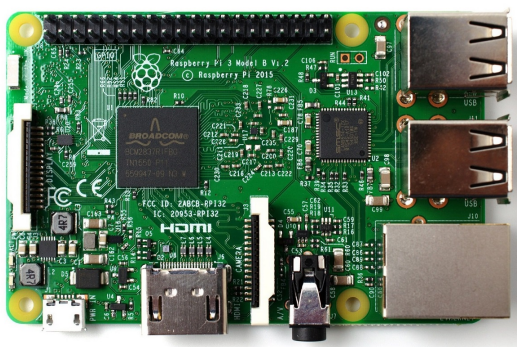
Během realizace původního řešení, které bylo provedeno během vypracování bakalářské práce, se objevilo několik následujících problémů:

- připojení původních 1-wire modulů pro řízení a monitoring k navržené síti pomocí šroubovacích svorkovnic bylo nepraktické
- velké vzdálenosti mezi některými 1-wire moduly vedly k nespolehlivosti 1-wire sběrnice
- „bastlířské“ provedení původních řídicích modulů je pro dlouhodobé a bezpečné řešení nedostačující
- malá rozšířenost původně použitého řídicího počítače ALIX 2D13 [24] a nízká podpora v oblasti SW a doplňujícího HW činila i přes jeho vynikající výpočetní výkon a podporu ze strany REX Controls s.r.o. práci s ním obtížnou

Některé z těchto problémů k termínu odevzdání této práce nebyly bohužel stále vyřešeny. Jedná se zejména o „bastlířské“ řešení některých modulů.

## 5.2 Výběr základních hardwarových a softwarových nástrojů

### 5.2.1 Raspberry Pi



(a) Raspberry Pi 3, zdroj: raspberry.org



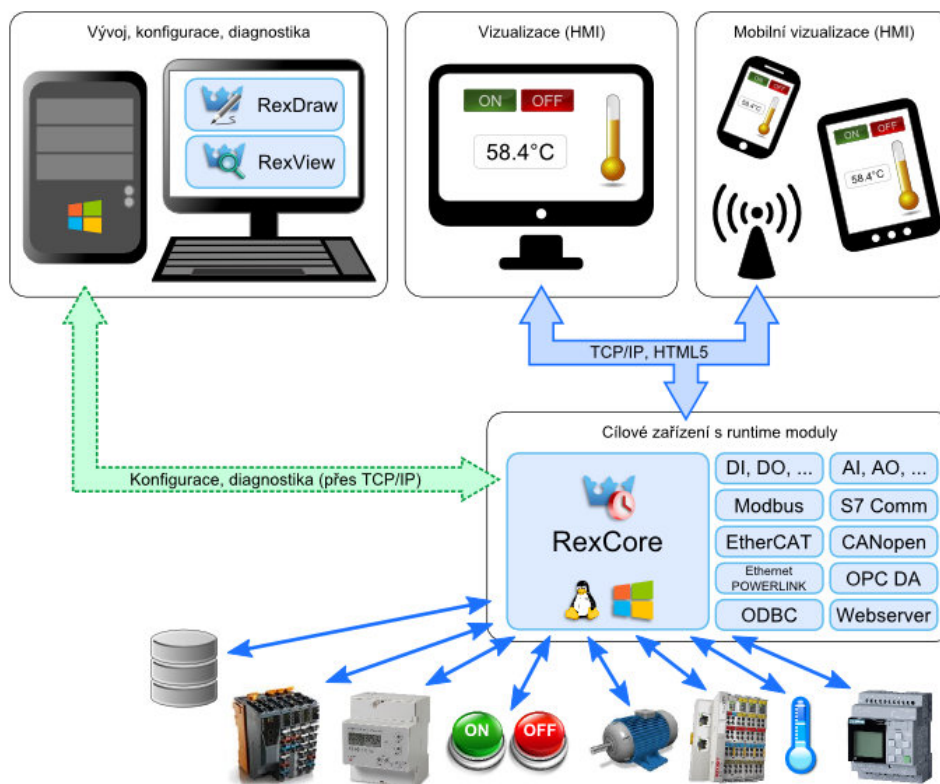
(b) Arduino Uno, zdroj: arduino.cc

Obrázek 5.2: Používaný hardware

Vzhledem k předchozím zkušenostem s minipočítačem ALIX 2D13 [24] zmíněných v části 5.1 (4d) a novým možnostem v době výběru (začátek roku 2016) byl pro úkol řídicího počítače vybrán velmi populární a cenově dostupný minipočítač Raspberry Pi 3 [25]. Jedná se o jednodeskový minipočítač s 1,2GHz 64-bitovým 4-jádrovým ARM procesorem, 1GB RAM, IEEE 802.11n bezdrátovým LAN adaptérem, ethernetovým portem a s řadou dalších zajímavých vlastností (obrázek 5.2a). Pro úlohu řídicího počítače byl vybrán hlavně kvůli těmto následujícím vlastnostem:

1. Operační systém Raspbian (GNU Linux), který je jedním z oficiálních operačních systémů doporučených pro Raspberry Pi, je plně kompatibilní s vybraným prostředím řídicího systému REX.
2. Raspberry Pi disponuje i2c portem pro připojení i2c/1-wire převodníku.
3. Díky dvěma hardwarovým síťovým rozhraním (integrováný WLAN a ethernetový LAN port) jsou možnosti přístupu a zabezpečení počítače jednodušší.
4. Vzhledem k velké rozšířenosti minipočítače je k dispozici mnoho zdrojů podpory.
5. Existuje velké množství přídatných modulů pro Raspberry Pi, jež rozšiřují základní funkce počítače. Jedním z nich je například 7" dotykový displej, který může být v rámci řídicího systému použit jako HMI rozhraní bez nutnosti dalšího hardwaru.

## 5.2.2 REX



Obrázek 5.3: Přehledové schéma řídicího systému REX, zdroj: rexcontrols.com

Jako nástroj pro programování řídicích algoritmů a podpůrných funkcí byl zvolen REX [22]. V obecné rovině je systém REX rozšiřitelným otevřeným souborem softwarových nástrojů (přehledové schéma všech částí systému je vidět na obrázku 5.3), které se používají pro řízení a regulaci strojů a technologických procesů. Systém REX je vyvíjen společností REX Controls s.r.o. ve spolupráci se Západočeskou univerzitou v Plzni od roku 2000. Řídicí systém REX je vyspělý nástroj pro návrh a realizaci komplexních algoritmů automatického řízení. Knihovny funkčních bloků [23], z nichž je výsledný algoritmus sestaven, pokrývají nejen všechny běžné oblasti automatizace a regulace, ale nabízejí navíc i řadu



prvků pro tvorbu pokročilých algoritmů řízení. Pro speciální aplikace je dále možné zařadit zcela vlastní funkce využitím volně programovatelného bloku, který je během řešení této práce využíván.

Základní komponenty řídicího systému REX jsou:

#### 1. **RexDraw**

RexDraw je grafické prostředí, které umožňuje vytvářet rozsáhlé algoritmy pomocí funkčních bloků. Navržené algoritmy v podobě funkčních schémat je možné okamžitě přeložit a zavést na cílové zařízení. Vytvořené schéma algoritmu je uloženo ve formátu .mdl. Funkční bloky řídicího systému REX je také možné využít v prostředí MatLab-Simulink. Programování pomocí funkčních bloků (Function Block Diagram) je obdobné jako způsob programování PLC dle normy IEC 61131-3 (1993).

#### 2. **RexComp**

Jedná se o překladač, který převádí vytvořené algoritmy (v RexDraw) ve formátu .mdl do binárního formátu .rex. V reálném čase dává informaci o překládaném souboru spolu s možným výpisem chyb.

#### 3. **RexCore**

Program běžící na cílovém zařízení (Linux IPC, WinPAC, Raspberry Pi a další). Jádru RexCore zajišťuje spouštění a časování vytvořených řídicích algoritmů a současně provádí další činnosti obvyklé v řídicích systémech. Jednotlivé úlohy jsou vykonávány na základě priorit v režimu preemptivního multitaskingu.

#### 4. **RexView**

Je to nástroj určený k nahlížení na chod řídicího programu. Umožňuje hierarchické zobrazení všech částí aktivní úlohy, změnu nastavení parametrů, nahrání nové a stažení aktuální úlohy zpět pro její možný přenos na jiné cílové zařízení, vizualizaci dat připojených do bloků TRND a další. Připojení je možné v lokální síti i přes Internet a to i s možností šifrování komunikace a ověření identity.

