

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**Modelování a implementace automatického řízení bilance
elektrické energie pro domácnost s fotovoltaickým systémem,
baterií a účastí na spotovém trhu s elektřinou**

Bc. Tomáš Mezera

Diplomová práce
2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Mezera**
Osobní číslo: **I22188**
Studijní program: **N0714A150005 Automatické řízení**
Téma práce: **Modelování a implementace automatického řízení bilance elektrické energie pro domácnost s fotovoltaickým systémem, baterií a účastí na spotovém trhu s elektřinou.**
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Cíle práce:

Analyzovat aktuální stav technologií pro výrobu a ukládání elektrické energie v domácnostech.

Navrhnout a implementovat systém pro sběr dat o spotřebě a výrobě energie v reálném čase.

Vyvinout algoritmy pro automatické řízení nabíjení a vybíjení baterie a prodej/nákup elektřiny na spotovém trhu.

Zhodnotit výkon a efektivitu navrženého systému na základě reálných dat z provozu domácnosti.

Metodologie:

Sběr dat: Implementace senzorů pro měření spotřeby a výroby elektřiny, včetně dat z fotovoltaického systému, baterie a spotového trhu.

Algoritmy řízení: Navržení a implementace algoritmů pro rozhodování o době nabíjení/ vybíjení baterie a prodeji/nákupu elektřiny na základě aktuálních cen a potřeb domácnosti.

Simulace a testování: Použití simulačního prostředí a reálných dat k vyhodnocení výkonnosti a spolehlivosti systému.

Očekávané výstupy:

Funkční systém pro automatické řízení bilance elektrické energie v domácnosti.

Zhodnocení úspor a efektivity výroby a spotřeby elektřiny.

Výsledky a závěry, které mohou sloužit jako podklad pro budoucí vývoj podobných systémů.

Rozsah pracovní zprávy: **60 stran**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

ČESKO, 2000. Zákon č. 458/2000 Sb. Ze dne 29.12.2000 o podmínkách podnikání a výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). In: Sbírka zákonů České republiky, částka 95, s. 4470 – 4548 [cit. 2021]. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/>
ČSN EN 12831-1 Energetická náročnost budov - Výpočet tepelného výkonu - Část 1: Tepelný výkon pro vytápění, Modul M3-3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018,4 s. Třídící znak 060206.

ČSN 06 0320 Tepelné soustavy v budovách - Příprava teplé vody - Navrhování a projektování. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006,20 s. Třídící znak 060320.

ČSN EN 16798-1 Energetická náročnost budov - Větrání budov - Část 1: Vstupní parametry vnitřního prostředí pro návrh a posouzení energetické náročnosti budov s ohledem na kvalitu vnitřního vzduchu, tepelného prostředí, osvětlení a akustiky - Modul M1-6. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, 64 s. Třídící znak 127027.

MATĚJŮ, Ing. Dalibor. Energetika - vybrané pojmy. [www.tzbinfo.](http://www.tzbinfo.cz/) [online]

HASELHUHN, Ralf a Petr MAULE. Fotovoltaické systémy: energetická příručka: pro elektrikáře, techniky, instalatéry, projektanty, architekty, inženýry, energetiky, manažery, stavitele, studenty, učitele, ostatní odborné a profesní soukromé nebo veřejné instituce a zájemce o fotovoltaický obor a energetickou nezávislost. Plzeň: Česká fotovoltaická asociace, 2017. ISBN 978-80-906281-5-1.

BECHNÍK, Bronislav. Historie a perspektivy OZE - fotovoltaika, méně rozšířené technologie Zdroj: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5517-historie-a-perspektivy-ozefotovoltaika-mene-rozsirene-technologie> [online]. In: . TZB-Info, 2009 [cit. 2021]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5517-historie-a-perspektivy-ozefotovoltaikamene-rozsirene-technologie>

ŘEHÁK, Jaromír, Jiří BÁREK a Radim BAŘINKA.

Fotovoltaika a fotovoltaické systémy v podmínkách ČR a jejich navrhování. Česká energetická agentura [online]. Praha, 64 str [cit. 2017-11-01]. Dostupné z: http://www.mpoefekt.cz/dokument/98_8050.pdf

Fotovoltaika pro budovy, ČVUT Praha, Fakulta stavební [online]. Aktualizováno 2020 [cit. 2021] Dostupné na: <https://docplayer.cz/13042222-Cvut-v-praze-fakulta-stavebnihakurova-7-166-29-praha-6-email-kamil-stanek-fsv-cvut-cz-http-fotovoltaika-fsv-cvut-czbudovy-prehled-technologie.html>

Vedoucí diplomové práce:

doc. Mgr. Pavel Tuček, Ph.D.

Katedra matematiky a fyziky

Datum zadání diplomové práce:

8. listopadu 2023

Termín odevzdání diplomové práce:

17. května 2024

L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.

děkan

Ing. Daniel Honc, Ph.D. v.r.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 14. listopadu 2023

Prohlášení

Prohlašuji:

Práci s názvem „Modelování a implementace automatického řízení bilance elektrické energie pro domácnost s fotovoltaickým systémem, baterií a účastí na spotovém trhu s elektřinou“ jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 17. 05. 2024

Bc. Tomáš Mezera v.r.

Poděkování

V první řadě děkuji své rodině za psychickou a finanční podporu po celou dobu mého studia. Mé poděkování patří též panu doc. Mgr. Pavlu Tučkovi, Ph.D. za vedení této práce a věcné připomínky.

V Pardubicích dne 17.05.2024

Bc. Tomáš Mezera

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá problematikou měření a bilance energie v domě se stávajícím fotovoltaickým systémem rodinného domu. První část práce je věnována způsobům výroby a skladování elektrické energie a energetickému trhu v České republice. Dále sběru dat z jednotlivých senzorů, o spotřebě a výrobě elektrické energie v rodinném domě, v neposlední řadě návrhu algoritmů pro co nejefektivnější a nejekonomičtější řízení. Na závěr zhodnocení a zvážení kolik úspor by takovýto systém přinesl na úkor možného zhoršení pohodlí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotovoltaika, slunce, baterie, úložiště, spotový trh, PLC, řídicí systém, M-Bus, energetika, databáze, spotřeba elektrické energie, výroba elektrické energie, domácnost.

TITLE

MODELING AND IMPLEMENTATION OF AUTOMATIC CONTROL OF ELECTRICITY BALANCE FOR A HOUSEHOLD WITH A PHOTOVOLTAIC SYSTEM, A BATTERY, AND PARTICIPATION IN THE ELECTRICITY SPOT MARKET

ANNOTATION

This thesis deals with the issue of energy measurement and balance in a house with an existing photovoltaic system of a family house. The first part of the thesis is devoted to the methods of electricity production and storage and the energy market in the Czech Republic. Then the collection of data from individual sensors, about the consumption and production of electricity in the family house, finally the design of algorithms for the most efficient and economical control. Finally, an evaluation and consideration of how much savings such a system would bring at the expense of possible deterioration of comfort.

KEYWORDS

Photovoltaics, solar, batteries, storage, spot market, PLC, control system, M-Bus, energy, database, power consumption, power generation, household.

OBSAH

	Seznam zkratk a značek	10
	Seznam symbolů veličin a funkcí	11
	Seznam ilustrací	12
	Seznam tabulek	14
	Úvod	15
1	ENERGETIKA V ČR	16
1.1	Historie a současnost.....	16
1.2	Spotový trh.....	17
1.2.1	Průběhové měření	20
1.2.2	Cena elektřiny	20
2	FOTOVOLTAIKA.....	24
2.1	Fotovoltaický panel.....	24
2.2	Instalace FVE.....	27
2.3	Měnič	27
2.3.1	MPPT sledovač	29
2.4	Wattrouter	29
3	UKLÁDÁNÍ ENERGIE	30
3.1	Neobnovitelné zdroje akumulace.....	30
3.2	Obnovitelné zdroje akumulace.....	31
3.2.1	Akumulace tepla	31
3.2.2	Akumulace elektřiny	32
3.2.3	Způsoby akumulací	33
4	SDÍLENÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE	37
5	POUŽITÝ HW	39
6	KOMUNIKAČNÍ PROTOKOLY	40
6.1	M-BUS.....	40
6.2	Infra-rozhraní	41
6.3	MQTT	43
7	POPIS SAMOTNÉHO ŘEŠENÍ.....	45
7.1	Umístění panelů	45

7.2	Měření spotřeby spotřebičů.....	45
7.3	Stahování dat z webu	49
7.3.1	Spotové ceny	49
7.3.2	Předpověď počasí.....	51
7.4	Stahování místních dat.....	53
7.4.1	Tepelné čerpadlo	53
7.4.2	Fotovoltaický měnič.....	55
7.5	Home assistant	56
7.6	Algoritmy řízení.....	58
7.6.1	Modelová situace 1	58
7.6.2	Modelová situace 2	63
7.6.3	Modelová situace 3	64
8	ZÁVĚR	70
	Použitá literatura	71
	Přílohy	74

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

BMS	Battery Management System
CNG	Compressed Natural Gas
COP	Faktor účinnosti tepelného čerpadla
CRC	Cyklický redundantní součet
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
EAN	European Article Number
EDC	Elektroenergetické datové centrum
ERŮ	Energetický regulační úřad
HDO	Hromadné dálkové ovládání
IoT	Internet of Things, internet věcí
LiFePo4	Lithium-železo-fosfátový akumulátor
Li-ion	Lithium-iontový akumulátor
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquified Petroleum Gas
M-BUS	Meter-BUS
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NiCd	Nikl-kadmiový akumulátor
NiMH	Nikl-metalhydridový akumulátor
NT	Nízký tarif
OTE	Operátor trhu
OZE	Obnovitelný zdroj energie
PLC	Programmable Logic Controller
POZE	Podporované zdroje energie
PWM	Pulse Width Modulation – Pulzně šířková modulace
TČ	Tepelné čerpadlo
TUV	Teplá užitková voda
VT	Vysoký tarif

SEZNAM SYMBOLŮ VELIČIN A FUNKCÍ

S	povrch
V	objem
r	poloměr
Q	sdílený tepelný tok, W
α	součinitel přestupu tepla 5, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
t_m	průměrná povrchová teplota pláště, °C
t_L	teplota okolí, °C
T_i	teplota v čase i , °C

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 – Kachní křivka (BARTHOLOMEW, 2023)	19
Obr. 1.2 – Distribuční území v ČR (WOLF, 2024)	20
Obr. 1.3 – Ceny neregulované složky na území ČEZ Distribuce za rok 2023 a 2024..	22
Obr. 2.1 – Konstrukce FV článku (STANĚK, 2020).....	24
Obr. 2.2 – Struktura FV článku s PN přechodem (STANĚK, 2020).....	25
Obr. 2.3 – Energetická návratnost výroby FV panelu (FRAUNHOFER ISE, 2021) ...	25
Obr. 2.4 – Konstrukce panelu (FVESYSTEMY, 2021)	26
Obr. 2.5 – VA charakteristika panelu se zatěžovací přímkou (ENSLIN, 1997).....	29
Obr. 3.1 – Dům podle principů návrhu solární architektury (ZILVAR, 2018).....	31
Obr. 3.2 – Schéma přečerpávací elektrárny (ČEZ, 2003a)	36
Obr. 3.3 – Porovnání technologií pro skladování energie (BAŠTA, 2020).....	36
Obr. 6.1 – IR rozhraní Fiedler AMS ELM2.....	42
Obr. 7.1 – Graf spotřeby lednice	46
Obr. 7.2 – Graf spotřeby mrazáku.....	47
Obr. 7.3 – Graf spotřeby pračky	48
Obr. 7.4 – Graf spotřeby myčky	48
Obr. 7.5 – Blokové schéma zapojení logovacího zařízení měření spotřeb	49
Obr. 7.6 – Vývojový diagram stahování dat z OTE.....	51
Obr. 7.7– Nezpracovaná data o předpovědi osvitů v hodinových intervalech	52
Obr. 7.8 – Administrátor MySQL databáze s daty o spotových cenách.....	52
Obr. 7.9 – Administrátor MySQL databáze s daty o osvitů.....	53
Obr. 7.10 – Ovládací panel UTI-IQCP	53
Obr. 7.11 – Vývojový diagram stahování dat z TČ	54
Obr. 7.12 – Administrátor MySQL databáze s daty o TČ	55
Obr. 7.13 – XML data z TČ	55
Obr. 7.14 – Aktuální distribuce energie Home Assistant	57
Obr. 7.15 – Graf spotových cen Home Assistant.....	57
Obr. 7.16 – Graf solární produkce Home Assistant.....	57
Obr. 7.17 – Vývojový diagram vybíjení baterie do spotřeby.....	59
Obr. 7.18 – Graf spotřeby, spotových cen a baterie.....	60
Obr. 7.19 – Graf nabíjení/vybíjení 10kWh baterie a spotřeby domu.....	61
Obr. 7.20 – Vývojový diagram nejlevnější cena pro spuštění myčky	62

Obr. 7.21 – Graf spotových cen s nejlevnější dobou pro provoz myčky	62
Obr. 7.22 – Graf ceny za den při zvyšování kapacity baterie	63
Obr. 7.23 – Graf nabíjení/vybíjení 40kWh baterie a spotřeby domu.....	63
Obr. 7.24 – Vývojový diagram topení v domě	66
Obr. 7.25 – Graf topení v domě, všední den, $T_o = +7\text{ }^{\circ}\text{C}$	67
Obr. 7.26 – Graf topení v domě, víkend, $T_o = +7\text{ }^{\circ}\text{C}$	67
Obr. 7.27 – Graf topení v domě, všední den, $T_o = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$	68
Obr. 7.28 – Graf topení v domě, víkend, $T_o = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$	68

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 - Poměr objemu ku povrchu koule.....	35
Tab. 3.2 - Výpočet poměrné ztráty sdílením tepla do okolí.....	35
Tab. 5.1 - Použitý HW	39
Tab. 7.1 - Vlastnosti tepelného čerpadla.....	64
Tab. 7.2 - Diferenciální rovnice energetického modelu domu	65

ÚVOD

Hospodaření se zdroji energie je v dnešní době klíčovým tématem. S rostoucí populací a stále větší závislostí na elektřině se stává efektivní využívání obnovitelných zdrojů nezbytností. Jedním z nejvýznamnějších zdrojů je solární energie, která se získává pomocí fotovoltaických panelů. Za posledních 15 let zaznamenala Česká republika dynamický rozvoj v oblasti obnovitelných zdrojů energie. Od roku 2009, kdy byla přijata legislativa podporující instalaci solárních panelů, se instalovaná kapacita fotovoltaických elektráren výrazně zvýšila. Dnes k tomu přispívá kombinace příznivých dotačních programů, klesajících nákladů na technologie a rostoucího povědomí o ekologických přínosech obnovitelných zdrojů. Tento růst je podporován nejen domácnostmi, které stále častěji investují do solárních panelů na střechy svých domů, ale také velkými solárními parky. Fotovoltaika se tak stává klíčovým hráčem v energetickém mixu České republiky a významně přispívá k naplňování cílů v oblasti snižování emisí skleníkových plynů a zvyšování energetické soběstačnosti.