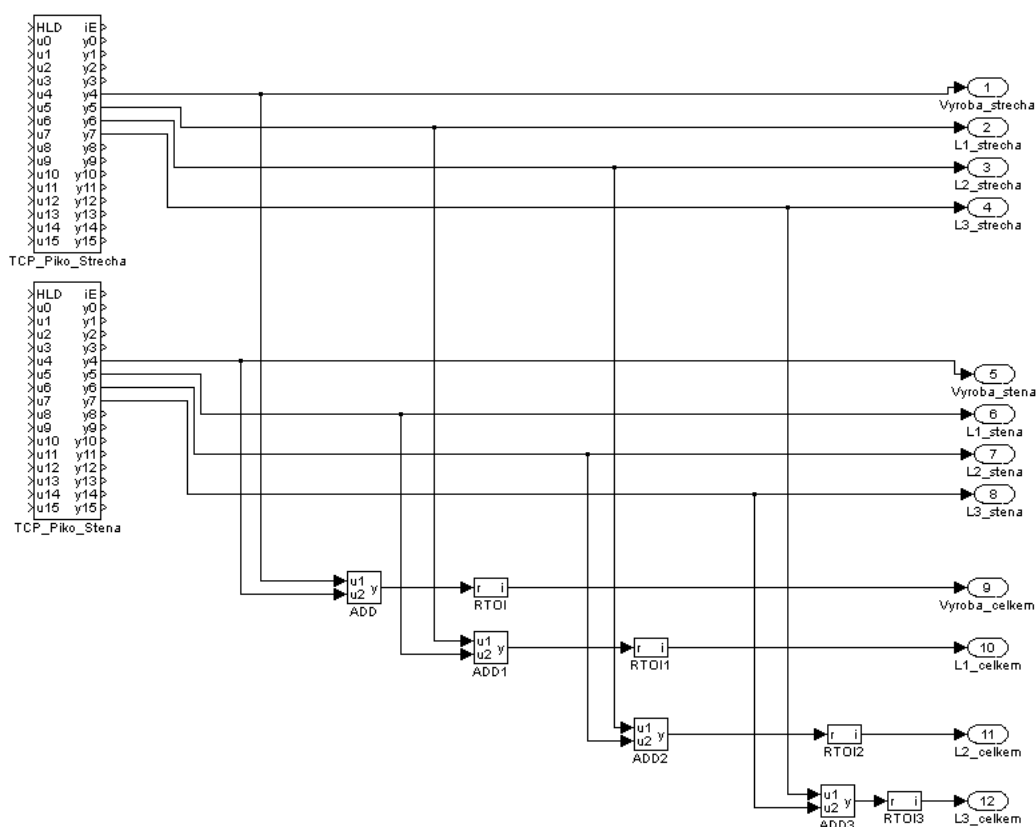
Hlavní důvody pro zvolení tohoto řídicího systému reálného času pro řešení úlohy zpracované v této diplomové práci jsou:

1. předešlá znalost systému
2. rozšiřitelnost o senzory a akční členy založené na 1-Wire sběrnici
3. rozšiřitelnost o další analogové i digitální I/O pomocí Arduino
4. velká variabilita při sestavení řídicího algoritmu vzhledem k rozsáhlé knihovně funkčních bloků
5. možnost grafického programování
6. plná kompatibilita s Raspberry Pi
7. sada integrovaných nástrojů pro vytvoření HMI
8. bezpečnost komunikace díky šifrování a ověření identity

## 5.2.3 Arduino

Pro potřeby řešení bylo nutné zajistit dostatek kanálů pro měření a generaci akčních veličin (digitální I/O, analogové vstupy). Vzhledem k absenci analogových vstupů na Raspberry Pi bylo nutné najít jiné vyhovující řešení. Pro rozšíření počtu portů bylo vybráno Arduino Uno [26]. Jedná se o vývojový kit založený na mikroprocesoru ATmega328 (obrázek 5.2b). Arduino disponuje 13 digitálními vstupně-výstupními piny (z toho 6 s podporou PWM) a 6 analogových vstupů. PWM výstupy jsou 8bitové a analogové vstupy 10bitové. Mikroprocesor ATmega328 na desce Arduino je možné programovat pomocí speciálního Arduino programovacího jazyka ve vlastním Arduino vývojovém prostředí. Díky možnostem řídicího systému REX však není nutné programy pro čtení a zápis pinů Arduino programovat tímto jazykem. Je možné integrovat vstupy a výstupy Arduino do vývojového prostředí RexDraw pomocí speciálního bloku založeného na bloku REXLANG. Po nahrání REXduino Slave programu do Arduino a propojení Arduino a Raspberry Pi USB kabelem nebo přímým propojením sériovou linkou pomocí Rx/Tx pinů se stanou piny dostupné i ve vývojovém prostředí RexDraw.

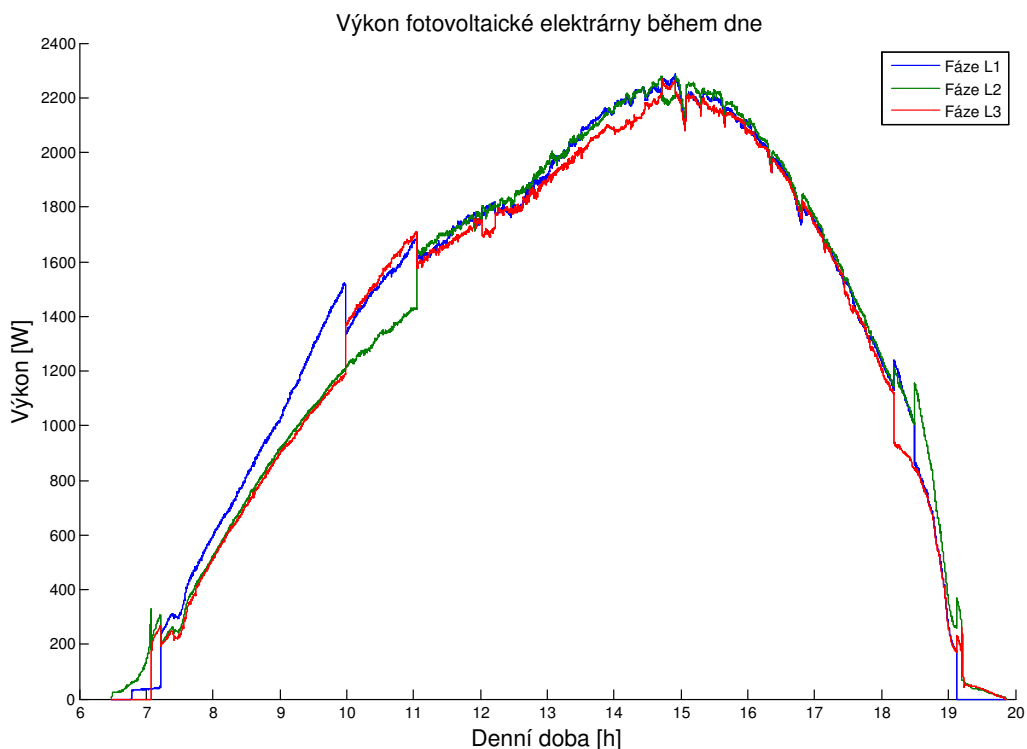
## 5.3 Měření vyráběného výkonu



Obrázek 5.4: Funkční bloky REX – výrobní výkon, zdroj: vlastní zpracování

Zajištění hodnot aktuálního výkonu je řešeno pomocí datové komunikace mezi řídicím počítačem a jednotlivými invertory Piko 5.5. Invertory disponují ethernetovým rozhraním a vlastním webovým serverem. Datový kabel připojený ke každému invertoru je sveden do síťového switchu v místě umístění invertorů a z tohoto switchu je následně veden do síťového routeru, ke kterému je připojen i řídicí počítač. Na základě znalosti komunikačního protokolu je pomocí bloku REXLANG navázáno spojení s každým invertorem.

Po navázání spojení odešle řídicí počítač dotazovací paket o velikosti 8 bytů. Invertor na tento paket odpovídá odpovídacím paketem velikosti 73 bytů. Tento odpovídací paket obsahuje kromě dalších provozních hodnot invertoru také požadované hodnoty generovaného výkonu. Základ této komunikace byl řešen během vypracování bakalářské práce a pro potřeby této práce byl přepracován tak, aby odpovídal aktuálním požadavkům. Realizace pomocí bloků REXLANG je vidět na obrázku 5.4 a reálná naměřená data výkonu fotovoltaické elektrárny jsou vidět na obrázku 5.5. Na obrázku je patrný způsob,



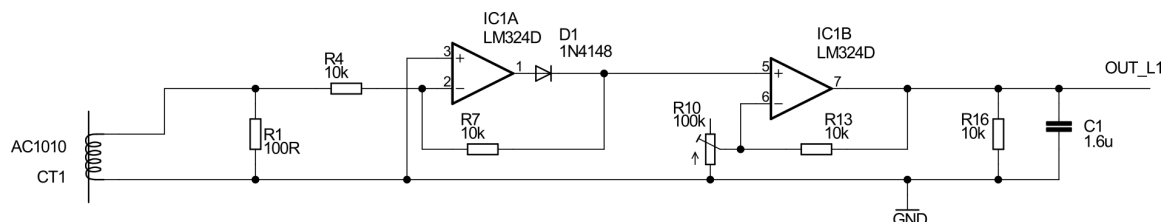
Obrázek 5.5: Výkon fotovoltaické elektrárny v průběhu dne, zdroj: vlastní zpracování

jak invertory Piko 5.5 rozdělují výrobní výkon mezi jednotlivé fáze vedení. V případě, že celkový výkon dosahuje hodnoty do 300 W je dodáván pouze do jedné z fází (náhodně zvolené invertorem). V případě, že se celkový výkon pohybuje v rozmezí od 300 do 600 W je výrobní výkon rovnoměrně rozdělen do dvou fází (náhodně zvolených invertorem) a v případě celkového výkonu nad 600 W je výkon rovnoměrně rozdělen do všech třech fází.

## 5.4 Měření aktuální spotřeby

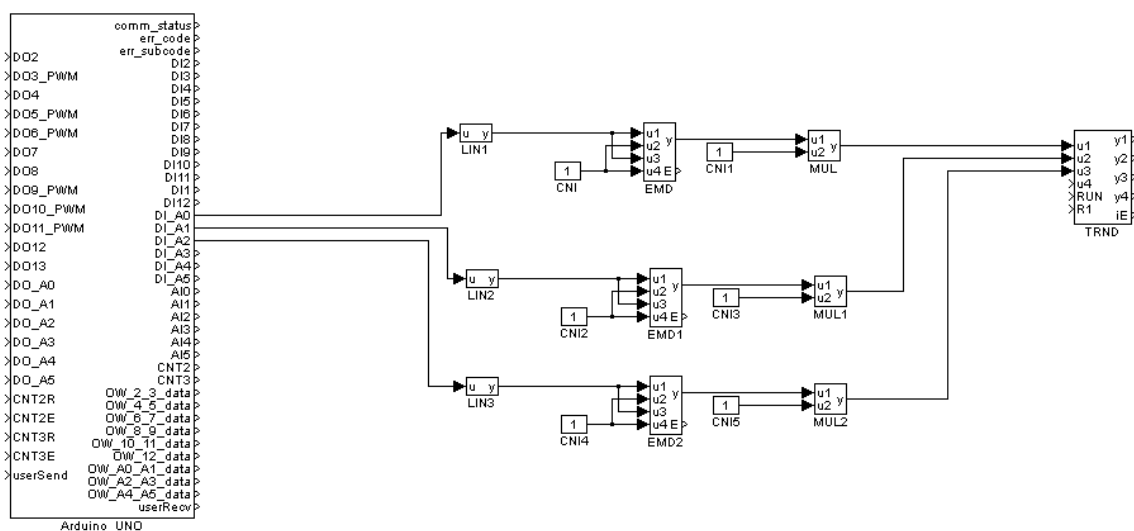
Pro měření aktuální spotřeby elektrické energie rodinného domu byly použity proudové transformátory AC1010 od firmy Talema. Použití proudových transformátorů pro měření aktuálního protékajícího proudu má výhodu v jednoduché instalaci měřicího modulu do elektrické rozvodné soustavy rodinného domu (provlečení fázových vodičů otvorem proudového transformátoru) a galvanickém oddělení měření. Schéma měřicího obvodu proudu jedné z fází je na obrázku 5.6. Sekundární vinutí proudového transformátoru  $CT1$  je připojeno na rezistor  $R1$ . Amplituda střídavého napětí na rezistoru  $R1$  je závislá na proudu, který prochází primárním vinutím transformátoru  $CT1$ , tedy na proudu, který

protéká vodičem provlečeným otvorem transformátoru. Pro zvýšení transformačního poměru je možné místo pouhého provlečení fázového vodiče otvorem transformátoru udělat tímto vodičem několik závitů přes pouzdro transformátoru. Střídavé napětí na rezistoru  $R1$  je jednocestně usměrněno operačním zesilovačem  $IC1A$  a následně zesíleno operačním zesilovačem  $IC1B$ . Výstup operačního zesilovače je filtrován RC členem tvořeným rezistorem  $R16$  a kondenzátorem  $C1$ . Vyfiltrované napětí je pak přivedeno na analogový vstup Arduino. Tento obvod pro měření proudu je použit třikrát, pro každou fázi zvlášť. Měřicí obvod je v elektrické rozvodné síti rodinného domu zapojen na vedení, na kterém jsou zapojeny pouze spotřebiče, aby bylo zajištěno, že protékající proudy budou pouze proudy spotřebičů nekombinované s proudy výroby solární elektrárny, které mají opačný směr toku proudu. Napět'ové signály změřené pomocí Arduino jsou následně zpracovány



Obrázek 5.6: Elektrické schéma zapojení obvodu měření proudu, zdroj: vlastní zpracování

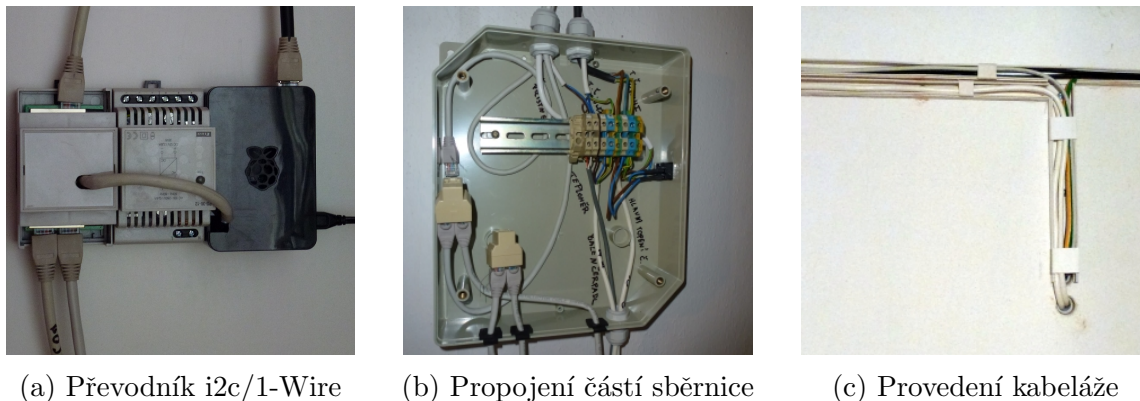
softwarově funkčními bloky řídicího systému REX tak, aby reprezentovaly hodnoty aktuálního výkonu. Z bloku Arduino (obrázek 5.7) jsou vyvedeny tři signály odpovídající hodnotám naměřeného napětí. Napětí od 0 do 5 V je reprezentováno číselnou hodnotou od 0 do 1023, která odpovídá 10bitovému AD převodu v rozmezí 0 až 5 V. Tyto signály jsou blokem lineární interpolace převedeny na hodnotu napětí, která je následným blokem rozšířeného násobení a dělení, který odpovídá převodní funkci napětí/proud, převedena na hodnotu proudu. Výsledná hodnota proudu je vynásobena konstantním napětím sítě 230 V (jedná se o zjednodušení, neboť ve skutečnosti síťové napětí není konstantní, ale mění se v čase) a tím je získán aktuální odebíraný výkon. Předpis přesné převodní funkce napětí/proud nebyl do termínu odevzdání práce stanoven.



Obrázek 5.7: Funkční bloky REX – měření spotřeby, zdroj: vlastní zpracování

## 5.5 Převodník i2c/1-Wire

Důležitou součástí řešení je převodník i2c/1-Wire (na obrázku 5.8a je umístěn úplně vlevo spolu s 24V zdrojem napájení a Raspberry Pi), který slouží jako rozhraní mezi řídicím počítačem Raspberry Pi a 1-Wire sběrnicí (propojení jednotlivých částí sběrnice, které je provedeno RJ45 rozbojkami, je vidět na obrázku 5.8b). Spolu s datovým vodičem



Obrázek 5.8: Sběrnice 1-wire a její části, zdroj: vlastní zpracování

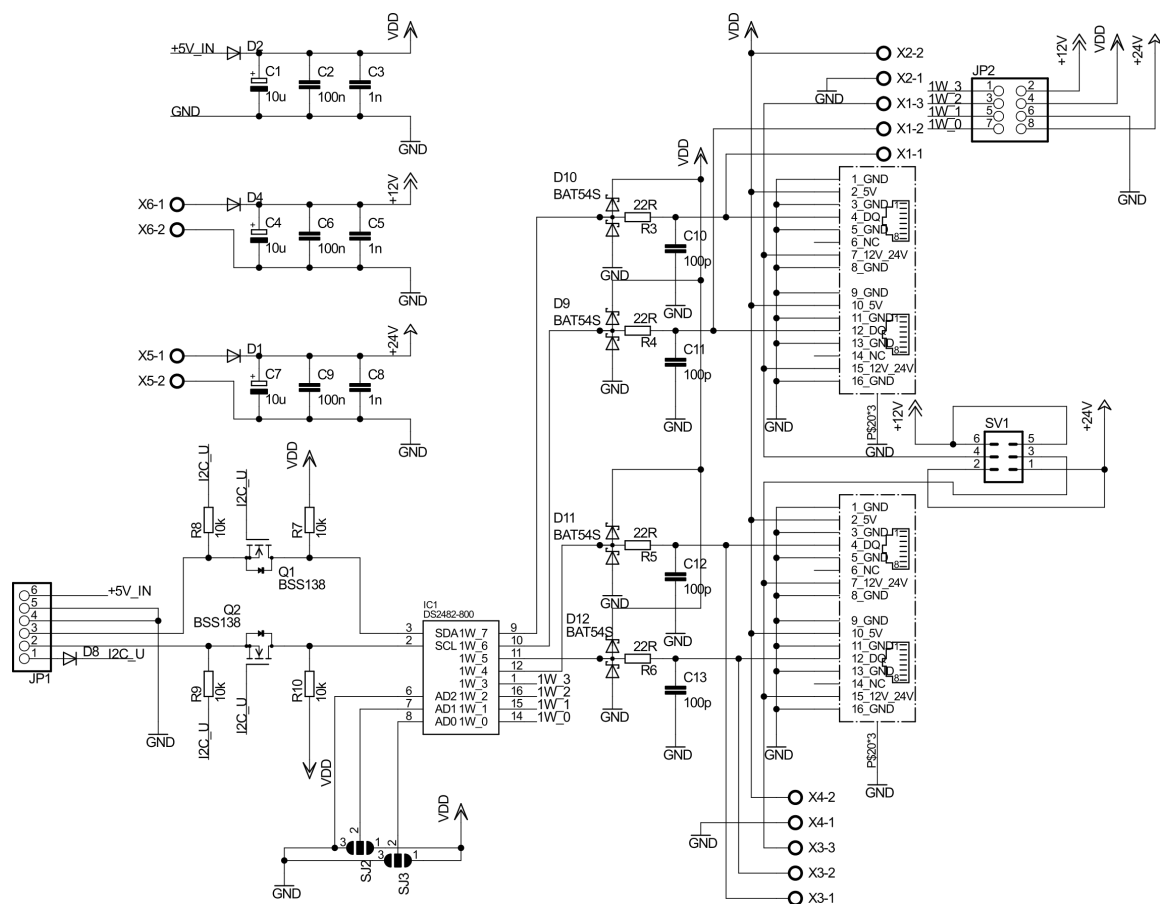
1-Wire sběrnice je síťovým STP CAT5E kabelem vedeno i 5V napájecí napětí datové sběrnice a 24V pomocné napětí. Takto vytvořený svazek je rozveden mezi jednotlivými částmi realizace, které využívají 1-Wire sběrnici (provedení kabeláže je vidět na obrázku 5.8c, kde je v instalační liště vedeno i třífázové elektrické vedení pro napájení topných těles, které jsou popsány v kapitole 5.6). 1-Wire sběrnice je používána k připojení teplotních čidel a snímacích a ovládacích modulů spotřebičů. Převodník, založený na chipu DS2482-800, disponuje až 8 nezávislými sběrnicemi (4 přístupné přes RJ45 zásuvky a zbytek přes vyvedené piny na PCB). Schématické zapojení převodníku je vidět na obrázku 5.9. Převodník je připojen k řídicímu počítači Raspberry Pi přes i2c sběrnici. Pro zapisování a načítání parametrů jednotlivých 1-Wire zařízení je využit program OWSERVER, jež je součástí balíku programového vybavení OWFS – One Wire File System [27]. Ovladač OwsDrw [28] řídicího systému REX využívá tohoto programového balíku a umožňuje tím komunikovat v prostředí REX se všemi zařízeními, která jsou v OWFS podporována.