Energetický mix České republiky představuje kombinaci různých zdrojů energie, které společně zajišťují stabilní a spolehlivou dodávku elektřiny pro domácnosti, průmysl a služby. Tradičně dominovaly energetickému mixu fosilní paliva, především uhlí, které po desetiletí hrálo klíčovou roli v energetické stabilitě země. V posledních letech však dochází k výrazným změnám v důsledku globálních tlaků na snižování emisí skleníkových plynů, růstu cen fosilních paliv a technologického pokroku v oblasti obnovitelných zdrojů energie. Tyto faktory vedou k rostoucímu podílu obnovitelných zdrojů, jako jsou fotovoltaické a větrné elektrárny, v českém energetickém mixu. Spolu s jadernou energií, která je dalším významným prvkem, tyto zdroje přispívají k rozšíření energetického mixu a posilování energetické soběstačnosti České republiky.

Cílem diplomové práce je uchopit problematiku optimalizace nákladů a tím zrychlení návratnosti fotovoltaického systému instalovaného na střeše rodinného domu. Úvod práce se věnuje obecnému popisu historie energetiky v České republice, dále je probíráno napojení na spotový trh a tím šetření nákladů. Další část se zabývá fotovoltaikou obecně a různými způsoby akumulace energie. Ve čtvrté kapitole je shrnutá teprve vycházející novela zákona o možnostech sdílení elektřiny. V praktické části je rozebrán způsob napojení energeticky významných spotřebičů v domácnosti do řídicího systému, sběr dat ze senzorů, spotové ceny a předpověď počasí z internetu. V poslední kapitole jsou rozebrány modelové situace, ve kterých jsou nasimulovány a přehledně zobrazeny jednotlivé řídicí algoritmy.

1 ENERGETIKA V ČR

1.1 Historie a současnost

Na počátku všeho bylo kolo, nejprve hnané silou lidských a zvířecích svalů, později vodou. Tato mechanická otáčivá energie byla od 8. století využívána například pro mletí obilí, řezání dříví nebo k pohonu kovářských měchů. Pro změnu rychlosti a směru otáčení bylo využíváno různých mechanismů, soukolí, palečníků, nejčastěji tesaných ze dřeva. Časem se ovšem zjistilo, že sebelepší mlýnské kolo nedosáhne účinnosti větší než 30 %. Pro větší sílu bylo nutné přidávat více vodních kol. Vědecké poznatky o hydromechanice vedly k používání vodních turbín, které dosahovaly až 80% účinnosti. Přecházelo se i na vhodnější materiál, kterým byl kov. Takové turbíny se daly přesněji opracovat, měly delší životnost, možnost naklápění lopatek na duté hřídeli (ČEZ, 2003b).

Vodní turbína patří k nejúčinnějším motorům vůbec. Zatímco vodní kola zužitkují pouze tlak vody a polohovou (potenciální) energii na lopatky, v případě turbíny ještě i její hmotnost a pohybovou (kinetickou) energii vody. Voda proudící turbínou, na rozdíl od vodního kola, působí na všechny lopatky současně. Většina turbín má navíc ještě rozváděcí pevné kolo, které zaručí, aby voda na lopatky přicházela vždy v tom neoptimálnějším směru. Takové turbíny už bývají běžně propojené s generátory pro výrobu elektrické energie (ČEZ, 2003b).

Další z dávno zkrocených živlů je vítr. Přestože z něj dokážeme vytěžit jen malou část, má velký potenciál obnovitelné energie do budoucna. Stejně jako vodní mlýn, i větrný mlýn je sestaven z lopatek soustředěných do kruhu. Větrný mlýn se využíval jako pohon při mletí obilí, kování, řezání dřeva, tkaní a čerpání vody ze studny. Nejvíce větrných mlýnů vzniklo v Nizozemí, protože zde byla vhodná krajina pro jejich výstavbu. Na Moravě ve 13. století bylo odhadem 680 mlýnů. Pro svou hlučnost se však stavěly co nejdále od obydlených míst. V průběhu času se vylepšovala konstrukce větrných kol a bylo zjištěno že největší teoretická účinnost dosahuje 59 %. Větrné kolo snižuje rychlost vzdušného proudu, čímž se část pohybové energie přeměňuje na mechanickou. Zmenšením počtu lopatek dojde ke zvýšení rychlosti otáčení. Větrná elektrárna má nejlepší účinnost při konstantní dané rychlosti proudění větru. Pro každé nové umístění větrného kola je nutné určit správný pracovní bod, který je stanoven konstrukcí pro dosažení nejvyšší účinnosti (ČEZ, 2003b).

Další odstavec bude pojednávat o energii ze slunce. Všechny předešlé zdroje energie, ač se to nezdá, představují přeměněnou sluneční energii. Lze říci, že vodní energie je nepřímým produktem sluneční energie, protože slunce je základním zdrojem energie pro vodní cyklus. Sluneční energie zahřívá povrch Země, což způsobuje odpařování vody z oceánů, jezer, a řek.

Tento proces vytváří vodní páru, který se později kondenzuje a vytváří srážky. Srážky pak naplňují vodní toky, na kterých stojí vodní elektrárny. Větrná energie je další formou energie, která je nepřímo odvozena ze sluneční energie. Sluneční energie způsobuje nerovnoměrné ohřevy na povrchu Země, což vytváří změny teploty a tlaku vzduchu. Tlakové rozdíly způsobují pohyb vzduchu, což vytváří větry. Větry jsou proudy vzduchu, které se pohybují od oblastí s vyšším tlakem k oblastem s nižším tlakem, aby vyrovnaly tlakové rozdíly (ČEZ, 2003b).

Samotnou energii ze slunce je možné získat přímou přeměnou pomocí fotovoltaického jevu a nepřímou přeměnou, založenou na získání tepla. O fotovoltaice pojednává samotná kapitola 2. Proces nepřímé přeměny energie spočívá v získávání tepla. Toho dosahujeme pomocí solárních sběračů, které jsou tvořeny černými nádobami. Tyto nádoby slouží jako ohnisko pro mnoho zrcadel, která soustřeďují solární paprsky přímo do středu solárního sběrače. V solárním sběrači je možné převést teplo na elektřinu například pomocí termoelektrického článku, nebo Stirlingova motoru. Výroba tepla ze sluneční energie je ještě snazší, nejjednodušší zástupce je skleník, zde dochází ke skleníkovému efektu, kdy sklo umožňuje vstup slunečního záření do skleníku a zároveň zabraňuje úniku tepelné energie zpět do vesmíru, což způsobuje zvýšení teploty uvnitř skleníku. Další ze známých zařízení je sluneční ohřívač vody, tam slunce ohřívá černou hadici, které absorbuje velké množství paprsků, v té cirkuluje voda, která se tak ohřívá. Takové zařízení ušetří značné množství energie v domácnostech i zemědělství (ČEZ, 2003b).

Svět stále hledal zdroj energie, který by byl nezávislý na přírodních silách. To se podařilo až s vynálezem parního stroje. Nevýhodou je, že velká většina takovýchto elektráren funguje na principu spalování fosilních paliv, tedy převážně z neobnovitelných zdrojů.

1.2 Spotový trh

Hlavním účelem spotového trhu je zajistit rovnováhu mezi nabídkou a poptávkou po elektrické energii. Na tomto trhu se setkávají dodavatelé elektřiny, kteří nabízejí elektřinu k prodeji, a odběratelé, kteří ji nakupují. Ceny elektřiny na spotovém trhu se mohou měnit v závislosti na mnoha faktorech, kterými jsou nabídka a poptávka, počasí, výrobní náklady, regulace a jiné tržní podmínky.

Aby bylo možné zajistit rovnováhu mezi nabídkou a poptávkou, neboli nalézt energetickou rovnováhu, je zapotřebí uchovat tržní cenu pohyblivou a mít co nejvíce velkých odběratelů na spotových cenách. Protože v době, kdy je elektrické energie přebytek a už ji nemá kdo využít se zvyšuje napětí a došlo by k blackoutu. Sít' tuto přebytečnou energii nepojme, je

třeba cenu na spotu snížit klidně i pod nulu, vznikne tak paradox, že odběratel za spotřebovanou energii dostává dokonce zapláceno. V tuto chvíli si každá elektrárna rozmyslí, jestli ještě chce vyrábět, posílat energii do sítě a ještě platit za to, že ji vyrábí a nebo zastavit výrobu a přestat dodávat. Odběratel se naopak snaží tuto levnou energii využít a spotřebovat ji co možná nejvíce. Tímto tlakem na cenu se trh automaticky stabilizuje, protože elektrárny, které je možno snadno ztlumit (odlehčit) tak to udělají. U těch, u kterých to není možné jako např. jaderné se musí počítat s tím, že se trh stabilizuje pomocí jiných elektráren a zvýšením odběru ať už odběrateli, nebo nějakou akumulací např. přečerpávací elektrárnou.

Stejná situace nastane i v opačném případě, když je elektřiny nedostatek, napětí v síti klesá a cena roste. Zde fotovoltaické elektrárny nic nezmohou, protože často v těchto chvílích bývá zataženo a více už vyrábět nemohou. Aby se ukojila tato vysoká poptávka po energii, vodní a přečerpávací elektrárny otevřou svá stavidla, aby vydělaly na dražší energii (a dodaly ji) naopak spotřebitel za takto vysokou cenu už odmítne nakupovat a raději omezí svou spotřebu, tím ubyde požadavek na takové množství energie a trh se zas automaticky stabilizuje. Do toho samozřejmě mohou vstupovat i celoevropské energetické dovozy, vývozy, které se snaží tyto výkyvy také pokrýt.

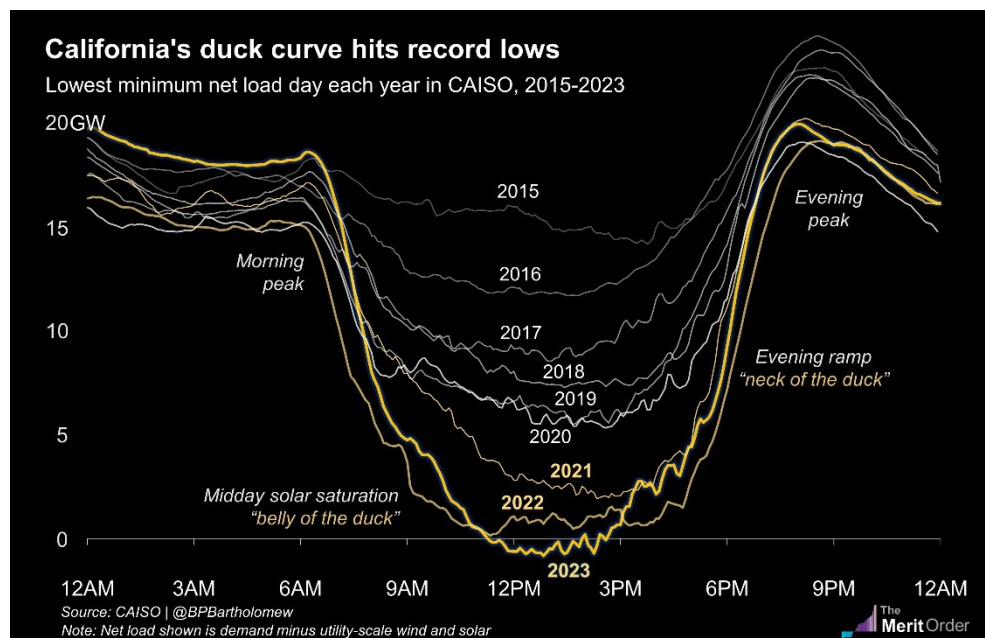
Poplatek za systémové služby pomáhá spotovému trhu udržet energetickou rovnováhu. Tento trh je regulován a dohlížen Energetickým regulačním úřadem. Celkově lze říci, že spotový trh elektřiny hraje klíčovou roli při zajištění efektivního a spolehlivého fungování elektrického systému a podporuje konkurenceschopnost a inovace v energetickém odvětví.

Mnoho lidí má obavu ze spotového trhu, protože ceny energie nejsou fixované, ale jsou určeny trhem. Každý den operátor trhu OTE sestavuje pomocí algoritmu „merit order“ ceny elektrické energie na jednotlivé hodiny dalšího dne. Ceny jsou udávány v eurech za MWh, protože Česká republika je součástí celoevropského trhu. Každý stát má svého vlastního operátora trhu, který vypočítává hodinové ceny na základě jeho parametrů, tedy jeho výrobních prostředků a objem spotřeb v daném státě. Z toho vyjde, ve které hodiny může energii vyvážet a kdy ji bude muset nakupovat z okolních zemí (HINCL, 2023).

„Merit order“ je klasifikační systém používaný k určení pořadí, ve kterém by měly být použity různé zdroje elektřiny, aby co nejefektivněji uspokojily poptávku. Merit order je založen na mezních nákladech každého zdroje energie, přičemž tyto zdroje jsou seřazeny podle svých variabilních nákladů na výrobu. Tento systém optimalizuje využití různých elektráren a

jiných zdrojů, zároveň však zachovává spravedlivé tržní prostředí pro všechny zúčastněné výrobce (NANO ENERGIES, 2024).