## 5.6 Akumulace ve formě tepla

Původní možnost akumulace elektrické energie ve formě ohřevu teplé užitkové vody ve dvou bojlerech byla rozšířena o možnost ohřevu vody ve dvou akumulacích nádržích používaných tepelným čerpadlem. Jedna z nádrží slouží jako předohřev užitkové vody, která je vstupní vodou pro oba bojlyery. Voda ve druhé akumulacích nádrži je oběhovou vodou topného okruhu. Tímto navrženým řešením byl zvýšen objem akumulace schopné užitkové vody o 340 litrů a přibyla možnost ohřevu topné vody, čehož může být využito v létě při vytápění bazénu nebo v zimě při vytápění rodinného domu jako výpomoc tepelnému čerpadlu.

### 5.6.1 Topná tělesa

Vzhledem k změnám ve výpočtu toků energií zmíněných v části 5.1, odrážce 1, by bylo původní vytápění bojlerů jednofázovými 2000W topnými tělesy nevýhodné, protože odebíraný výkon by se promítal pouze do jedné fáze. V případě požadavku na vytopení



Obrázek 5.9: Elektrické schéma i2c/1-Wire převodníku, zdroj: vlastní zpracování

jednoho z bojlerů by bylo možné využít k vytápění pouze výkon z jedné fáze. Za slunných dnů v době největšího svitu během dne, kdy celkový výrobní výkon převyšuje 6 000 W (tedy 2000 W na jednu fázi) by mohl být bojler vytápěn maximálním výkonem, ale v případech zamračených dnů a i v ranních a večerních hodinách slunných dnů, kdy maximální výkon dosahuje hodnot menších než 6000 W, tedy méně než 2000 W na jednu fázi, by bojler nemohl být vytápěn plným výkonem tělesa i přes dostatečný celkový výkon výroby. Proto byla původní topná tělesa bojlerů vyměněna za nová třífázová topná tělesa s celkovým výkonem 2 100 W. Nově nainstalovaná topná tělesa pro akumulární nádrže byla také zvolena třífázová. Seznam všech říditelných topných těles spolu s jejich umístěním je v tabulce 5.1.

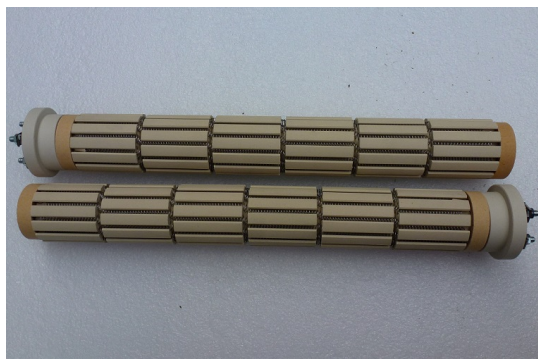
Umístění	Objem [l]	Výkon na fázi [W]	Celkový výkon [W]
bojler garáž	160	700	2100
bojler prádelna	180	700	2100
akum. nádrž užitková	340	1500	4500
akum. nádrž topná	400	1500	4500

Tabulka 5.1: Seznam říditelných topných těles, zdroj: vlastní zpracování

## 5.6.2 Regulace výkonu topných těles

Topná tělesa (obrázek 5.10) představují pro protékající proud odporovou zátěž (indukční a kapacitní charakter je tak malý, že jej můžeme zanedbat), kterou je možné z hlediska

výkonu řídit několika způsoby. Mezi nejpoužívanější přístupy pro výkonové řízení použí-



(a) 3-fázová topná tělesa pro bojler



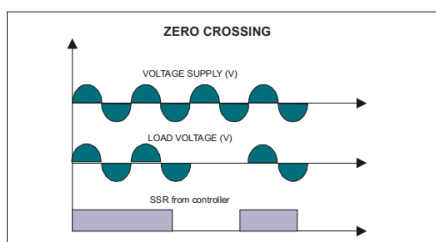
(b) 3-fázové topné těleso akumul. nádrž užitková

Obrázek 5.10: Použitá topná tělesa, zdroj: vlastní zpracování

tých topných těles patří polovodičové spínací prvky a regulační transformátory. Stručný přehled a možná implementace pro regulaci výkonu použitých topných těles v rodinném domě je uvedena v následující části.

### Polovodičová regulace

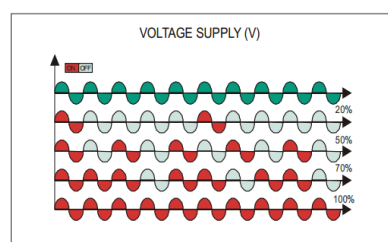
Solid State Relays (SSR) jsou polovodičové spínací relé, které díky použitým polovodičům mohou spínat vstupní střídavá, ale i stejnosměrná napětí velmi vysokou rychlostí dosahující až desítky Hertz. SSR jsou založeny na spínacích schopnostech polovodičových součástek jako jsou tyristory, triaky, bipolární tranzistory a nebo MOSFET tranzistory. Spínací kontakt SSR může být řízen celou řadou vstupních spínacích signálů, obvykle se jedná o stejnosměrné napětí. Spínací kontakt je dvoustavově řízen právě tímto vstupním stejnosměrným napětím. Pro možnost řízení výkonu topného tělesa jsou některé SSR vhodné díky schopnosti spínání zátěže při průchodu napětí nulovou hodnotou. Na obrázku 5.11a je znázorněna funkce spínání při průchodu nulou. SSR spíná své kontakty v závislosti na vstupním napětí, ale také zároveň své kontakty sepne, případně rozepne pouze v době, kdy napětí prochází nulou. Toto spínání neprodukuje tak velké elektromagnetické rušení jako například fázové spínání, kdy je spínací kontakt sepnut/rozpojen při jakékoliv hodnotě napětí. Polovodičová relé a různé spínací jednotky, které jsou na SSR technologii



(a) SSR – průchod nulou



(b) CD3000M



(c) SSR – single cycle burst firing

Obrázek 5.11: Solid state relays, zdroj: cdautomation.uk.com

založeny, jsou k dispozici v mnoha variantách s rozlišnými funkcemi. Jednou z takových

spínacích jednotek je tyristorová spínací jednotka CD3000M od firmy CD Automation, která disponuje tzv. funkcí „single cycle burst firing” (obrázek 5.11b). Na základě analogového vstupu, který představuje požadovaný regulovaný výkon, jsou výstupní kontakty spínány vždy v násobcích jedné periody. V případě požadavku na 50% výstupní výkon je jedna celá perioda vstupního napětí sepnuta a následující perioda je vynechána (další příklady spínání pro různé požadované výkony jsou vidět na obrázku 5.11c). Tyristorová jednotka CD3000M disponuje analogovým proudovým vstupem 4-20 mA, proto není problém ji připojit k použitému Arduinu Uno a tím docílit řízení výkonu z prostředí REX.

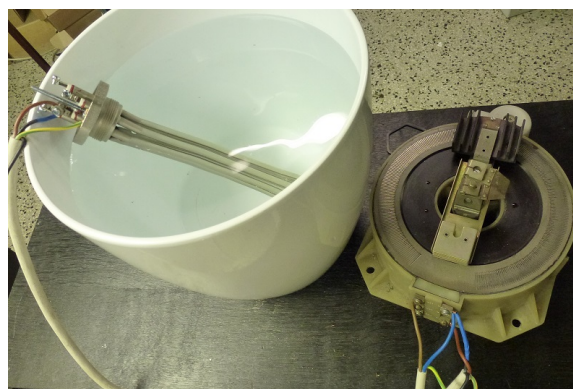
Při tomto způsobu řízení výkonu je nutné brát v úvahu stav elektrického vedení v rodinném domě. Vzhledem k rychlým změnám zatížení vedení může docházet při spínání větších výkonů k poklesům napětí. Čím větší je impedance vedení, tím větší pokles na síti se může objevit. Tyto rychlé změny napětí jsou nazývány jako flickr [29] a jeho vliv se může například projevit ve svitu klasické vláknem žhavené žárovky. Avšak vzhledem k návrhu řešení světelného okruhu (více popsáno v části 5.7), který je oddělen od elektrického vedení rodinného domu, není tento vliv příliš zásadní.

### Regulační autotransformátory

Další z možností, jak regulovat výkon topných těles, je transformace vstupního napětí na nižší hodnotu. K tomu účelu je možné použít autotransformátory. Autotransformátor je transformátor s jedním vedením cívky, který má na několika místech vyvedené odbočky, které představují části vedení o různých délkách. V závislosti na délce vedení odbočky a druhu transformátoru (zvyšující, snižující a nebo případně obojí) je naměřeno příslušné napětí. Příkladem může být jednofázový snižující transformátor 230 V se 4 odbočkami z hlavního vedení, na kterých jsou vyvedena napětí v hodnotách 180, 155, 135 a 115 V. V případě, že by byl tento transformátor použit pro řízení výkonu topného tělesa, mohl by měnit svůj výkon pouze v pěti úrovních 100, 78, 67, 59 a 50 %. Pro plynulé řízení výkonu je těchto pět úrovní výkonu nedostačující.