V rámci „merit order“ jsou obvykle zdroje energie seřazeny od nejlevnějších po nejdražší. Nejlevnější zdroje, kterými jsou obnovitelné zdroje energie (OZE) s nízkými provozními náklady (např. větrné elektrárny a solární elektrárny) nebo jaderné elektrárny s vysokými fixními náklady a nízkými variabilními náklady na výrobu elektřiny, jsou umístěny na začátku merit order. Tyto jsou obvykle spuštěny nejdříve, protože nabízejí elektřinu za nejnižší ceny. Naopak, zdroje s vyššími náklady na výrobu elektřiny, jako jsou plynové elektrárny nebo uhelné elektrárny, jsou umístěny na konci merit order. Ty jsou obvykle spuštěny pouze v době, kdy je poptávka po elektřině vysoká a je potřeba doplnit produkci z levnějších zdrojů. Merit order tedy umožňuje efektivní a hospodárné využívání různých zdrojů energie v energetickém systému, přičemž se preferují ty zdroje, které nabízejí elektřinu za nejnižší ceny. Tento koncept je důležitý při plánování provozu a optimalizaci energetických systémů. Kachní křivka zobrazuje graf spotřeby elektřiny v průběhu dne. V průběhu let je patrné čím dál větší zapojení fotovoltaické energie. To je znázorněno prohlubováním křivky, kdy v poledne hodně svítí a zároveň nemá energii kdo spotřebovat může být poptávka i záporná. Naopak večer po západu slunce je elektřiny najednou zas nedostatek, solární produkce klesá a poptávka po elektřině roste (KADLECOVÁ, 2024).



Obr. 1.1 – Kachní křivka (BARTHOLOMEW, 2023)

1.2.1 Průběhové měření

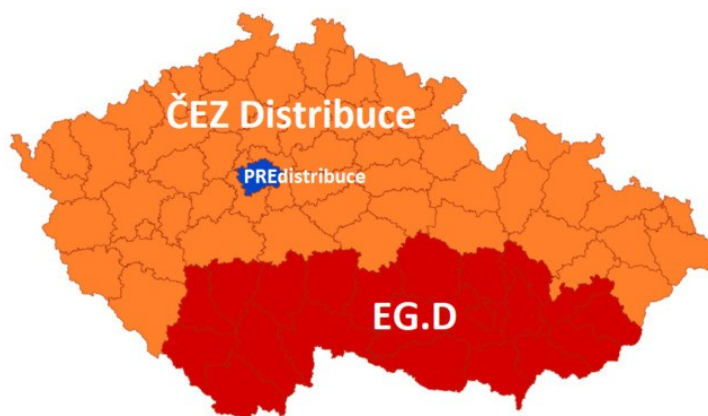
Čtyřkvadrantní (4Q) elektroměr s průběhovým měřením je fakturační zařízení, bez kterého není možné být připojen na spotový trh. Na rozdíl od běžného fakturačního elektroměru, který zobrazuje jen sumu spotřebované energie od instalace na odběrné místo, průběhový elektroměr tuto sumu počítá pro každou čtvrt hodinu a odesílá distributorovi na daném území. Obchodník, přes kterého je nákup energie na spotovém trhu prováděn, každý měsíc pomocí čísla EAN (čísla elektroměru) požádá o tyto hodnoty, tedy o objem odebrané elektřiny za každou jednu hodinu (součet čtvrt hodin) v daném měsíci. Na jejich základě je vynásobí s hodinovými cenami na spotovém trhu, sečte a výslednou částku s dalšími poplatky vyfakturuje zákazníkovi na daném odběrném místě.

1.2.2 Cena elektřiny

Pozor, cena na spotovém trhu je pouze neregulovaná část ceny energie, ke které je třeba připočít ještě regulovanou složku, tu každoročně určuje Český regulační úřad.

REGULOVANÁ ČÁST

Státem regulovaná složka obsahuje poplatky spojené s dodáním elektřiny z elektrárny až do odběrného místa. Cena se může mírně lišit dle distribučního území. V České republice jsou tři distribuční území – ČEZ distribuce, PRE distribuce a EG.D (dříve E.ON distribuce). Platí ji každý, kdo odebírá elektrickou energii ze sítě, nezáleží, jestli za fixní nebo spotové ceny. Stanovení regulovaných složek cen je vázáno energetickým zákonem, ten jasně říká, že regulované ceny musejí pokrývat ekonomicky oprávněné náklady na zajištění spolehlivého, bezpečného a efektivního provozu energetických soustav (ERÚ, 2023).



Obr. 1.2 – Distribuční území v ČR (WOLF, 2024)

Největší částí regulované složky je distribuční poplatek, který v sobě zahrnuje náklady spojené s údržbou a rozšiřováním distribuční soustavy, tj. stožáry, rozvodny, transformátory... Pokud je na odběrném místě elektrické topení, nebo velký spotřebič, může být zažádáno o změnu distribuční sazby na dvoutarifní sazbu vysoký tarif (VT), nízký tarif (NT) někdy známý jako denní a noční proud, neboli HDO. Toto je předchůdce spotových cen, kdy bylo potřebné zákazníky s velkým odběrem donutit, aby elektřinu spotřebovávali v době, kdy je jí přebytek, nebo alespoň, aby velkoodběrová zařízení nebyla v provozu ve stejném okamžiku na celém území. Bojler se obvykle v domácnosti zapojoval na nízký tarif výměnou za to, že distributor nabídl menší cenu regulované části v době NT. Boiler je dobře zaizolovaný, má velkou tepelnou kapacitu, takže pokud je dostatečně naddimenzovaný, stačí se nahřát v době NT na celý den a nemusí připojen k síti v době VT.

Další z částí je poplatek za rezervovaný příkon neboli velikost hlavního jističe. Pokud je na odběrném místě více spotřebičů anebo mají vyšší spotřebu el. energie, je třeba větší kapacita jističe. Další položkou je příspěvek na obnovitelné zdroje energie (POZE), ten platí každý spotřebitel povinně. Tímto příspěvkem se dotuje vyšší výkupní cena „čisté energie“ z obnovitelných zdrojů. Poplatek za systémové služby pomáhá zajistit udržování výkonové rovnováhy. Poslední je poplatek operátorovi trhu OTE, ten se stará o spotový trh a formality spojené s přechodem zákazníků k jinému dodavateli. Některé části jsou fixní měsíční, jiné jsou hrazené za odebranou MW/h (EON, 2023).

2023		
distribuce D57D	VT	NT
	311,07	179,98
služba obchodu	300,00	300,00
daň z elektřiny	28,30	28,30
ČEPS	113,53	113,53
OZE	0,00	0,00
Kč / 1 MWh	752,90	621,81
DPH 21 %	158,11	130,58
Kč / 1 MWh + DPH	911,01	752,39

2024		
distribuce D57D	VT	NT
	648,62	438,09
služba obchodu	450,00	450,00
daň z elektřiny	28,30	28,30
ČEPS	212,82	212,82
OZE	495,00	495,00
Kč / 1 MWh	1834,74	1624,21
DPH 21 %	385,30	341,08
Kč / 1 MWh + DPH	2220,04	1965,29

Měsíční platby 2023	
jistič 3×32A	436,00
zúčtování OTE	3,43
Kč / měsíc	439,43
DPH 21 %	92,28
Kč / 1 MWh + DPH	531,71

Měsíční platby 2024	
jistič 3×32A	500,00
zúčtování OTE	4,14
Kč / měsíc	504,14
DPH 21 %	105,87
Kč / 1 MWh + DPH	610,01

Denní platby 2023 (dodavatel silové elektřiny) BezDodavatele	
stálý plat	4,18
Kč / den	4,18
DPH 21 %	0,88
Kč / 1 MWh + DPH	5,06

Denní platby 2023 (dodavatel silové elektřiny) BezDodavatele	
stálý plat	4,18
Kč / den	4,18
DPH 21 %	0,88
Kč / 1 MWh + DPH	5,06

Obr. 1.3 – Ceny neregulované složky na území ČEZ Distribuce za rok 2023 a 2024

NEREGULOVANÁ ČÁST

Neregulovaná část, někdy zvaná jako obchodní neboli cena za silovou elektřinu, je částka za 1 MW/h odebrané nebo dodané elektřiny. Dodavatele silové elektřiny si můžeme svobodně zvolit anebo např. na základě výhodnější nabídky změnit. Tradičně se uzavírají smlouvy na dobu fixní, a to obvykle na jeden až tři roky, nebo mohou být sjednány na dobu neurčitou, kdy v takovém případě je cena často ještě vyšší než u fixních smluv. V průběhu těchto smluvních období je možnost během tří měsíců přejít k jinému dodavateli. V té chvíli riziko kolísání cen energie na trhu přebírá dodavatel (obchodník). Za tuto službu si však nechá adekvátní odměnu a nastaví fixní cenu tak, aby byla většina času vyšší než spotové ceny. Nově se na trhu objevili dodavatelé s nabídkou nákupu za spotové ceny. Někteří nabízejí výhodu levnější energie v případě nákupu i prodeje u stejné společnosti, jiní si dokonce podmiňují nákup i prodej u stejné společnosti. Ovšem většina se od sebe liší jen velikostí poplatku za zprostředkování.

ODBĚR VS DODÁVKA

Případě odběru elektřiny (prodeje z pohledu obchodníka) se platí jak neregulovaná, tak i regulovaná část ceny. Ovšem v případě přetoků do sítě neboli dodávky (výkupu z pohledu obchodníka) se platí pouze neregulovaná obchodní část ceny. Tedy zjednodušeně poplatky za distribuci platí vždy ten, kdo spotřebovává, odebírá energii.

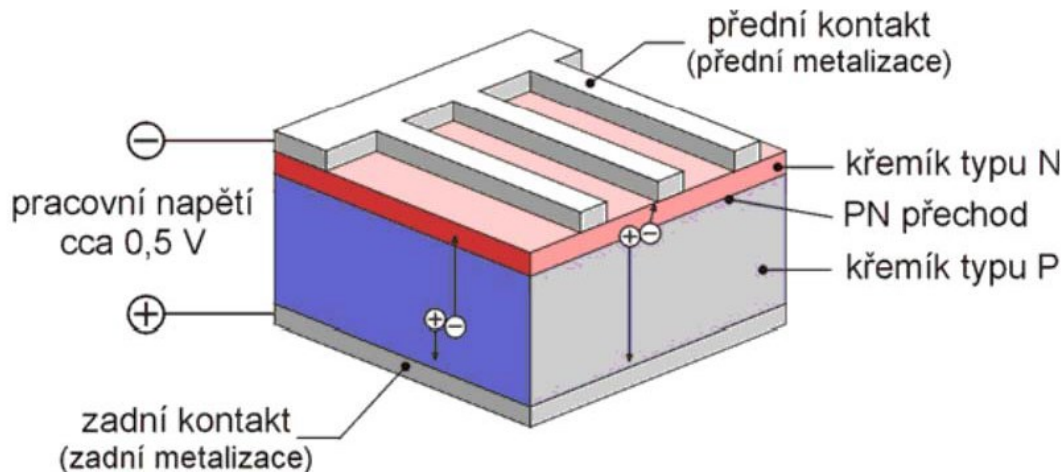
Pokud je tedy na odběrném místě nainstalován elektroměr s průběhovým měřením, a je schválen rezervovaný výkon u distributora, je možné přebytečnou energii z fotovoltaiky nechat přetékat do sítě. Tento opačný chod a jeho výši zaznamená náš fakturační elektroměr. V případě že máme s některým obchodníkem smlouvu o výkupu proběhne na konci měsíce vše stejně jako v případě nákupu. Ovšem pozor, tady může mít jedno odběrné místo (jeden elektroměr) 2 EANy. Jeden EAN pro odběr a druhý pro výkup. Je tedy možné mít jiného obchodníka na odběr a jiného na výkup. Každý obchodník musí mít svůj EAN nemůžou se podělit o jeden. V případě výkupu přebytku energie existuje několik možností. Obchodník, ať už je jeden nebo dva, odebere energii a zaplatí v souladu se smluvními podmínkami. Může to být buď na základě spotových cen, což v době, kdy převažuje fotovoltaika v letním období, může být nevýhodné, protože cena na trhu může klesat až do záporných hodnot. Naopak na podzim 2022, kdy spotová cena energie dosáhla 17300 Kč/MW/h, by byl výkup velmi výhodný. Nebo je možné se domluvit na výhodné fixované ceně, například na podzim 2023 to mohlo být 3500 Kč/MW/h. Další možností je výkup za kredity, který umožňuje levnější odběr elektřiny u toho samého obchodníka (tzv. virtuální baterie). Nicméně nejvýhodnější je spotřebovat vyrobenou energii pro vlastní potřebu.

2 FOTOVOLTAIKA

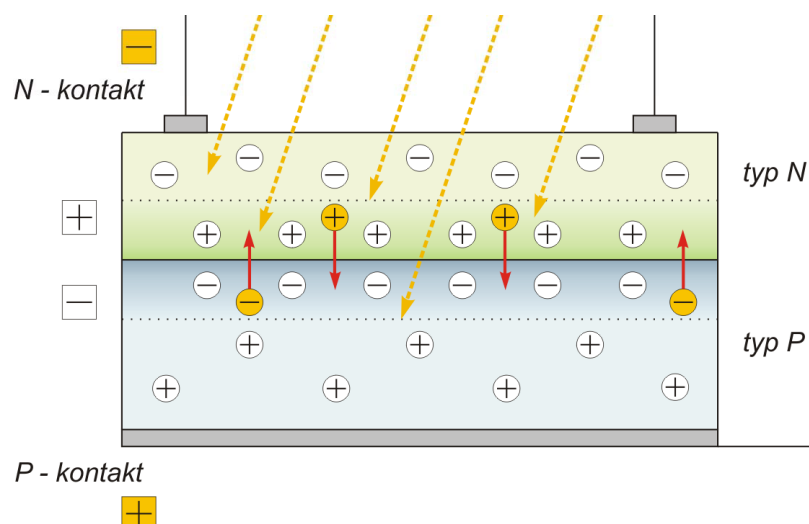
Fotovoltaika je souhrnné označení pro technologii, která umožňuje přímou přeměnu slunečního záření na elektrickou energii. Jedná se o obnovitelný zdroj elektrické energie s bezhlučným provozem a nulovou produkcí škodlivin. Fotovoltaika najde široké uplatnění v napájení systémů v nejrůznějších oblastech. Od kosmonautiky k napájení družic, přes velká fotovoltaická pole až po odlehlé samoty, které se musí spolehnout na ostrovní výrobu energie, protože připojení k distribuční síti by bylo finančně příliš nákladné.

2.1 Fotovoltaický panel

Fotovoltaický panel je složen ze sériové a paralelní kombinace fotovoltaických článků. Fotovoltaický článek je jednoduchý PN přechod, který má zadní stranu kovovou a přední buď kovovým hřebenem anebo transparentními vodiči. Při osvětlení PN přechodu, fotonová energie uvolní elektrony z valenčního pásma do vodivostního pásma. Tím vznikne stejnosměrný elektrický proud, který může konat práci. Výstupní napětí článku je obvykle 0,6 V.

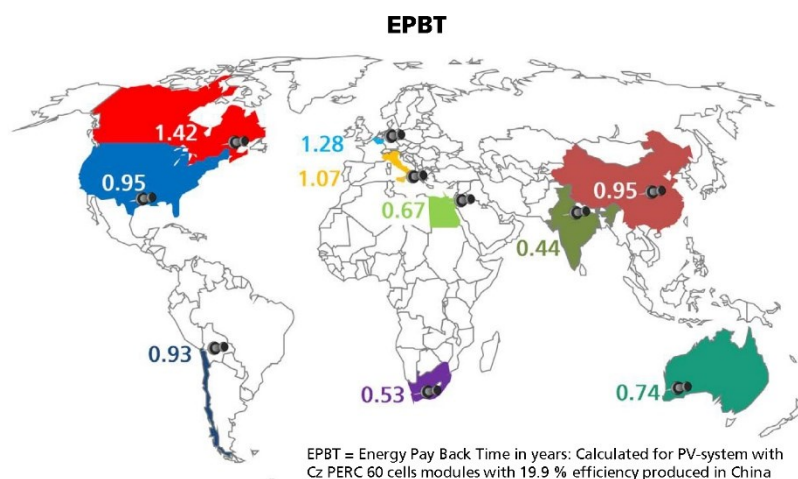


Obr. 2.1 – Konstrukce FV článku (STANĚK, 2020)



Obr. 2.2 – Struktura FV článku s PN přechodem (STANĚK, 2020)

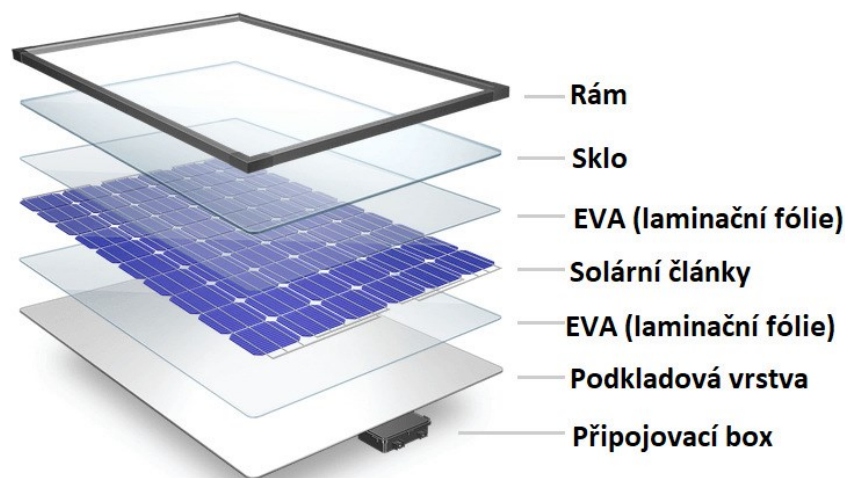
Základním stavebním prvkem fotovoltaického článku je krystalický křemík, jeho výroba je ovšem velmi energeticky náročná. Dříve z důvodu nízké účinnosti se spekulovalo, zda vůbec dokáže fotovoltaický panel splatit svůj výrobní energetický dluh. Dnes už je naštěstí účinnost mnohem vyšší. V roce 2020 byla účinnost běžně dostupných panelů 19,9 %. Energetická návratnost závisí nejen na šetrnosti výroby, ale i na intenzitě a době osvětlení. Proto v oblasti u rovníku dochází logicky k nejkratší návratnosti. V Indii a v Jihoafrické republice je návratnost přibližně půl roku, v Evropě je to asi rok a čtvrt. Tedy pokud by měl takovýto panel životnost 30 let, vyrobil by 30x více energie, než bylo třeba na jeho vytvoření (ZILVAR, 2021).



Obr. 2.3 – Energetická návratnost výroby FV panelu (FRAUNHOFER ISE, 2021)

Typickou vlastností křemíkových solárních článků je teplotní závislost výkonu, ten klesá o 0,5 % při nárůstu provozní teploty o 1 °C. Výkon dále závisí na intenzitě slunečního záření a slunečním spektru. Nejběžnější jsou polykrystalické a monokrystalické panely. Polykrystalické panely se používaly v době rozmachu fotovoltaiky 2012 – 2016, protože byly asi o 25 % levnější, ovšem dosahovali účinnosti pouze 13 – 18 %. V dnešní době se již polykrystalické panely téměř nevyrábí, protože monokrystalické výrazně zlevnili. V poměru cena - výkon - plocha jednoznačně vítězí. Mají účinnost 15 – 20 %. Ovšem z ekologického hlediska je šetrnější výroba polykrystalu. Při zpracování monokrystalu dochází k většímu ořezu, a i výroba je komplikovanější (VS ELEKTRO, 2020).

Křemíkové články je možné vyrábět v různém tvarovém i barevném provedení. Tyto články jsou velmi křehké, proto musí být dobře chráněny proti povětrnostním vlivům. Jednotlivé články jsou sérioparalelně pospojovány, vakuově zalaminovány, zezadu opatřeny kompozitní fólií a zepředu vysoce transparentním sklem. Celý tento panel je ještě pro zvýšení tuhosti ohraněn hliníkovým rámem. Na zadní straně jsou vyvedeny konektory.



Obr. 2.4 – Konstrukce panelu (FVESYSTEMY, 2021)

Nejlevnějším typem článků jsou amorfní z důvodu nejjednodušší výroby. Výhodou je, že dokáží vyrábět energii i pod umělým osvětlením a za velmi nízkého osvětlení. Navíc jsou velmi tenké a flexibilní. Dají se vyrobit i jako semi-transparentní, moderní architekti je využívají místo tradičního zasklení a jako výplně do otvorů. Bohužel dosahují účinnosti jen 7 až 11 % a mají nízkou životnost (HLADÍK, 2023).

V památkově chráněných oblastech z důvodu estetiky památkáři nedovolí instalaci běžných deskových panelů. Pro tyto případy se hodí speciální tašková konstrukce

s integrovanými články nebo semi-transparentní amorfni výplně. Tyto konstrukce mají mnohem horší poměr cena/výkon, takže je na zvážení, jestli je investice do nich opravdu efektivní (NPÚ, 2022).

Dále existují experimentální články s vysokou účinností používající vícevrstvé PN přechody. Pro pojmání více energie se tvarují do různých nano struktur. Ovšem z důvodu vysoké ceny zůstávají pouze ve výzkumu a pro specializované aplikace.

2.2 Instalace FVE

U rodinných domů existují dva možné způsoby instalace fotovoltaických systémů. První možnost je, že zkušenější elektrikáři si mohou namontovat fotovoltaiku svépomocí. Avšak tato cesta často naráží na řadu byrokratických překážek, jako jsou žádosti o dotace, připojení k distribuční síti, projektová dokumentace a revize. Proto se svépomocí obvykle montují pouze ostrovní systémy s ohřevem TUV (topnými patronami), které jsou izolovány od elektrické sítě.

Druhým způsobem, je nechat si namontovat fotovoltaiku od instalační firmy, která většinou vyřeší vše za vás - projekt, montáž, vyřízení dotace i následné připojení k distribuční síti pro prodej přebytků. Při výběru instalační firmy je nutné být ostražitý a pečlivě prověřovat jejich historii. V současné době se na trhu objevuje mnoho firem s pochybnou nebo dokonce žádnou historií. Tyto společnosti často přijímají zálohy od tisíců domácností, ale následně zkrachují, aniž by provedly instalaci fotovoltaických systémů. V důsledku toho domácnosti zůstanou bez fotovoltaiky i bez finančních prostředků.

2.3 Měnič

Fotovoltaický měnič neboli invertor je zařízení používané k přeměně stejnosměrného proudu (DC), který je produkovaný solárními panely na střídavý proud (AC), který je vhodný pro distribuci do elektrické sítě nebo pro spotřebu v domácnostech či průmyslových zařízeních.

Měnič se skládá z několika částí. MPPT sledovače, ten je využíván pro maximalizaci výkonu fotovoltaických panelů. Střídače, který mění stejnosměrnou energii vyrobenou fotovoltaickým panelem na střídavou s přibližně stejnými parametry, jako jsou v distribuční síti. Další část měniče je DC/DC měnič, ten slouží ke změně stejnosměrného napětí, vhodného pro nabíjení akumulátoru. Poslední ze zásadních částí je AC/DC měnič, ten mění střídavé napětí ze sítě na stejnosměrné, například pro dobíjení baterie v době levné elektřiny na trhu.

Měniče se dále dělí na Off-Grid - bez možnosti připojení k síti a On-Grid – které jsou schopné provozu pouze se sítí. Nejčastěji používaná je poslední varianta a to Hybridní, ten je schopen jak provozu ostrovního, tak toho paralelního se sítí (NEMAKEJ, 2021).

Off-Grid měnič pracuje v ostrovní režimu, může být několika typů. Ten nejzákladnější obsahuje pouze MPPT tracker a BMS baterie. Je vhodný například pro karavany a obytné dodávky, které mají jen malé množství panelů na střeše vozidla a všechny spotřebiče jsou upravené na stejnosměrné napětí z akumulátoru. Takový měnič se stará pouze o dobíjení akumulátoru. Pokročilý typ Off-Grid měniče obsahuje výše zmiňované, navíc má ještě střídač, který dovede modulovat sinusový 50Hz signál podobný síťovému napětí. Je tedy možné na něm provozovat standardní zařízení na 230 V.

On-Grid a hybridní měniče se provozují v síti, takový měnič se musí umět korektně přifázovat. Nejprve střídač poslouchá, v jaké části periody se zrovna síť nachází, poté si rozkmitá vlastní zdroj napětí a jakmile se podaří dostat oba signály do stejné fáze, propojí stykačem obě sítě a tím se přifazuje k hlavní rozvodné síti a je schopen dodávat do sítě proud.

Nejpoužívanější měniče v domácnostech jsou On-Grid, případně hybridní. Měniče dokáží pracovat v několika režimech:

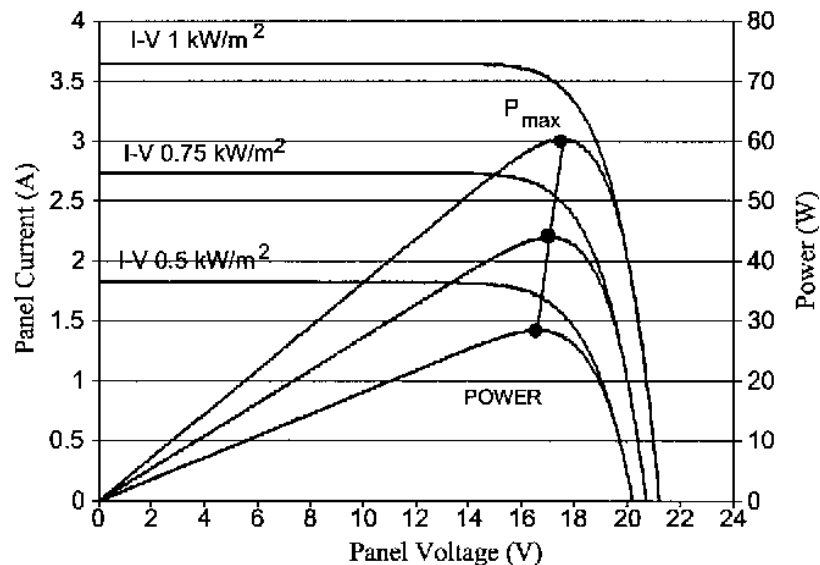
Self Use – vlastní spotřeba, pokud je solární energie dostatek, je touto energií vykrývána spotřeba v domě, pokud je této energie přebytek, tak se přebývající část využije pro nabíjení baterie, jakmile se baterie dobije a dům energii nedokáže spotřebovat, hrozí že dojde k přetoku do sítě. Tomu je dobré zamezit například omezením výroby, nebo lépe použitím Wattrouteru. Pokud je sjednána výhodná smlouva o výkup přebytků je samozřejmě možné nechat tuto energii přetékat do sítě.

Režim zálohy – je vhodný v místech s častými výpadky dodávek energie. Funguje podobně jako SelfUse, ale udržuje nabitou baterii na nastavené úrovni a je připraven pokrýt případný výpadek sítě z baterie.

Na trhu existuje ještě další druh měniče, tomu se říká měnič pro fotovoltaický ohřev vody. Ten podobně jako běžný síťový měnič je tvořen MPPT sledovačem a DC/AC střídačem, u kterého však nejsou kladeny tak vysoké nároky na kvalitu střídavého napětí, a proto může obsahovat např. jen modifikovaný sinus, nebo například jen obdélníkový tvar, který se mnohem snadněji generuje. Takový střídač může mít velký rozptyl napětí, v žádném případě se nesmí připojit do běžné domovní sítě, používá se pouze izolovaně, připojený k topné patroně boileru, která nepotřebuje k činnosti čistý sinusový průběh střídavého napětí.

2.3.1 MPPT sledovač

MPPT z anglického Maximum Power Point Tracking označuje schopnost měniče "sledovat" bod maximálního výkonu fotovoltaického panelu. Fotovoltaické panely mají nelineární charakteristiku a je třeba je zatěžovat podle toho, jak zrovna svítí slunce. Jen tak lze z panelů dostat maximální možné množství energie pro daný aktuální osvit. Laděním pracovního bodu MPPT trackeru lze s výhodou omezovat výrobu síťových měničů v případě nechtěných letních přetoků.