(a) ESS 9080/ M, zdroj: ttw.cz



(b) Regulační experiment, zdroj: vlastní zpracování

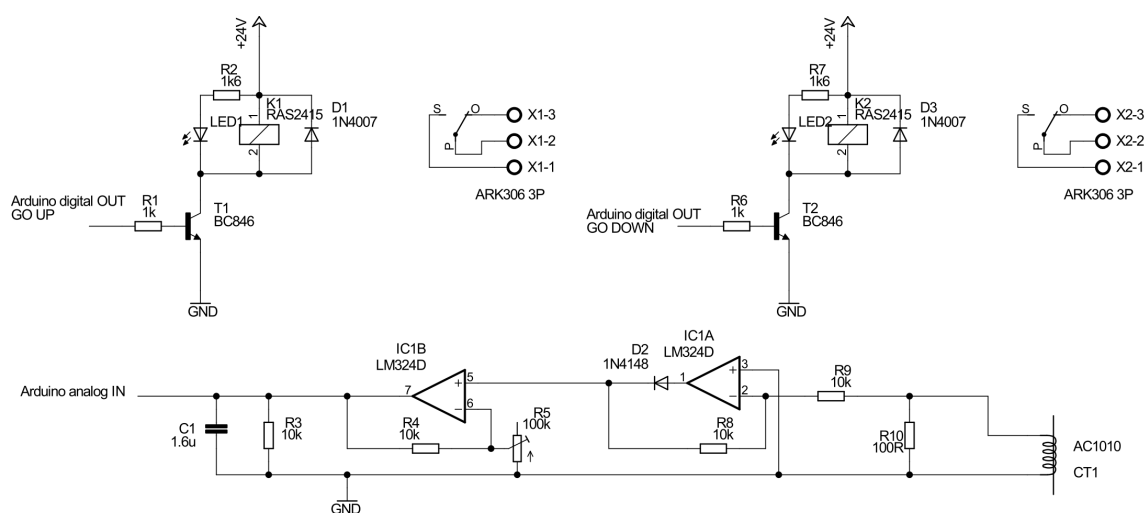
Obrázek 5.12: Regulační autotransformátory

Dalším druhem autotransformátoru, který už umožňuje plynulou regulaci výstupního napětí a tím i výkonu je kruhový regulační autotransformátor (na obrázku 5.12). Jedná se o transformátor toroidního typu s jedním vinutím, jehož část je vodivě přístupná na svrchním obvodu kruhového transformátoru. Po tomto celém obvodu se může pohybovat jezdec s uhlíkovým kartáčem. Podle úhlu natočení vůči počátečnímu místu vedení se mění výstupní napětí mezi jedním koncem vedení a jezdcem díky změně délky vedení. Příkladem takové regulačního transformátoru může být transformátor ESS 9080/M od firmy TTW



(obrázek 5.12a), který je vybaven motorovým ovládáním jezdce pro nastavení požadované hodnoty. Tento regulační transformátor s maximálním výstupním proudem 8 A plně dostává pro řízení vybraných topných těles.

V případě, že by byl tento transformátor využit pro regulaci v rodinném domě, mohl by být doplněn o dvě Arduinoem ovládaná relé, která by byla použita pro řízení směru otáčení motoru. Snímač procházejícího proudu (představený v části 5.3), napojený na výstup transformátoru, by umožnil zavedení informační zpětné vazby a tím zjednodušení řídicího algoritmu pro nastavení požadovaného výkonu. Elektrické schéma potřebných hardwarových částí je na obrázku 5.13. Jedná se o dvě stejnosměrná relé ovládaná 5V digitálním

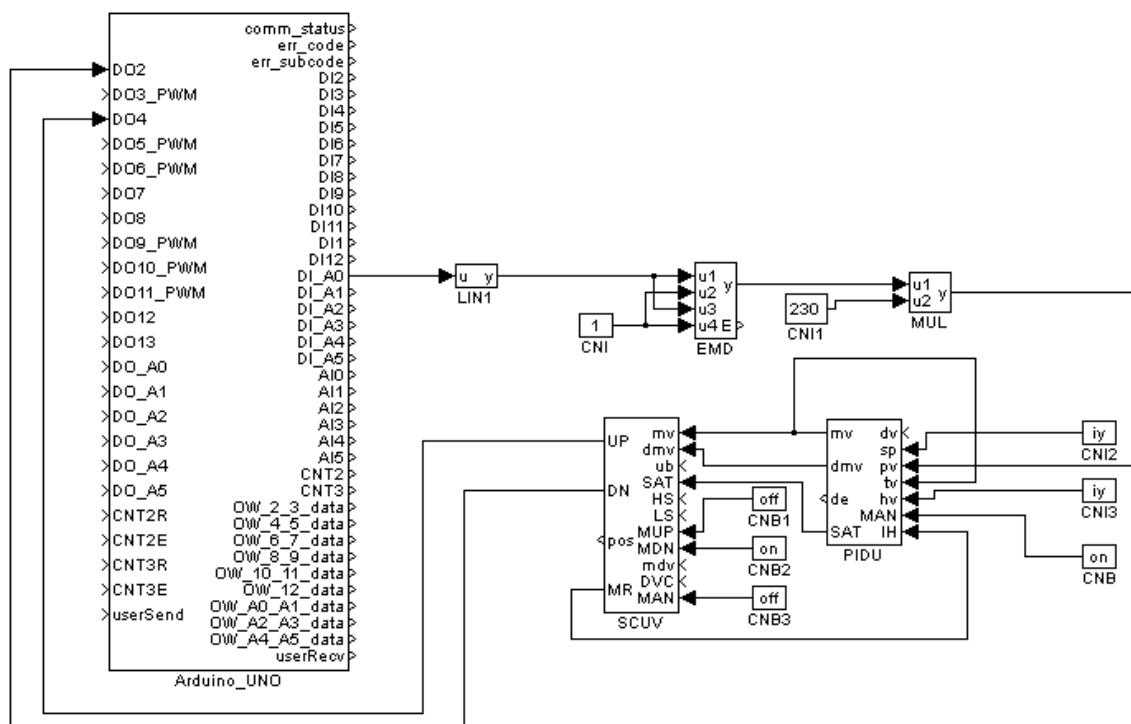


Obrázek 5.13: Elektrické schéma řízení regulačního transformátoru, zdroj: vlastní zpracování

výstupem Arduina a jedním měřičem protékajícího proudu, jehož výstup je připojen na analogový vstup Arduina.

Schéma funkčních bloků systému REX na obrázku 5.14 může být jedním z možných přístupů, jak řídit výstupní výkon transformátoru. Blok *Arduino UNO* nastavuje a snímá hodnoty signálů připojených k Arduino – 2 digitální výstupy a jeden analogový vstup. Výstup z bloku *MUL* představuje aktuální výkon na výstupu regulačního transformátoru a je přiveden na vstup PID regulátoru realizovaným blokem *PIDU*. Signál akčního zásahu regulátoru je přiveden na blok *SCUV*, což je třístavový regulátor umožňující řízení servoventilů, u kterých polohový signál servoventilu není dostupný anebo dostatečně spolehlivý. V tomto případě slouží k třístavovému řízení ovládacího mechanismu natáčení jezdce autotransformátoru, který je analogický s mechanismem servoventilů. Výstupem z bloku *SCUV* jsou dva signály *UP* a *DOWN*, které představují řídicí povely pro natáčení jezdce autotransformátoru jedním a druhým směrem. Toto provedení regulační smyčky je schopné reagovat jak na změny vstupního napětí transformátoru, tak i na změnu elektrického odporu topného tělesa v závislosti na teplotě.

Oba tyto přístupy k regulaci výkonu topných těles mají své výhody i nevýhody. Mezi výhody použití tyristorové řídicí jednotky patří menší rozměry, bezúdržbový provoz a rychlejší reakční doba. Nevýhodou mohou být výše popsané skokové změny napětí sítě a možná nepřesnost vyhodnocení řízeného výkonu elektroměrem. Větší rozměry, nutnost údržby uhlíkového kartáče jezdce transformátoru, nutnost doplňujícího hardwaru a delší reakční doba, vzhledem k 15vteřinové době mezi přejetím jezdce z jedné strany na druhou, patří k hlavním nevýhodám použití regulačního transformátoru. K jeho výhodám můžeme po-



Obrázek 5.14: Funkční bloky REX – řízení výstupního výkonu transformátoru, zdroj: vlastní zpracování

čítat minimální elektromagnetické rušení sítě a plynulé změny výkonu, jež nepředstavují tak velký problém pro udržení parametrů elektrické rozvodné sítě. Vzhledem k podobným pořizovacím nákladům a zejména výhodě v podobě nulového elektromagnetického rušení bylo pro řízení topného výkonu navrženo použití regulačních autotransformátorů. Pro regulaci je uvažováno použití třech regulačních autotransformátorů, pro každou fázi jeden. V případě dostatečného přebytečného výkonu FVE převyšující kapacitu řízeného topného tělesa je uvažováno jeho jednostavové sepnutí a použití regulačních transformátorů pro další topné těleso.