Obr. 2.5 – VA charakteristika panelu se zatěžovací přímkou (ENSLIN, 1997)

2.4 Wattrouter

Wattrouter je zařízení, které dokáže detekovat přebytky elektrické energie a směřovat je do vhodné zátěže. Obsahuje chytrý elektroměr, který je připojen hned za fakturační elektroměr, měří, zda dochází k přebytku (proud teče směrem ven do sítě), pokud ano, přičemž „vrátka“ elektrickému proudu, který se přemění například na teplo v elektrické patroně boileru. Takto lze zachytit i drobné přetoky 50 W. Wattrouter lze použít pouze pro odporové zátěže typu elektrická patrona, protože takto zachycované přetoky jsou značně nestabilní a přístroje by určitě nevydržely, kdyby byly velice často připojovány a odpojovány od sítě, což patroně nevdají.

3 UKLÁDÁNÍ ENERGIE

Skladování energie hraje klíčovou roli v moderní energetice, která se neustále vyvíjí a hledá účinné způsoby, jak splnit rostoucí poptávku po energii, zatímco se snaží minimalizovat negativní dopady na životní prostředí. Jednou z hlavních výzev, se kterými se energetický sektor potýká, je skladování energie. Tato otázka získává stále větší pozornost vzhledem k rostoucímu podílu OZE, jako jsou solární a větrná energie, a potřebě vyrovnávat jejich fluktuace v produkci s poptávkou po energii. Skladování energie umožňuje účinnější využívání dostupných zdrojů energie tím, že umožňuje jejich shromažďování v době přebytku a používání v době, kdy je poptávka po energii vyšší, nebo kdy jsou primární zdroje nedostupné. Tato flexibilita je klíčová pro zajištění spolehlivého dodávání energie a pro přechod k udržitelnějším energetickým systémům.

Tato kapitola se bude zabývat různými technologiemi skladování energie v současnosti.

3.1 Neobnovitelné zdroje akumulace

Nejstarším a nejdostupnějším nositelem energie bylo po staletí dřevo a uhlí, u nich je největší problém obnovitelností. Kdybychom nehledali další možnosti akumulace energie, za pár let by se mohly tyto komodity stát nedostupnými. Nehledě na to, že uhlí i dřevo je nutné skladovat na poměrně velké zastřešené ploše, a při spalování zamořuje okolí štiplavým kouřem a popelem. Po druhé světové válce se stala rozšířeným nosičem energie ropa. Ta se skladuje v ohromných podzemních tancích. Ropa je dále zpracovávána na lehké topné oleje, benzín a naftu. Ty se následně spalují v různých typech strojů a kotlů. Při těžbě ropy zároveň dochází i k těžbě plynu. Plyn se skladuje podobně jako ropa v podzemních zásobnících případně ve velkých objemech ve vyčerpaných ložiskách ropy. Zemní plyn je možné také velmi dobře skladovat i ve zkapalněném stavu, kdy může mít až 600x menší objem. Ke zkapalňování metanu (LNG) dochází při velmi nízkých teplotách. Při -162 °C dochází samovolně ke zkapalnění metanu, případně se využívá ještě ochlazení jen na -83 °C , se současným stlačením plynu. Následně je převážen většinou lodní dopravou v podchlazených zásobnících. V cílových destinacích se plyn opět zplyní zvýšením teploty na běžnou pokojovou. Následně je distribuován jako běžný zemní plyn (CNG). Sloužící jako palivo pro vytápění, vaření nebo třeba pohonu motorů vozidel. LPG známé jako propan-butan se vyrábí rafinací ropy. Za běžných atmosférických podmínek je plynný, ke zkapalnění, podobně jako u LNG dochází také snížením teploty a stlačením, tentokrát už za mírnějších podmínek na -50 °C . Objem LPG je možné snížit až 250x. LPG se používá pro pohon motorů vozidel a v kempingových vařičích.

Při spalování LPG a CNG dochází pouze k minimální tvorbě škodlivých zplodin, proto je bráno jako ekologicky šetrné palivo (PLYN, 2023).

3.2 Obnovitelné zdroje akumulace

3.2.1 Akumulace tepla

Energie se z téměř 80 % spotřebovává ve formě tepla. Krátkodobé zásobníky tepla se v domácnostech běžně využívají ve formě akumulčních kamen a boilerů.

Naprosto nejefektivnější a nejlevnější způsob využití přímé sluneční energie je se jí vystavit. Řešením je postavit nízkoenergetický dům s velkou prosklenou střechou orientovanou na jih, která přivádí do domu světlo a teplo. Zbytek domu orientovaného na sever je vhodné zapustit pod úroveň terénu a obsypat hlínou. Obsypání domu ze studených světových stran výrazně přispívá k redukci tepelných ztrát a celkové tepelné stabilitě objektu. Zemina a masiv budou vždy teplotně blíže než teplota okolního vzduchu. V létě v domě udrží větší chlad, v zimě naopak nedovolí promrzání stěn domu. Díky vysokým ziskům a malým ztrátám má budova menší spotřebu energie na vytápění a chlazení (ZILVAR, 2018).



Obr. 3.1 – Dům podle principů návrhu solární architektury (ZILVAR, 2018)

Další z možných technologií pro využití slunečního záření k ohřevu teplé vody jsou solární kolektory neboli fototermický ohřev. Sluneční záření se zachycuje na absorpční vrstvě solárního kolektoru tvořené nejčastěji z černé plastové hadice navinuté do spirály, skrz ni za pomoci oběhového čerpadla proudí voda, která přejímá toto teplo a přenáší ho do boileru či

bazénu. Toto je ověřený a poměrně účinný způsob ohřevu vody, který může hravě konkurovat fotovoltaickému ohřevu (MATUŠKA, 2014).

U akumulace fotovoltaické energie existuje více řešení.

Jedním z nich je elektrický akumulátor s přímotopy. Moderní baterie mají vysokou účinnost i výkon od jara do podzimu, protože dokážou v domácnosti pokrýt většinu spotřeby. Pokud bychom chtěli akumulovanou energii z fotovoltaiky vytápět, byla by možnost na akumulátor připojit přímotop, ten má ovšem bohužel jen topný faktor COP 1, tedy všechno dodané teplo přemění na vyzářené teplo. Navíc přímotopy mají poměrně vysoký odběr, který by v případě špatného dimenzování nadměrně zatěžoval baterii a tím ji opotřebovával.

Mnohem lepším řešením je připojit k akumulátoru a fotovoltaice tepelné čerpadlo. Tepelné čerpadlo má proměnný topný faktor COP běžně mezi 2-5, záleží na kvalitě stroje a zejména na teplotě okolí ze kterého se teplo odebírá a požadované teplotě otopné vody. To znamená že v případě mrazu -15 °C se COP blíží hodnotě 1, tudíž se nevyplatí ho provozovat. Proto je vhodné, aby tepelné čerpadlo běželo v době, kdy je teplo. To je většinou když svítí slunce a je výroba z FVE, a může se tak natápět dostatečně velká akumulací nádoba, kterou je pak možné v noci ohřívat dům. Místo baterie tak cykluje vodní zásobník, ten může cyklovat neomezeně. Elektřina z baterie se použije na chod domácích spotřebičů.

Poslední z variant je sezónní, dlouhodobá akumulace do zemních kolektorů, kdy za letních dnů je přebytek fotovoltaiky a tepelné čerpadlo pracuje s vysokým COP, nahřívá zemní kolektor, který dokáže pojmout mnoho tepla a uložit ho po dobu několika měsíců a poté ho využívat v zimě. V tomto případě je možné dosáhnout i COP 8. Je to sice ověřená technologie, ovšem velmi finančně nákladná a v malých objemech má velké ztráty, proto se u rodinných domů moc nerozšířila (ZILVAR, 2018).

3.2.2 Akumulace elektřiny

Existuje několik technologií akumulace elektřiny, některé dlouhodobější, jiné krátkodobé. Elektřinu nelze uchovávat přímo, proto se využívají procesy vratné přeměny na jiný druh energie. Nejběžnější jsou chemická, tepelná nebo mechanická. Elektřinu je možné uchovávat v libovolném množství od tisíců miliampérhodin v kondenzátorech po desítky gigawatthodin v přečerpávacích elektrárnách.

U elektrochemických akumulátorů a kondenzátorů dochází k samočinné vratné reakci. Není třeba dalšího zařízení. Jejich nevýhodou je nízká životnost, která se pohybuje mezi stovkami a tisíci cykly.

U přečerpávacích elektráren a setrvačnicků, což jsou typičtí zástupci mechanického akumulátoru (potenciální energie), je třeba pro přeměnu zpět na elektřinu turbínu či generátor. U těchto akumulátorů je opotřebení minimální.

Poslední z výčtu technologií jsou ty, u kterých se nepočítá s přeměnou zpět a elektřina se transformuje na jiný užitečný produkt, jako třeba výroba tepla nebo vodíku.

(TZB-INFO, 2024).

3.2.3 Způsoby akumulací

Chemické baterie

Nejstarší a v některých odvětvích stále ještě používaný je olověný akumulátor. V poslední době se od něj začíná upouštět z důvodu nižší energetické hustoty a vyšší hmotnosti, což by u akumulace přebytků v domě až tolik nevadilo. Má ale nižší životnost 500-1200 cyklů, to je z dlouhodobého hlediska nedostatečné.

Lithium-iontové akumulátory jsou velmi rozšířené u spotřební elektroniky a elektromobilů z důvodu vysoké energetické hustoty, možnosti rychlého nabíjení a životností až 2000 cyklů. Vyřazené akumulátory elektromobilů s nižší kapacitou by se velmi dobře ještě posloužili jako úložiště elektřiny v domácnosti. Ovšem bohužel z důvodů vyšší vznětlivosti při poruše nebo zkratu a možnosti zahoření není vhodné je nechávat v domě. Někteří tyto baterie nechávají v nádobách mimo budovu, to ovšem není řešení pro všechny, spíše pro jednotlivce (ČEZ, 2003a).

Existují ještě další druhy akumulátorů jako NiCd, NiMH, ale nejčastěji využívané akumulátory v domácích úložištích jsou LiFePO₄ někdy známé jako LFP. Tento akumulátor má oproti Li-ion velkou výhodu v bezpečnosti. Je velmi stabilní a do 800 °C není u něj možné zahoření. Je schopen dodávat vysoký špičkový proud, životnost 6000 cyklů a nižší výrobní náklady ho činí nejpopulárnějším (WAGNER, 2018).

V budoucnu bude docházet k vývoji a postupnému nahrazení za ekologičtější typy baterií bez nutnosti těžby lithia.

Vodík

Vodík je zástupce chemické energie. Chemickou energii je možné měnit přímo v elektřinu, například tak, že za pomoci slunečního záření a elektrolýzy dojde k rozkladu vody na vodík a kyslík, které se pak uskladní odděleně. Při následném zpětném spojení plynů (okysličení) vzniká opět voda a nahromaděná energie se buďto přemění v teplo hořením anebo

v elektřinu v palivovém článku. Výroba „zeleného“ vodíku z elektřiny je velmi energeticky náročná a v našich podmínkách v budoucnu nejspíš nebude dostatek přebytků, aby bylo možné alespoň nějakou část vodíku vyrobit. Pokud se aktuální přebytky podaří v budoucnu potlačit ať už snazší možností akumulace, nebo třeba chytrou sítí, kde každý spotřebitel na trhu se bude snažit přebytečnou, levnější energii spotřebovat, aby ušetřil, tak nebude z čeho vodík vyrábět. Ovšem v jiných krajích je situace odlišná, pokud se svět bude snažit odklonit od ropy, ať už kvůli jejímu nedostatku, nebo špatné ekologii a neobnovitelnosti, bylo by možné začít vyrábět vodík na rovníku, kde je dostatek sluneční energie pro velmi výkonná fotovoltaická pole, která tak budou moci téměř zadarmo vyrábět nekonečné množství zeleného vodíku, který se následně rozděluje po světě (VOTRUBA, 2023).

Tepelné zásobníky

Carnotovy baterie jsou zařízení pro skladování energie, které ukládá elektřinu ve formě tepelné energie. Během procesu nabíjení se elektřina přeměňuje na teplo a ukládá se v tepelném akumulátoru. Při vybíjení se akumulované teplo zpětně přeměňuje na elektřinu. Princip fungování je založen na 3 základních dějích nabíjení, akumulace a vybíjení. Nejdříve je nutné přebytečnou elektřinu přeměnit na teplo, toto teplo následně transformovat do uskladnitelné podoby, efektivně jej skladovat do doby, než bude potřeba. V případě potřeby se teplo ze zásobníku uvolní a zpětně přemění zpět na elektřinu. Účinnost systému je definovaná jako poměr získané elektřiny ze systému ku elektřině dodané při nabíjení (ČEZ, 2003a).

Carnotovou baterií je například odporový nebo induktivní elektroohřev pevného materiálu schopného pojmout velké množství tepla jako například šterkové, keramické, pískové lože, různé soli, kovy, voda, olej, případně monolit betonu či oceli. Takováto baterie musí být samozřejmě velmi dobře izolována, nejčastěji někde v podzemí. Přeměna zpět na elektřinu probíhá právě podle vybraného média, ať už v parním tepelném oběhu turbíny generátoru, Stirlingova motoru, nebo například pomocí termoelektrického děje. Carnotova baterie je perspektivní alternativa k ostatním technologiím pro skladování elektřiny pro velké výkony, kapacity a delší periody času (BAŠTA, 2020).

U všech termálních baterií je už z podstaty problém je provozovat v malých objemech z důvodu vysokých ztrát na povrchu. Neoptimálnější tvar tepelného zásobníku z hlediska minimalizace povrchu a tím i ztrát tepla je tvar s minimálním poměrem povrchu k objemu a tímto tvarem je koule. Ovšem z důvodu praktičností, instalace, skladování se využívá spíše válec.

Poměr objemu ku povrchu koule:

$$\frac{S}{V} = \frac{4\pi r^2}{(4/3)\pi r^3} = \frac{3}{r} \quad (3.1)$$

kde S – povrch, m²
V – objem, m³
r – poloměr, m.

Poměr objemu k povrchu koule (S/V) je přímo úměrný inverzně poloměru koule. To znamená, že čím větší je poloměr koule, tím vyšší je poměr objemu k povrchu a tím menší jsou ztráty tepla.

Samozřejmě na ztráty tepla do okolí má také velký vliv kvalitní izolace povrchu nádoby a teplotní rozdíl mezi obsahem zásobníku a okolním prostředím.

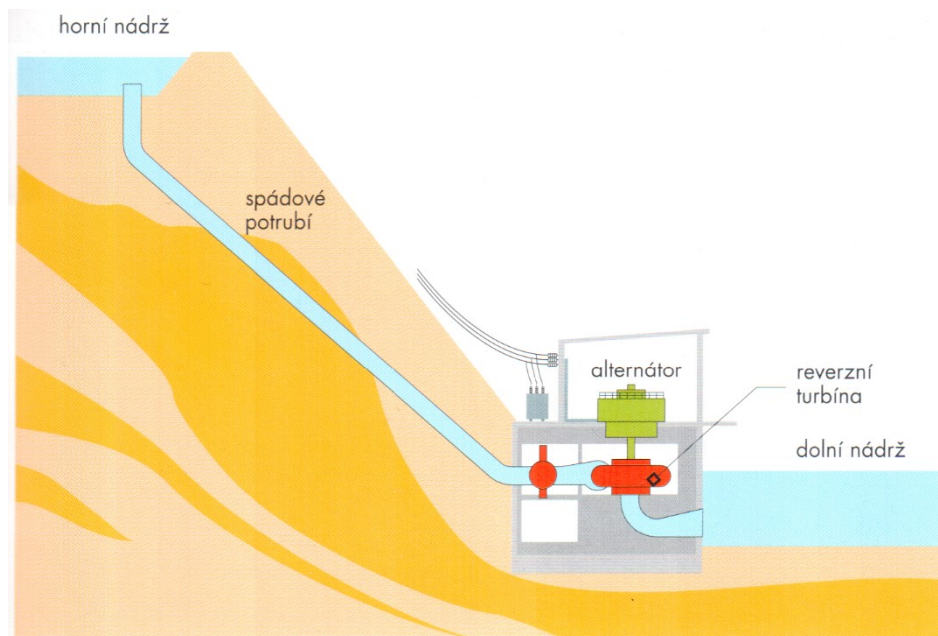
Tyto závislosti je možné popsat vzorcem pro výpočet poměrné ztráty sdílením tepla do okolí (ČSN 07 0240, ČSN EN 304):

$$Q = S \cdot \alpha \cdot (t_m - t_L) \quad (3.2)$$

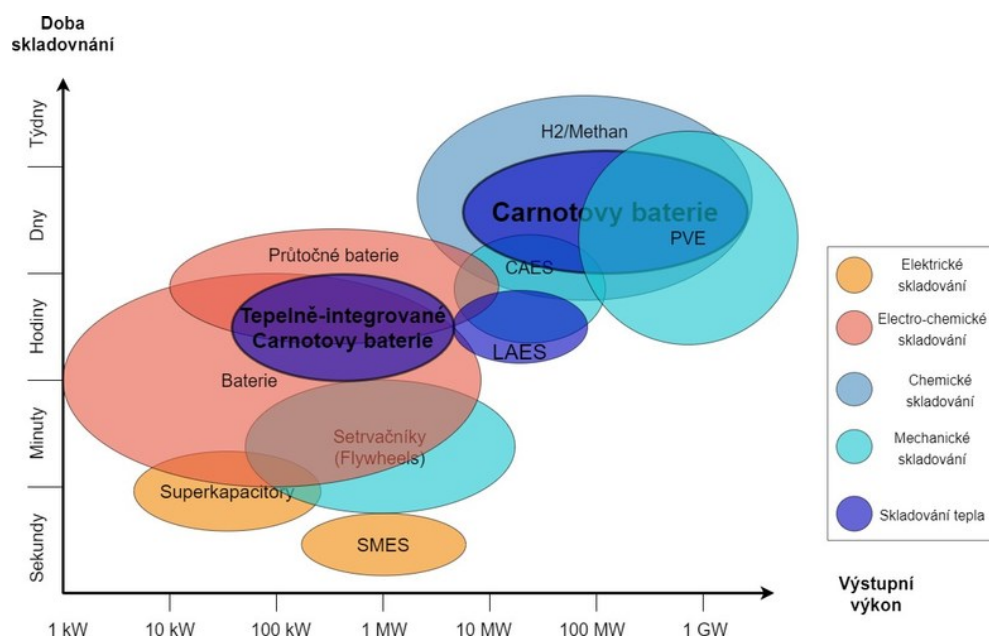
kde Q – sdílený tepelný tok, W
S – povrch, m²
 α – součinitel přestupu tepla 5, W·m⁻²·K⁻¹
 t_m – průměrná povrchová teplota pláště, °C
 t_L – teplota okolí, °C
(LYČKA, 2021).

Přečerpávací elektrárna

Princip přečerpávací vodní elektrárny PVE je jednoduchý, skládá se z dolní a horní vodní nádrže propojené potrubím, ve kterém jsou instalovány vodní turbíny a čerpadla. Pokud je elektřiny přebytek, čerpají čerpadla vodu do horní nádrže, pokud jí je naopak nedostatek, pouští se přes turbínu s alternátory zpět do dolní nádrže, tím se vyrábí elektrický proud. Spády se pohybují mezi 100 až 500 m. Tyto vodní díla mohou vznikat využitím vysokohorských jezer s velkým spádem, nebo vybudováním umělé nádrže na vrcholu kopce. Účinnost takových elektráren dosahuje i více jak 75 %. Mezi největší v České republice patří Dlouhé Stráně, Dalešice a Štěchovice II. V současné době se neprovádí výstavba nových přečerpávacích elektráren, a to z různých důvodů, ať už finančních či možnostem nevratného poškození životního prostředí (ČEZ, 2003a).



Obr. 3.2 – Schéma přečerpávací elektrárny (ČEZ, 2003a)



Obr. 3.3 – Porovnání technologií pro skladování energie (BAŠTA, 2020)

4 SDÍLENÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE

Dne 1.7.2024 má být vládou podepsána novela energetického zákona známá jako „Lex OZE II“. Díky takovému energetickému zákonu bude možno sdílet vyrobenou elektřinu v rámci celé České republiky napříč institucemi, fyzickými osobami i spolky. Tento zákon má za cíl snižovat náklady na energii a zvyšovat její efektivitu využití právě vyrobené energie z obnovitelných zdrojů. Dále se snaží zvyšovat energetickou nezávislost jednotlivců i společnosti. Celý tento systém bude spravovat nově vzniklé Elektroenergetické datové centrum (EDC), bez kterého by nebylo možné na konci měsíce vyfakturovat nasdílenou energii. Na vznik Elektroenergetického datového centra byla získána dotace 800 milionů Kč z Národního plánu obnovy, ovšem provoz tohoto centra bude financován z nové části regulované složky elektřiny (cena za nesíťovou infrastrukturu), mělo by se jednat o jednotky až desítky korun měsíčně, které bude platit každý spotřebitel (KRÝŠOVÁ, 2024a).

V praxi pro zapojení se do komunitní energetiky bude třeba chytrý elektroměr s průběhovým měřením, který dnes již povětšinou mají všechny objekty s fotovoltaikou. Ten v patnáctiminutových periodách odesílá, prostřednictvím distributorů, naměřenou hodnotu spotřebované a vyrobené elektřiny na OTE, v budoucnu právě přes EDC. O chytrý elektroměr bude moci zdarma požádat každé odběrné místo, které se chce do sdílené energetiky zapojit, měl by mu být do 3 měsíců nainstalován (KRÝŠOVÁ, 2024b).

Sdílení elektřiny může být řešeno několika způsoby. První z nich je společenství, kde může být zapojeno až 1 000 předávacích míst. Druhým způsobem je zákazník, který si posílá elektřinu sám sobě do jiného odběrného místa. To může být například zákazník vlastní chatu a rodinný dům, nebo třeba síť poboček jedné společnosti. Třetí možností je zákazník sdílející elektřinu s jinými zákazníky v rámci České republiky. Poslední skupinou jsou obyvatelé jednoho bytového domu, kteří mají společnou hlavní domovní skříň a nedochází při sdílení elektřiny k využití distribuční soustavy, proto jim bude poskytnuta sleva na regulovanou složku (ČEZ, 2024).

Sdílenou energii odeslanou od výrobce ke spotřebiteli bude nutno spotřebovat ve stejných 15 minutách jako byla vyrobena. V žádném případě nelze využít distribuční síť jako baterii pro úschovu energie. U sdílení je nutné oznámit datovému centru tzv. alokační klíč, tj. způsob rozpočítávání (poměr) vyrobené elektřiny mezi jednotlivé subjekty zapojené do sdílení a EANY jednotlivých subjektů. Existuje statický alokační klíč, kde je vyrobená energie rozdělena na základě neměnného poměru energie z celkového objemu, který může daný člen spotřebovat. Vše ostatní je považováno jako přetok. Nevýhodou je, že dochází k výrazným

přetokům. Lepší z variant a více úsporný je dynamický alokační klíč, kde každý spotřebitel má alokované definované minimální procento z aktuálně dostupného objemu dodávky. V praxi, když budou 3 odběrná místa, všechny s alokačním klíčem 33 % a každý z nich spotřebuje celý svůj alokovaný objem energie, tak jim tuto část energie nebude fakturovat standardní dodavatel, ale vyčíslí se v rámci společenství. Pokud by však některý ze spotřebitelů nespotřeboval svůj podíl, může být tato přebytečná energie rozprostřena mezi ostatní členy společenství, tedy v tuto chvíli budou mít k dispozici více než 33 % výroby. Když ani tito členi nebudou schopni spotřebovat tuto energii, tak přeteče a bude se fakturovat jako standardní dodávka do sítě, kde ji od vás podle smlouvy může odkoupit obchodník, stejně jako u přebytků (BALOG, HORÁČEK, 2024) (ČERNÝ, 2023).

V praxi to však je jen čistě účetní záležitost. Vyrobenou elektřinu reálně není možné poslat k vybranému odběrateli, s největší pravděpodobností tuto vyrobenou energii spotřebuje nejbližších pár odběrných míst, kterým ji ale účetně dodá například jejich obchodník s elektřinou. Proto je nutné, aby takto vyrobená energie byla vždy v co nejlepší kvalitě, správně sfázovaná s distribuční sítí a ve správném napětí. O to se starají kvalitní měniče. Distribuční síť není navržena tak, aby každý výrobce posílal svou energii přes celou republiku. Kdyby jednotlivé výrobní a odběrné body nebyly rovnoměrně rozmístěny, mohlo by dojít k výraznému přepětí na jedné straně republiky kvůli vysoké výrobě a nízké spotřebě, zatímco na druhé straně by bylo podpětí z důvodu vysoké spotřeby a nízké výroby. Přenos elektřiny by pak byl spojen s vysokými ztrátami a přetížením sítě. Okolní státy proto zavedly podmínku, že elektřinu není možné posílat na vzdálenost delší než 20 km. U nás takové nařízení zatím neplatí, ale budoucí zkušenosti by mohly vést k jeho zavedení.

Vzhledem k připravované novele Lex OZE II je třeba brát v úvahu, že informace v této kapitole nemusí být v době odevzdání této práce již aktuální, protože před samotným podepsáním novely často dochází k významným změnám.

PRAKTICKÁ ČÁST

5 POUŽITÝ HW

Pro měření teploty v domě byl použit sensor Shelly H&T bezdrátový snímač teploty a vlhkosti s podporou MQTT. Zprávy jsou přenášeny do MQTT brokera tvořeného serverem Home Assistant pomocí bezdrátové WiFi sítě TCP/IP.

Provoz FVE zajišťuje fotovoltaický měnič Solax Power X3-Hybrid 10K G4 se dvěma nezávislými stringy pro připojení panelů. Jako úložiště energie je instalována baterie Solax Triple Power 11,6 kWh, která dobře pokryje spotřebu domu i pokud je několik dní zataženo. Pro vytápění je použito tepelné čerpadlo FUJITSU SPLIT Neore 14 MINI, které je zároveň největším spotřebičem v domě. Ohřátá voda se akumuluje v kombinované akumulární nádobě NADO 500/200, 300 litrů pro topení a 200 litrů pro TUV. Odtud je teplá voda hnána oběhovým čerpadlem do radiátorů. Protože má otopná soustava vysoký teplotní spád (dřívějším zdrojem tepla byl kotel na uhlí, poté plynový kotel) nepracuje TČ úplně efektivně, teplá voda se nedá předeřhát v akumulární nádobě na příliš dlouhou dobu. Pro snížení teplotního spádu, tedy i teploty přívodní otopné vody by bylo vhodné rekonstruovat otopnou soustavu a instalovat podlahové topení.

Na střeše jsou instalovány monokrystalické panely PhonoSolar 450 Wp v orientaci východ / západ. V případě přebytků energie je na výstupu domu instalován wattrouter A-Z ROUTER SMART, který zachytává vyrobené přebytky energie a odesílá je do topné patry, která je instalována jako pomocný zdroj do akumulární nádoby.

Měnič	Solax Power X3-Hybrid 10K G4	hybridní asymetrický
Baterie	Solax Triple Power 11,6 kWh	LiFePo4
Panely	PhonoSolar 450 Wp (16ks)	monokrystalické
Tepelné čerpadlo	FUJITSU SPLIT Neore 14 MINI	vzduch / voda
Akumulační nádoba	NADO 500/200 v1	300l topení, 200l TUV
Wattrouter	A-Z ROUTER SMART	

Tab. 5.1 - Použitý HW

6 KOMUNIKAČNÍ PROTOKOLY

Zkomunikovat všechny zařízení v domácnosti není snadný úkol. Na světě existuje velké množství komunikačních protokolů k různému využití. Některé jsou vhodné v průmyslu, další pro domácnosti, nějaké pro bezdrátové jiné pro drátové zařízení, kritické systémy, rychlé, zabezpečené, snadno implementovatelné, cenově přijatelné, pro velké i malé objemy dat. Často bývají normované, standardizované nebo velmi dobře popsané, ovšem někdy jsou proprietární neboli uzavřené vyvinuté konkrétní společnostmi, kde integrace do jiných systémů je nemožná. V této kapitole budou popsány některé z protokolů využívající především zařízení pro domácnosti.