## 5.7 Akumulace do baterií



(a) Baterie + DC/ AC invertor



(b) PWM regulátor

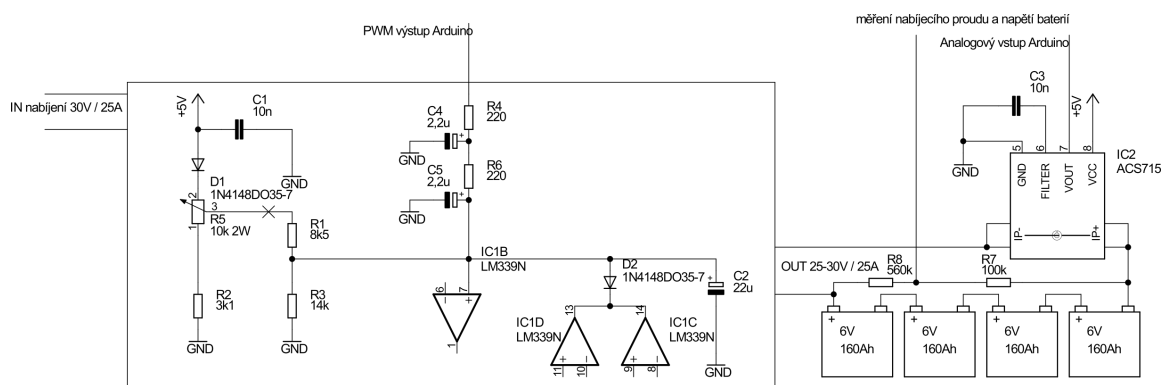
Obrázek 5.15: Části systému akumulace do baterií, zdroj: vlastní zpracování

Na základě možných technologických řešení pro ukládání elektrické energie zmíněných v 2.5.3 a stávajících možnostech elektrické rozvodné sítě rodinného domu bylo navrženo

ukládání přebytečné elektrické energie do baterií pro pozdější využití jako zdroj pro světelný okruh rodinného domu. Stávající provedení rozvodů elektrické energie umožňovalo kompletní oddělení jednoho dvou vodičového vedení od zbytku elektroinstalace. Na toto oddělené dvou vodičové vedení byly přepojeny veškeré zdroje světla rodinného domu. Vedení je napájeno zdrojem, který ke svému chodu využívá elektrickou energii uloženou v bateriích. Tím je využita energie vyrobená sluneční elektrárnou i ve večerní a noční době, kdy fotovoltaická energie, vzhledem k žádnému nebo nízkému svitu, není dostupná.

Akumulační blok (obrázek 5.15a) tvoří čtveřice bezúdržbových olověných trakčních baterií s gelovým elektrolytem. Každá baterie disponuje kapacitou 160 Ah (20hodinové vybíjení) při 6V napětí. Baterie jsou spojeny sériově a tvoří tak akumulaci o celkovém napětí 24 V s 160Ah kapacitou. Ve spojení s DC/AC invertorem s maximální výkonem 1500 VA se jedná o dostatečné řešení jak vzhledem k maximálnímu příkonu světelného okruhu (tabulka 4.2 - 350 W), tak i k požadované době výdrže zdroje. Při průměrném zatížení světelného okruhu 200 W, 90% účinnosti DC/AC invertoru, skutečně 80% kapacity nominální kapacity vzhledem ke stáří baterií a požadavku na pouze 30% hloubku vybití baterií pro zachování jejich životnosti vystačí tento zdroj na 4hodinový provoz světelného okruhu (počítáno za předpokladu čistě činného výkonu bez jalové složky). V letním období je tato hodnota plně dostačující. V zimním období bude docházet vzhledem k větší hloubce vybití ke snížení životnosti baterií. Při hloubce vybití 50 % však poskytne zdroj při výše zmíněných podmínkách energii na téměř 7 hodin provozu, což už je i v zimním období dostačující.

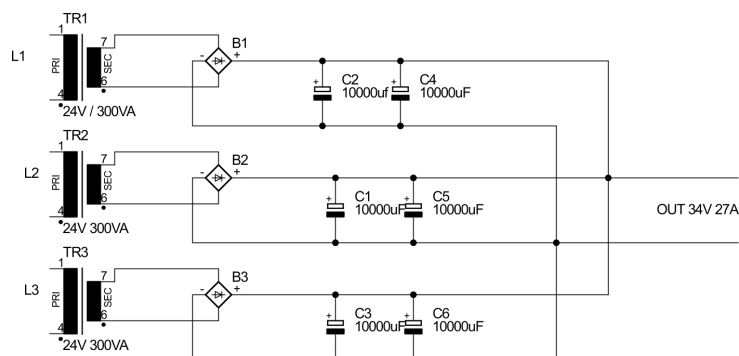
Pro nabíjení akumulací je použit výkonový PWM regulátor (obrázek 5.15b) s možným výstupem až 70 A. Regulátor je schopný regulovat napětí v rozmezí 12 až 60 V. Původní zapojení regulátoru, které umožňovalo plynulou regulaci pomocí potenciometru, bylo upraveno tak, aby mohl být regulátor řízen digitálním PWM výstupem Arduina. Elektrické schéma zapojení je vidět na obrázku 5.16. Původní zapojení regulátoru, které



Obrázek 5.16: Elektrické schéma řízení nabíjení, zdroj: vlastní zpracování

je na obrázku 5.16 v rámečku, bylo přerušeno v místě mezi trimrem R5 a rezistorem R1 a doplněno o pasivní RC filtr druhého řádu pro získání stejnosměrného napětí z PWM výstupu Arduina (R4, C4, R6 a C5), tím bylo umožněno řídit nabíjecí napětí baterií. Pro měření nabíjecího proudu byl použit senzor ACS715 od firmy Allegro založený na principu Hallova jevu. Výstupní napětí senzoru se pohybuje v rozmezí 0 až 5 V v závislosti na procházejícím proudu, který může být v rozmezí 0 až 30 A. Napětí na bateriích je zjednodušeně měřeno pomocí napětíového děliče, jehož výstup je přiveden na analogový vstup Arduina. Po otestování funkce nabíjení bylo zapojení doplněno o ochrannou usměrňovací diodu, která snižuje maximální napětí a brání zpětnému toku proudu a o tlumivku limitující rychlé změny nabíjecích proudů.

Jako stejnosměrný zdroj napětí pro PWM regulátor byly zvoleny 24V transformátory s můstkovým usměrněním a dostatečnou filtrací. Pro symetrické zatížení elektrické sítě jsou tyto zdroje tři, na každou fázi jeden. Výstupní napětí každého ze zdrojů je paralelně spojeno. Elektrické schéma těchto zdrojů je vidět na obrázku 5.17. Toto řešení představuje výhodu při nabíjení v dobách nízkého výrobního výkonu elektrárny.



Obrázek 5.17: Elektrické schéma zdroj pro nabíječku, zdroj: vlastní zpracování

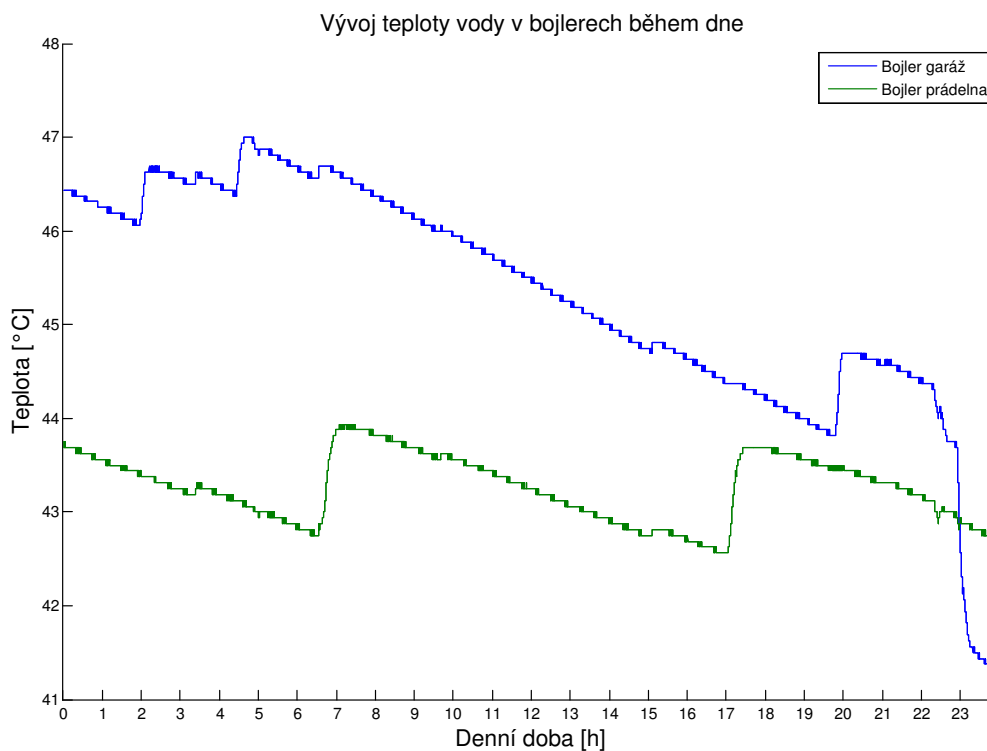
Pro zajištění dlouhé životnosti a nesnižování kapacity baterie je nutné zajistit nabíjení podle doporučených parametrů výrobce baterie. Takové nabíjení baterie se skládá ze tří následujících fází:

1. **Bulk charging fáze** – blok je nabíjen konstantním proudem 25 A do té doby, než dosáhne napětí 7,35 V na baterii, tedy 29,4 V.
2. **Absorption charging fáze** – blok je nabíjen konstantním napětím o velikosti 29,4 V do té doby, dokud neklesne proud pod 1,6 A.
3. **Float charging fáze** – blok je nabíjen konstantním napětím o velikosti 6,6 V na baterii, tedy 26,4 V, dokud neklesne proud k hodnotě blízké nule.

Jedním z prvků, který by pro bezpečný a dlouhý provoz tohoto doplňkového zdroje měl být ještě implementován, je teplotní ochrana baterií, která by v případě vysoké teploty baterií ukončila nabíjení či odpojila zátěž. Zařízení pro balancování napětí jednotlivých baterií by výrazně prodloužilo životnost a zajistilo rovnoměrné nabíjení a vybíjení a bylo by tak vhodným doplňkem tohoto systému.

## 5.8 Měření teplot

Pro měření teplot jsou použity teplotní čidla DS18B20 od firmy Maxim Integrated s přesností 0,5 °C v rozmezí -10 až 85 °C. Je možné dotazovat teplotu v 9, 10, 11 a 12bitové přesnosti, jejichž maximální doby převodu jsou: 93, 75, 187, 5, 375 a 750 milisekund. Teplotní čidla patří do rodiny tzv. 1-Wire zařízení, díky čemuž je možné je připojit k vybudované 1-Wire sběrnici a komunikovat s nimi pomocí zmíněného OWSERVER a hlavně ovladače OwsDrv v prostředí řídicího systému REX. Měřící čidla jsou umístěna v obou bojlorech (průběh teplot je vidět na obrázku 5.18), v obou akumulacích nádržích, v tepelném výměníku ohřevu bazénu a v obývací místnosti. Díky znalosti těchto teplot je možné nastavit minimální a maximální teplotu užitkové vody v bojlorech, na základě teploty v obývací místnosti spínat topení či sledovat teplotu vody v bazénu.



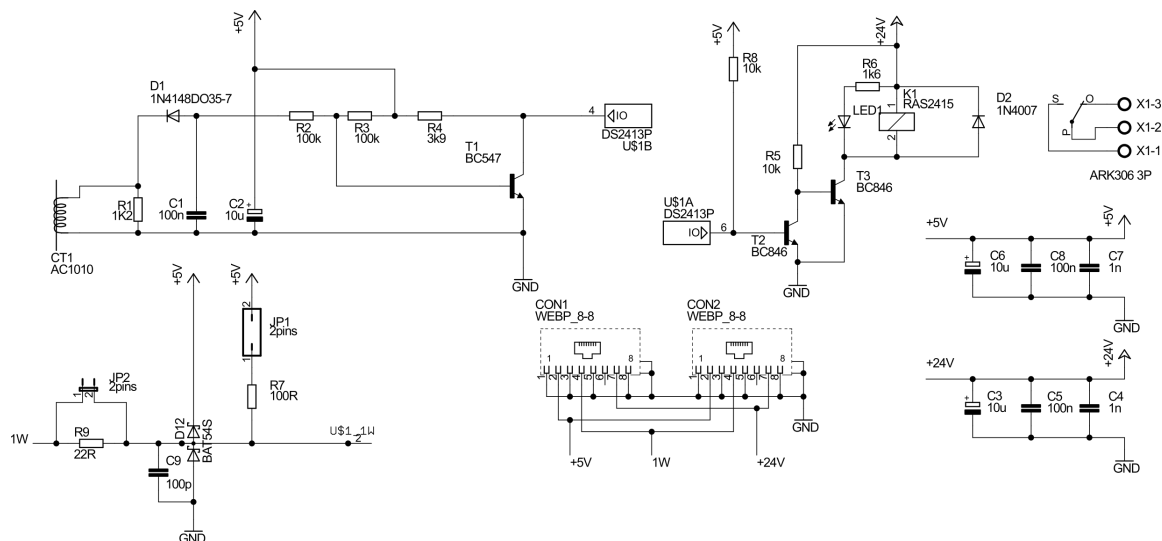
Obrázek 5.18: Průběh teploty v bojlerech, zdroj: vlastní zpracování

## 5.9 Jednostavové ovládání spotřebičů

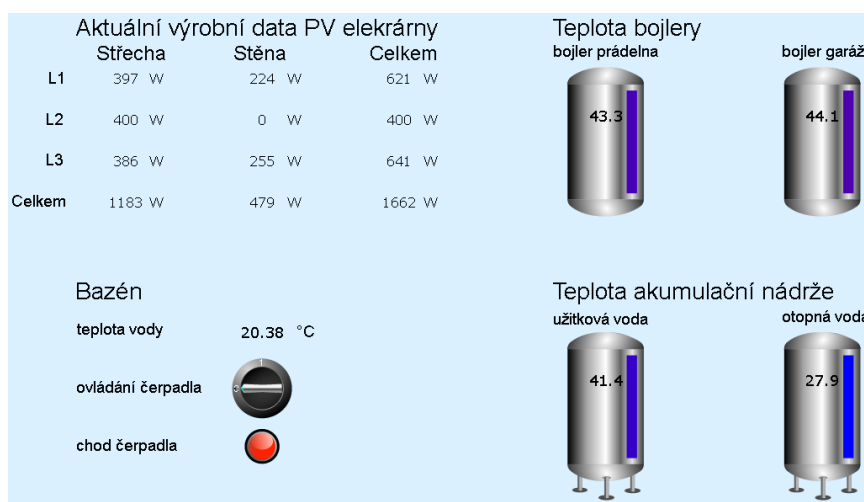
Pro snímání stavu jednotlivých spotřebičů a jejich jednostavové ovládání ve smyslu ZAP/VYP je navržen modul založený na 1-Wire zařízení DS2413, které disponuje dvěma digitálními vstupně/výstupními piny. Elektrické schéma zapojení je vidět na obrázku 5.19. Pro snímání stavu spotřebiče je použit proudový transformátor  $CT1$ , kterým je provlečen přívodní vodič spotřebiče. V případě průchodu dostatečně velkého proudu (pro zvýšení citlivosti je možné udělat otvorem transformátoru několik závitů) je sepnut tranzistor  $T1$  a dojde ke změně napětí na vstupu  $U1B$  z 5 na 0 V. Pro ovládání spotřebičů je použito 24V relé spínané druhým digitálním výstupem  $U1B$  skrze dvojici NPN tranzistorů. K indikaci sepnutí relé slouží svítivá dioda  $LED$ .

## 5.10 Řešení výpadků sítě

Pro případy dlouhodobějšího výpadku sítě je k dispozici naftová třífázová elektrocentrála Einhell RT-PG 5000 DD s maximálním souvislým výkonem 4 400 W. Vývod elektrocentrály je přiveden do prostoru elektrického rozvaděče rodinného domu, kde je umožněno připojení nutných spotřebičů. Je možné připojit topné těleso jednoho z bojlerů, zdroj pro nabíjení baterií a plotýnkový vařič. Všechny připojené spotřebiče jsou v době chodu elektrocentrály odděleny od elektrické rozvodné sítě a jejich jištění je realizováno ochranným vybavením elektrocentrály. Tímto řešením je zachován minimální komfort lidského života i v případě dlouhodobého výpadku elektrické energie.



Obrázek 5.19: Elektrické schéma ovládacího modulu, zdroj: vlastní zpracování



Obrázek 5.20: Uživatelské rozhraní systému, zdroj: vlastní zpracování

## 5.11 Vizualizace

Díky zvolenému řídicímu systému REX a jeho pokročilým funkcím je možné vytvořit tzv. HMI (Human to Machine Interface) rozhraní, které umožňuje ovládat a monitorovat celý systém skrze webový prohlížeč. Základem jsou webové stránky HTML5, které jsou podporovány moderními prohlížeči. Tyto stránky jsou distribuovány pomocí webservru Lighttpd přes standardní HTTP protokol. Jakmile se načte stránka v prohlížeči, vytvoří se websocketové spojení mezi touto stránkou a jádrem RexCore, které běží na Raspberry Pi. Webový server Lighttpd a websocketový server RexWSTcp slouží jako prostředníci mezi uživatelem a řídicím algoritmem. Další výhodou je možnost tvorby vizualizace v prostředí grafického editoru Inkscape rozšířeného o funkce RexHMI. V editoru se vytváří grafická podoba webové stránky, do které je možné vkládat prvky pro zobrazení a ovládání proměnných z prostředí řídicího systému REX. Na základě grafické podoby a přidání prvků je pak vygenerována webová stránka, kterou je možné publikovat. Na obrázku 5.20 je vidět podoba realizované vizualizace pro řešení této úlohy.

## 6 Závěr

Jedním z cílů této diplomové práce bylo nalezení optimální strategie řízení výkonu bojlerů a nabíjení baterií. Pro splnění tohoto cíle byla formulována optimalizační úloha na základě principů dynamického programování. Byly stanoveny složky stavu a řízení systému, jednotlivé modely systému a ztrátová funkce. Vzhledem k tomu, že do termínu odevzdání této práce nebyly některé koeficienty ztrátové funkce a konkrétní definice některých modelů systému přesně stanoveny, nebyla požadovaná optimální strategie řízení nalezena.

Druhým cílem mé práce bylo představení a realizace řídicího systému, který by implementaci nalezeného optimálního řízení spolu se všemi jeho aspekty umožňoval. Tento cíl byl z velké míry splněn. Navržený řídicí systém založený na systému REX umožňuje měřit výkon generovaný fotovoltaickou elektrárnou, měřit aktuální spotřebu elektrické energie rodinného domu (zde je nutno podotknout, že přesná převodní funkce měřícího modulu musí být ještě stanovena), pomocí 1-Wire sběrnice připojit teplotní čidla a jednostavové ovládací moduly, výkonově ovládat topná tělesa bojlerů a akumuláčnických nádrží a akumulovat elektrickou energii do baterií. Mimo to také poskytuje možnost souhrnného přehledu stavu systému a jednoduchého ovládání spotřebičů díky vizualizačnímu prostředí.

V rámci realizace řídicího systému byla vyměněna původní jednofázová topná tělesa bojlerů za nová třífázová a akumuláčnické nádrže byly doplněny novými třífázovými topnými tělesy. Pro zvýšení možnosti akumulace elektrické energie byla přidána možnost ukládání elektrické energie do baterií. Úpravou původních elektrických rozvodů rodinného domu bylo umožněno využití uložené energie v bateriích pro osvětlení. Pro případ dlouhodobého výpadku elektrické sítě bylo testováno použití a možnosti naftové elektrocentrály.

Cílem do budoucna je dotáhnout provedení dílčích řídicích modulů do takové podoby, aby mohly být bezpečně integrovány do rozvaděčové skříně rodinného domu. Dalším budoucím úkolem je nalezení chybějících koeficientů ztrátové funkce a definic některých modelů systému. To vše s cílem nalézt takové řízení, které by zachovávalo komfort lidského života a šetřilo náklady za elektrickou energii z hlediska celého horizontu řízení.