6.1 M-BUS

M-bus je průmyslový komunikační protokol určený pro dálkový odečet hodnot z měřičů spotřeby, kde příliš nezáleží na rychlosti komunikace ale více na odolnosti proti rušení. Přenáší se po metalickém vedení (telefonní kabel) v jednom páru, na polaritě nezáleží. Na jednu sběrnici je možné připojit až 250 zařízení, záleží ovšem na výkonnosti napájecího zdroje Masteru a kvalitě vedení. Komunikace probíhá způsobem Master-Slave, s poloduplexním přenosem dat. V základu lze mít na lince pouze jedno odečtové zařízení neboli Master. Pro více odečtových zařízení na jedné lince například distributor a zákazník, je třeba využít M-Bus splitteru (Vidim, 2013a).

Fyzicky sběrnice funguje na principu proudové smyčky. V klidu je na sběrnici 36 V na svorkách Masteru. Na vzdálenějších zařízeních je vlivem konstantního odběru měřičů 1,5 mA a odporu vedení o něco menší napětí. Nikdy by však toto napětí nemělo klesnout pod 24 V, které značí nízkou logickou úroveň. Když vysílá Master log. 0, je na jeho svorkách 24 V a na nejbližším zařízením pro správu funkci nesmí napětí klesnout pod 12 V. Při odpovědi měřič připojuje a odpojuje svůj vnitřní rezistor, tím mění svůj odběr proudu z převodníku. Proud měřiče při log. 1 se pohybuje mezi 11 a 20 mA (Vidim, 2013a).

Každý z měřičů obsahuje primární a sekundární adresu. Primární adresu je možné konfigurovat z rozsahu 1-250, zatímco sekundární adresa je osmimístné, unikátní, neměnné číslo založené na výrobním čísle měřiče. Je výhodné používat primární adresu z důvodu snadnější výměny vadného měřiče bez nutnosti překonfigurování odečtového zařízení (Vidim, 2013a).

Sběrnice M-Bus podporuje standardní komunikační rychlosti 300 až 9600 baud. Výchozí a nejčastěji používaná je 2400 baud. Pro jednoduchost je vhodné mít u všech měřičů

na lince nastavenou shodnou adresu. Čím je komunikační rychlost vyšší, tím se snižuje dosah mezi Masterem a nevdálenějším měřičem. Datový blok je zabezpečen pomocí kontrolního součtu CRC. Protokol linkové vrstvy je založen na mezinárodním standardu ČSN EN IEC 60870-5-104 ED.2:2006 (Vidim, 2013a).

Protože PLC často neobsahuje hardwarovou M-BUS sběrnici, je nutné využít převodníku, nejčastěji používané jsou M-BUS / RS232, M-BUS / RS485, M-BUS / Ethernet. Poté už se jedná pouze o komunikační protokol M-BUS tvořený byty (Vidim, 2013b).

Wireless M-BUS

Od roku 2007 existuje varianta M-bus Wireless pro bezdrátový přenos dat. Standard EN 13757-4:2005 specifikuje bezdrátový přenos dat primárně mezi vodoměry, elektroměry a měřiči tepla. Zahrnuje specifikaci fyzické a datové linkové vrstvy OSI modelu. Na něj pak na vyšších hladinách přímo navazuje aplikační vrstva, která je již shodná s klasickým M-BUSEm. Toto přenosové médium má velkou výhodu při použití u stávajících budov, kde je značně komplikované pokládat nové vodiče.

Bezdrátová komunikace probíhá ve 12 kanálech v bezplatném vysílacím pásmu okolo 868 MHz. Na přímou viditelnost vysílacího a přijímacího modulu může být komunikační dosah 500 až 600 m. Komunikace má hvězdicovou strukturu Master / Slave, kdy několik měřičů pracujících jako klient (Slave) přenáší data do centrální jednotky server (Master) tvořené koncentrátorem. Master nikdy nezahajuje vzájemnou komunikaci. Důvodem je, že měřiče jsou často napájeny baterií, proto pro prodloužení životnosti a šetření energie jsou probuzené pouze na nezbytně nutnou dobu. V současné době v případě napájení modulu lze dosáhnout životnosti na jednu baterii až 20 let. V případě dotazu od Masteru by pravděpodobně měřič neodpověděl, protože by byl v režimu spánku. Síť drátové a bezdrátové je možné vzájemně kombinovat prostřednictvím tzv. mostů (bridge) (Vojáček, 2010).

6.2 Infra-rozhraní

Tento způsob komunikace podporují téměř všechny fakturační elektroměry. V normě ČSN EN IEC 62056-21:2004 se nachází informace o místní výměně dat elektroměru. Existuje ještě druhá část normy zabývající se dálkovou výměnou dat, která poskytuje vzdálený odečet hodnot elektroměru distributorem pro následnou fakturaci. Tuto službu na našem distribučním území spravuje ČEZ, který tyto data poskytuje v přehledných grafech po přihlášení na svém distribučním portálu (dip.cezdistribuce.cz/irj/portal). Bohužel v současné době ČEZ distribuce

podporuje API pro automatizované stahování aktuální spotřeby/výroby pouze pro velkoodběratele a z toho důvodu je zapotřebí na odběrném místě zřídit vlastní odečtové zařízení fakturačního elektroměru.

Dříve se na elektroměrech využíval impulzní výstup S0 ať už v elektrickém nebo optickém provedení. Každý pulz představoval naintegrované množství elektrické energie (typicky 1 impulz = 1 Wh). Tento typ výstupu je využíván i u dalších druhů měřičů, například vodoměrů, plynometrů, měřičů tepla...

S nástupem informačních technologií, energetiky a fotovoltaiky již není dostatečné pouze znát spotřebu elektrické energie domu v kilowatthodinách za měsíc. Vzniká potřeba měřit další elektrické veličiny, jako je směr toku elektřiny, aktuální stav nákupu nebo prodeje elektrické energie v rodinném domě a informace o HDO spotřebě v nízkém nebo vysokém tarifu. K tomuto účelu slouží infračervený port (IR port).

Jedná se o optické rozhraní s obousměrným digitálním komunikačním protokolem nad optickou transportní vrstvou představovanou dvěma páry optických prvků typu vysílač – přijímač. Četnost komunikace s elektroměrem smí být maximálně jednou za 15 minut.

Zákazníkům jsou k dispozici hodnoty registrů: 1.8.1 Energie +A (odebraná energie v tarifu T1), 1.8.2 Energie +A (odebraná energie v tarifu T2), 2.8.0 Energie –A (dodaná energie celkem P), C.1.0 výrobní číslo elektroměru.

Komunikační protokol obecně podporuje 5 režimů. Některé ve formě dotaz / odpověď, jiné jako Master / Slave. Tyto režimy umožňují odečet a programování elektroměru. Všechny využívají datový rámeček (1 start bit, 7 datových bitů, 1 paritní bit, 1 stop bit). Protokol podporuje normalizované telegrafní rychlosti 300, 600, 1200, 240, 4800, 9600, 19200 baud. Pro naše účely by bylo možné využít normalizovaný převodník IR / Modbus RTU Fiedler AMS ELM2 (ČSN EN 62056-21, 2004).



Obr. 6.1 – IR rozhraní Fiedler AMS ELM2

6.3 MQTT

MQTT, neboli Message Queuing Telemetry Transport, je komunikační protokol navržený pro efektivní a spolehlivou výměnu zpráv mezi zařízeními v síti. Jeho jednoduchý a lehký design ho činí ideální volbou pro propojení zařízení IoT (Internet of Things), kde je důležitá nízká spotřeba energie a široká dostupnost komunikačních sítí. Tento protokol, vyvinutý firmou IBM v roce 1999, byl později převeden na standard OASIS (Organization for the Advancement of Structured Information Standards), čímž se stal otevřeným a široce akceptovaným standardem v oblasti IoT a M2M (Machine to Machine) komunikace. Účelem je umožnit jednoduchou a spolehlivou komunikaci mezi různými typy zařízení a platformami, což je klíčové pro vytváření robustních a interoperabilních IoT systémů (YUAN, 2021).

Jedná se o škálovatelný protokol pro zasílání zpráv, který podporuje asynchronní komunikaci mezi stranami. Asynchronní protokol zpráv odděluje odesílatele a příjemce zprávy v prostoru i čase. Používá model Publisher-Subscriber. Základním principem je oddělení producentů zpráv (Publishers) a spotřebitelů zpráv (Subscribers), kteří jsou propojeni pomocí prostředníka zpráv známého jako Broker.

„Publisher“, neboli vydavatel účastník v systému, který generuje zprávy nebo události, může to být například senzor, aplikace, zařízení IoT nebo jakýkoli jiný zdroj událostí. Publisher posílá zprávy do prostředníka zpráv, „Brokera“ aniž by znal konkrétní identity anebo počet příjemců.

„Broker“, neboli prostředník zpráv je centrální server systému, který přijímá zprávy od „Publisherů“ a distribuuje je příjemcům „Subscribers“. Broker, který musí být neustále dostupný, sleduje, které zprávy mají být doručeny jednotlivým Subscribers podle jejich zájmů a předplatných.

„Subscriber“, předplatitel, neboli příjemce je zařízení v systému, které se zaregistrovalo u Brokera a má zájem o určité typy zpráv nebo událostí. Subscriber obdrhuje zprávy od Brokera, které odpovídají jeho zájmům, na základě nastavených filtrů nebo předplatných. Může to být například ventil nebo alarm.

„Subscription“, neboli předplatné je mechanismus, který umožňuje Subscriberům registrovat se u Brokera a vyjádřit zájem o určité typy zpráv. Subscriber může definovat své předplatné na základě různých kritérií, jako jsou témata zpráv, klíčová slova, filtry nebo jiné parametry (MALÝ, 2016).

V tomto modelu je velmi výhodné používat zařízení napájené bateriemi. Publisher, například senzor může být aktivní pouze tehdy, když detekuje událost nebo změnu měřeného

stavu, a ve zbytku času je v režimu spánku. Stejně tak Subscriber v případech, kdy není nutné zpracování zpráv v reálném čase může být aktivní pouze v některých časech. Broker je jediný z účastníků, který musí být neustále aktivní. Ten v případě nezastižení adresáta zprávu uchová a doručuje zprávy až tehdy, když jsou jejich příjemci aktivní a připraveni je zpracovat. V reálném světě se to dá připodobnit k doručování předplatného časopisu. Redakce sepíše články, vydá je do tisku a tiskárna už často sama odesílá časopisy adresátům, v tomto případě tedy doporučeně. Aby bylo ověřeno že adresát byl zastižen.

7 POPIS SAMOTNÉHO ŘEŠENÍ

7.1 Umístění panelů

Představa ideálního umístění fotovoltaických panelů se tradičně opírala o orientaci směrem na jih a sklon k obloze. Z tohoto pohledu není pro domácí FVE ani tak důležité maximalizovat výrobu, ale spíše se snažit o to, aby profil výroby co nejlépe kopíroval profil spotřeby domu. Přebytečně vyrobená energie v podstatě nepřináší téměř žádný zisk, zatímco optimalizace rozdílu mezi výrobou FVE a spotřebou domu umožňovala snížit náklady na vyrovnávací prvky.

Typicky největší spotřeba energie domácnosti je v ranních a pozdních odpoledních hodinách. Panely vyrábí docela dobře i při nepřímém osvětlení, proto je vhodné zvolit na domě konfiguraci východ / západ. Tato konfigurace zajistí dostatek energie od prvních ranních paprsků až do západu slunce. V poledne sice na žádný z panelů nesvítí přímo, přesto při jasné obloze vyrábí FVE dostatek energie.

Fotovoltaické panely jsou umístěné na sedlovou střechu v orientaci východ / západ v počtu 10 kusů na východ a 6 kusů na západ. V zimních měsících bylo vyzpozorováno, že na západní stranu slunce téměř nedosvítí ovšem na jižní straně domu je při jasném zimním slunečném dni pozorováno nízko nad obzorem téměř kolmo na dům velmi ostré sluneční záření. Experimentálně bylo v zimním období 5 panelů z jižní strany střechy přemístěno na balkon orientovaný na jih a okamžitě se projevila zvýšená výroba.

7.2 Měření spotřeby spotřebičů

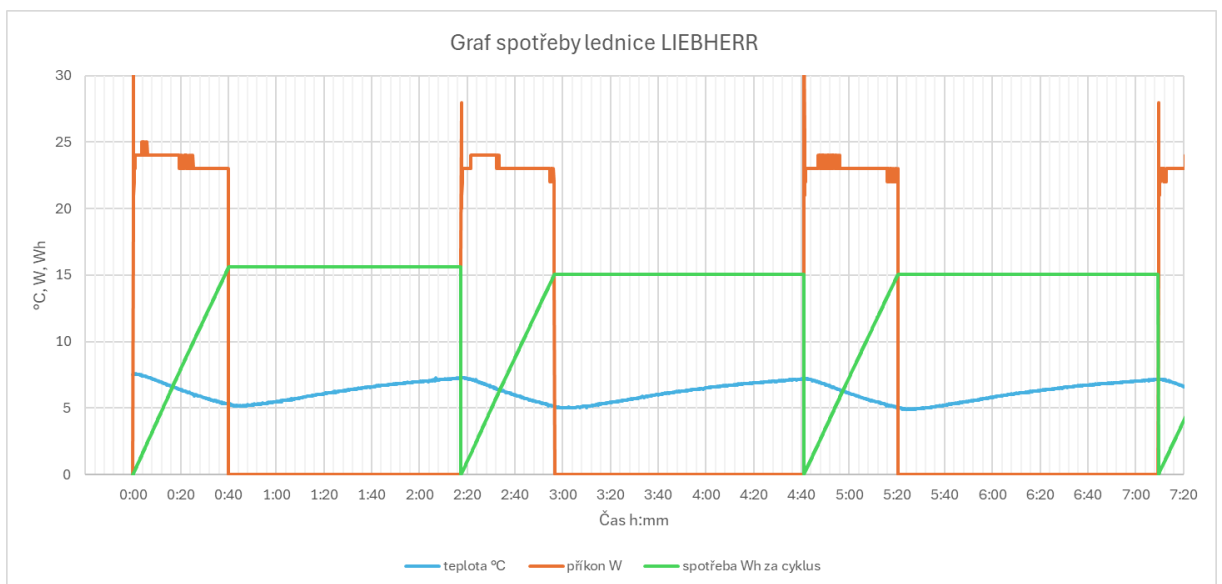
Nejprve byly analyzovány jednotlivé spotřebiče v domácnosti z hlediska četnosti používání v jednotlivých dobách a jejich příkonu v čase, největší podíl připadl na vytápění a ohřev TUV. Dále bylo potřeba zohlednit možnosti flexibility jednotlivých spotřebičů v čase a úspory s tím spojené.