# Literatura

- [1] Národní akční plán:  
Ministerstvo obchodu a průmyslu  
*Národní akční plán pro chytré sítě*  
Ministerstvo obchodu a průmyslu, únor 2015
- [2] Kniha:  
Janaka Ekanayake, Kithsiri Liyanage, Jianzhong Wu, Akihiko Yokoyama  
*SMART GRID Technology and Applications*  
A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, Chester UK, 2012, ISBN: 978-0-470-97409-4
- [3] Odborný článek:  
Xinghuo Yu, Carlo Cecati, Tharam Dillon, M. Godey Simões  
*The New Frontier of Smart Grids*  
IEEE Industrial Electronics Magazine, 5. ročník, 3. vydání, září 2011
- [4] Odborný článek:  
Normazlina Binti Mat Isa, Tan Chee Wei, Abd Halim Mohd Yatim  
*Smart grid technology: Communications, power electronics and control system*  
International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (IC-SEEA), říjen 2015
- [5] Odborný článek:  
Asim Kaygusuz, Cemal Keles, Baris Baykant Alagoz, Abdulkarim Karabiber  
*Renewable energy integration for smart sites*  
Energy and Buildings journal, 64. vydání, září 2013
- [6] Odborný článek:  
Daniel Livengood, Richard Larson  
*The Energy Box: Locally Automated Optimal Control of Residential Electricity Usage*  
Service Science, 1. vydání, 2009
- [7] Odborný článek:  
Nathan Kowahl , Anthony Kuh  
*Micro-scale smart grid optimization*  
International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), červenec 2010, ISBN: 978-1-4244-6916-1
- [8] Odborný článek:  
D. I. Gota , C. Vigu, O. Capatana  
*A power consumption optimization method for a hybrid renewable energy making system*  
IEEE International Conference on Automation Quality and Testing Robotics, květen 2010, ISBN: 978-1-4244-6724-2
- [9] Technická zpráva:  
Richard E. Bellman, Stuart E. Dreyfus



- Dynamic Programming*  
RAND Corporation, Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 1962.
- [10] Kniha:  
Warren B. Powell  
*Approximate Dynamic Programming: Solving the Curses of Dimensionality*  
John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2007, ISBN: 978-0-470-17155-4
- [11] Roční zpráva:  
Oddělení statistiky a sledování kvality ERÚ  
*Roční zpráva o provozu ES ČR 2015*  
Energetický regulační úřad, Praha 2016
- [12] PDF dokument:  
Evropská komise  
*European Technology Platform: Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future*  
Evropská komise, Generální ředitelství pro výzkum, 2006, ISBN 92-79-01414-5  
[http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf)
- [13] PDF dokument:  
Department of Energy and Climate Change  
*Smarter Grids: The Opportunity*  
Department of Energy and Climate Change, UK, prosinec 2009  
[www.techuk-e.net/Portals/0/Cache/\(DECC\)smart%20grid\\_web.pdf](http://www.techuk-e.net/Portals/0/Cache/(DECC)smart%20grid_web.pdf)
- [14] PDF dokument:  
U.S. Department of Energy *Smart Grid System Report*  
U.S. Department of Energy, USA, červenec 2009  
<http://energy.gov/sites/prod/files/2009%20Smart%20Grid%20System%20Report.pdf>
- [15] WWW stránka:  
IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee  
*IEEE 802 standards*  
IEEE-Standards Association, USA, 2016  
<http://www.ieee802.org/>
- [16] WWW stránka:  
Portál měření měření energie  
*LoRa WAN integrace v zařízení SDS*  
Portál měření energie, ČR, 2016  
<http://wiki.merenienergie.cz/index.php/LoRaWAN>
- [17] WWW stránka:  
Eduard Majling  
*HVDC – stejnosměrný přenos elektrické energie*  
Portál [www.oenergetice.cz](http://www.oenergetice.cz), ČR, červenec 2015  
<http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/hvdc-stejnosmerna-prenos-elektricke-energie/>
- [18] WWW stránka:  
Jan Budín

- Technologický plán akumulace energie*  
Portál [www.oenergetice.cz](http://www.oenergetice.cz), ČR, únor 2015  
<http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/technologicky-plan-v-oblasti-akumulace-energie/>
- [19] WWW stránka:  
Kostal  
*Invertor Piko 5.5*  
Stránky firmy Kostal, 2016  
[http://www.kostal-solar-electric.com/en-GB/Produkte%20u%20Service/-PIK0%20Wechselrichter%20bewaehrt/PIK0%205\\_5](http://www.kostal-solar-electric.com/en-GB/Produkte%20u%20Service/-PIK0%20Wechselrichter%20bewaehrt/PIK0%205_5)
- [20] Zákonná vyhláška:  
Ministerstva průmyslu a obchodu  
*Vyhláška 82/2011 Sb.*  
Ministerstva průmyslu a obchodu, 2011  
<http://portal.gov.cz/app/zakony/zakonPar.jsp?-idBiblio=73974&nr=82~2F2011&rpp=15#local-content>
- [21] Bakalářská práce:  
Jan Pícha  
*Monitoring a řízení rodinného domu vybaveného malou solární elektrárnou a tepelným čerpadlem*  
Západočeská Univerzita, Katedra kybernetiky, Plzeň, 2012
- [22] WWW stránka:  
REX Controls  
*Co je to řídicí systém REX?*  
REX Controls s.r.o., 2016  
<https://www.rexcontrols.cz/rex>
- [23] Referenční příručka:  
REX Controls s.r.o.  
*Funkční bloky systému REX*  
REX Controls s.r.o., verze 2.10.8, únor 2016
- [24] WWW stránka:  
PC Engines GmbH  
*ALIX 2D13 properties overview*  
PC Engines GmbH, 2016  
<http://www.pcengines.ch/alix2d13.htm>
- [25] WWW stránka:  
The Raspberry Pi Foundation  
*Raspberry Pi 3 model B properties overview*  
The Raspberry Pi Foundation, 2016  
<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- [26] WWW stránka:  
Arduino LLC  
*Arduino Uno properties overview*  
Arduino LLC, 2016  
<https://www.arduino.cc/en/Trademark/HomePage?from=Main.Trademark>

- [27] WWW stránka:  
Owfs.org  
*OWFS info website*  
Owfs.org, 2016  
<http://owfs.org/>
- [28] PDF dokument:  
REX Controls s.r.o.  
*Ovladač systému REX pro 1-Wire*  
REX Controls s.r.o., únor 2016  
<http://owfs.org/>
- [29] Kniha:  
Petr Toman, Jiří Drápela, Stanislav Mišák, Jaroslava Orságová, Martin Paar, David Topolánek a kol.  
*Provoz distribučních soustav*  
České vysoké učení technické v Praze, Praha 2011. ISBN 9788001049358.

# Seznam obrázků

2.1	Ilustrace současného stavu elektrické rozvodné sítě, zdroj:[3]	2
2.2	Ilustrace konceptu inteligentní sítě, zdroj:[3]	5
2.3	Příklad možné komunikační infrastruktury SG, zdroj:[2]	7
2.4	Zjednodušené blokové schéma SM, zdroj:[2]	10
2.5	Jedna z technik DSM: load shifting, zdroj: [2]	12
4.1	Solární elektrárna, zdroj: vlastní zpracování	21
4.2	Model výkonu elektrické elektrárny, zdroj: vlastní zpracování	25
4.3	Model neovladatelného elektrického výkonu, zdroj: vlastní zpracování	26
4.4	Odebírané výkony z baterií a bojlerů, zdroj: vlastní zpracování	27
4.5	Ceny za dodávanou a odebíranou elektřinu, zdroj: vlastní zpracování	28
5.1	Schéma realizovaného řešení, zdroj: vlastní zpracování	30
5.2	Používaný hardware	31
5.3	Přehledové schéma řídicího systému REX, zdroj: rexcontrols.com	32
5.4	Funkční bloky REX – výrobní výkon, zdroj: vlastní zpracování	34
5.5	Výkon fotovoltaické elektrárny v průběhu dne, zdroj: vlastní zpracování	35
5.6	Elektrické schéma zapojení obvodu měření proudu, zdroj: vlastní zpracování	36
5.7	Funkční bloky REX – měření spotřeby, zdroj: vlastní zpracování	36
5.8	Sběrnice 1-wire a její části, zdroj: vlastní zpracování	37
5.9	Elektrické schéma i2c/1-Wire převodníku, zdroj: vlastní zpracování	38
5.10	Použitá topná tělesa, zdroj: vlastní zpracování	39
5.11	Solid state relays, zdroj: cdautomation.uk.com	39
5.12	Regulační autotransformátory	40
5.13	Elektrické schéma řízení regulačního transformátoru, zdroj: vlastní zpracování	41
5.14	Funkční bloky REX – řízení výstupního výkonu transformátoru, zdroj: vlastní zpracování	42
5.15	Části systému akumulace do baterií, zdroj: vlastní zpracování	42
5.16	Elektrické schéma řízení nabíjení, zdroj: vlastní zpracování	43
5.17	Elektrické schéma zdroj pro nabíječku, zdroj: vlastní zpracování	44
5.18	Průběh teploty v bojlerech, zdroj: vlastní zpracování	45
5.19	Elektrické schéma ovládacího modulu, zdroj: vlastní zpracování	46
5.20	Uživatelské rozhraní systému, zdroj: vlastní zpracování	46

# Seznam tabulek

2.1	Spotřeba elektřiny v ČR za rok 2015, zdroj: [11] . . . . .	3
2.2	Možné druhy sítí a použitelné technologie, zdroj: [2] . . . . .	7
4.1	Složení nákladů za elektřinu, zdroj: vyúčtování dodavatele elektřiny . . . .	20
4.2	Seznam spotřebičů s jejich maximálním příkonem, zdroj: vlastní zpracování	22
5.1	Seznam říditelných topných těles, zdroj: vlastní zpracování . . . . .	38

# Obsah CD přílohy

1. Generované soubory řídicího systému REX
2. schématické zapojení použitých řešení vytvářené CAD editorem EAGLE
3. Použité fotografie a obrázky