U těch neflexibilních zařízení jako například osvětlení nelze uspořit z našeho pohledu žádné peníze. Tam se spíše nabízí možnost výměny vláknové žárovky za některé druhy úsporných, nebo LEDkových.

Dalším typem jsou drobné výkonné zařízení např. fén, rychlovarná konvice, mikrovlnná trouba nebo vysavač. Mají poměrně velikou spotřebu, ovšem jejich délka provozování je minimální a denní doba provozu je spíše nahodilá, proto nemá smysl je do kalkulace zahrnovat.

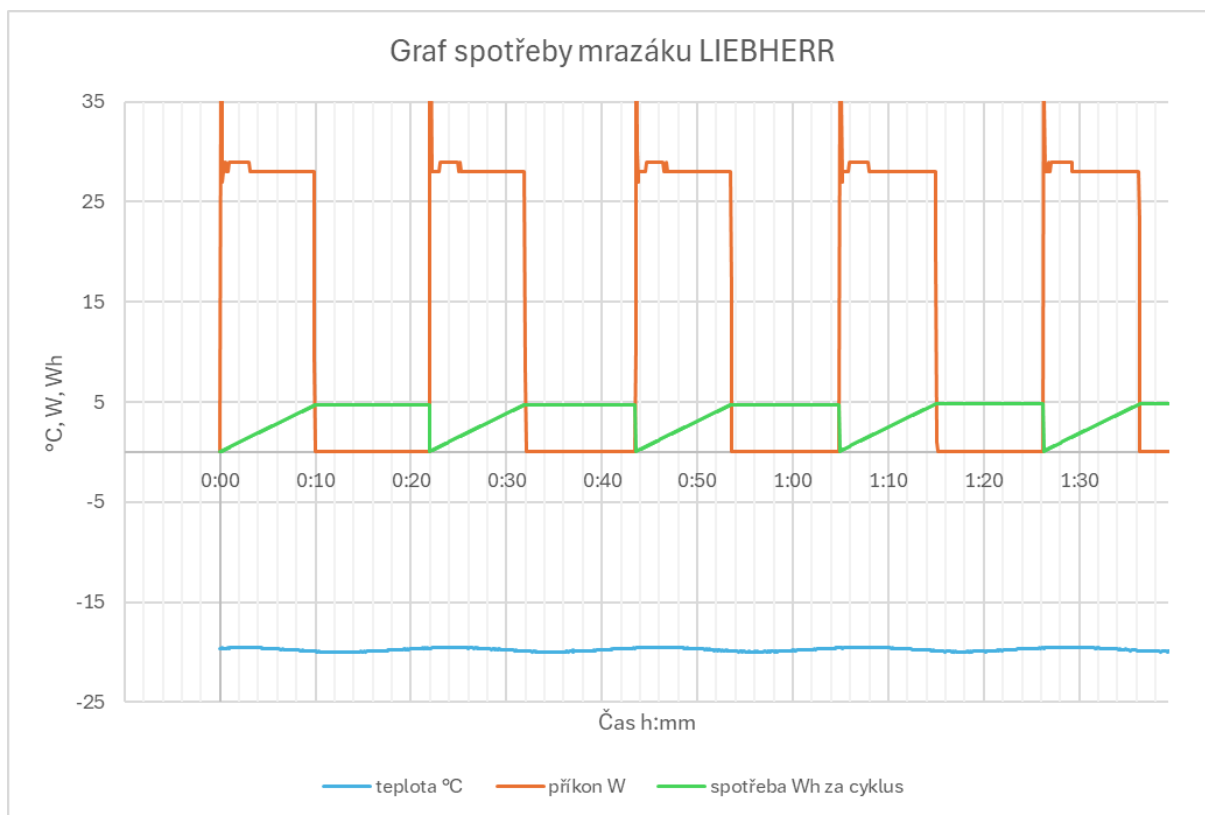
Indukční deska a elektrická trouba jsou také poměrně výkonné spotřebiče, které však z důvodu pohodlnosti mají téměř minimální flexibilitu. Variantou je využití plynového sporáku v hodinách s nejdražší elektrickou energií. V praxi je to opět zanedbatelná úspora, kterou se nemá cenu zabývat.

Dalším zařízením jsou mrazící boxy a ledničky, tam je flexibilita také dost omezená. Frekvence spínání je závislá na množství akumulace a izolace chladících boxů. Experimentálním měřením byla zjištěna perioda spínání 390 litrové chladničky LIEBHERR je asi 2h a 25min z toho 40min lednička nachlazovala a 1h a 45min lednička ztrácela chlad, kdy teplota kolísala mezi 5 a 7 °C. Průměrná spotřeba jednoho cyklu je 15 Wh. Za den je to 0,148 kWh.



Obr. 7.1 – Graf spotřeby lednice

Perioda spínání 400 litrového mrazáku LIEBHERR je asi 22 min z toho 10 min docházelo k namražování a 12 min ztrácel chlad, kdy teplota kolísala mezi -19,4 a -20 °C. Průměrná spotřeba jednoho cyklu je 4,8 Wh. Za den je to 0,314 kWh.

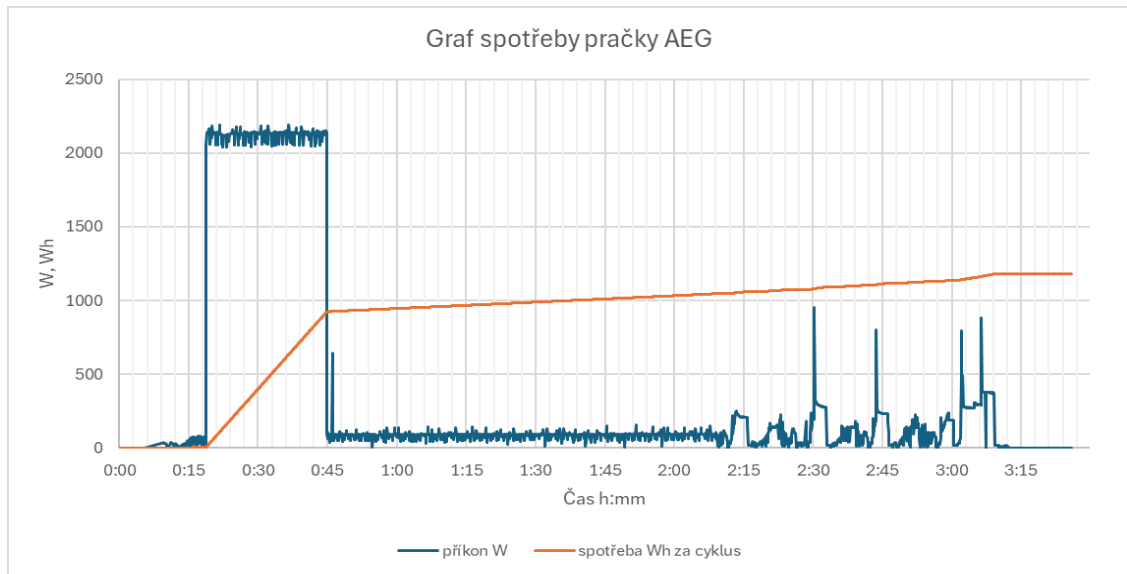


Obr. 7.2 – Graf spotřeby mrazáku

Náklady na praktické řešení tohoto problému z hlediska ceny za spínací modul, rizika zkažení potravin a vyššího opotřebení chladicího zařízení jsou tak veliká, že o úsporách v domácnosti v tomto směru nemá smysl vůbec uvažovat. Mnohem lepší variantou, stejně jako u osvětlení je nákup úspornějšího zařízení.

Dalším z nezbytných domácích spotřebičů je pračka. Sledováním četnosti spínání během týdne bylo zjištěno, že u tohoto zařízení je flexibilita o poznání větší. Pokud bude pračka v domácnostech o menším počtu členů používána 1x týdně je vhodnější jí zapínat o víkendech, protože v tu dobu je elektřina na spotovém trhu levnější. V naší domácnosti máme pračku AEG s chytrou aplikací, díky které je možné pračku vzdáleně zapnout a integrovat ji tak do chytré domácnosti a zapnout ji tak opravdu při nejlevnější ceně elektřiny, případně při přebytečných solární výroby. Jeden standartní prací cyklus trvá 3 h a 20 min a za tu dobu spotřebuje 1,180 kWh elektřiny. Z grafu je poznat že nejvyšší spotřeba je na začátku pracího cyklu kdy dochází k nahřívání vody. Proto stačí nalézt nejlevnější spotovou hodinu (krátkodobý propad)

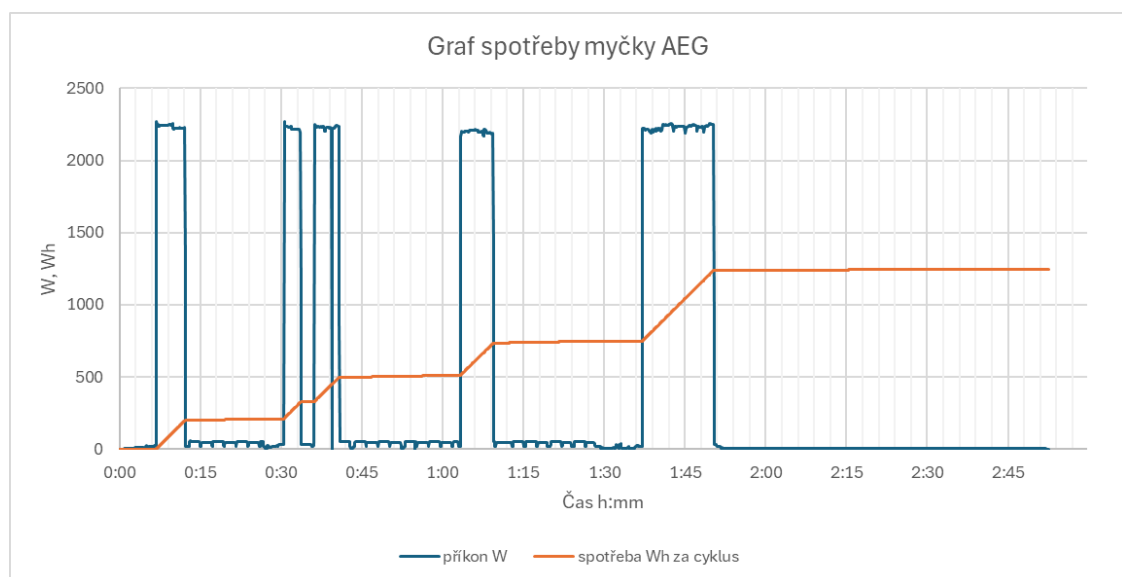
pouze pro začátek praní a případné následné zvýšení ceny energie zanedbat, protože v tu dobu odebírá pračka minimum energie.



Obr. 7.3 – Graf spotřeby pračky

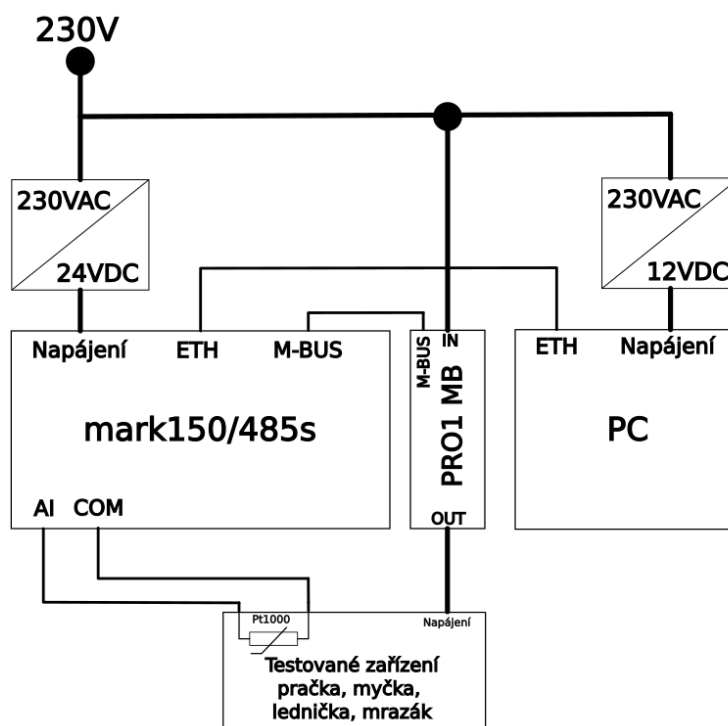
Podobným spotřebičem z hlediska flexibility je myčka. Myčka AEG se spouští 3x až 4x do týdne. Jde o starší spotřebič, který nemá možnost vzdáleného zapnutí, pouze umožňuje odložený start. Je tedy možné se dopředu podívat do aplikace domácí automatizace kdy je cena energie na trhu nejlevnější a odložit start na tuto hodinu. Jeden standartní mycí cyklus trvá 2 h a 52 min a za tu dobu spotřebuje 1,180 kWh elektřiny.

Z průběhu příkonu na grafu je vidět, že nejvyšší spotřeba myčky zasahuje do dvou po sobě jdoucích hodin. Proto je třeba v průběhu dne hledat alespoň 2 h nízké ceny energie.



Obr. 7.4 – Graf spotřeby myčky

Měření spotřeb na těchto zařízeních nebylo třeba integrovat do domácí automatizace, protože se jejich spotřeba z dlouhodobého hlediska příliš nemění. Navíc by zabudované měření s elektroměrem v každém spotřebiči bylo příliš nákladné a nepřineslo nám téměř žádný užitek. Sestavil jsem přenosné logovací zařízení, které zaznamenávalo pomocí komunikativního elektroměru okamžitý příkon, pomocí PLC teplotu a všechna tato data se logovala v 5s intervalech do souboru v přenosném minipočítači.



Obr. 7.5 – Blokové schéma zapojení logovacího zařízení měření spotřeb

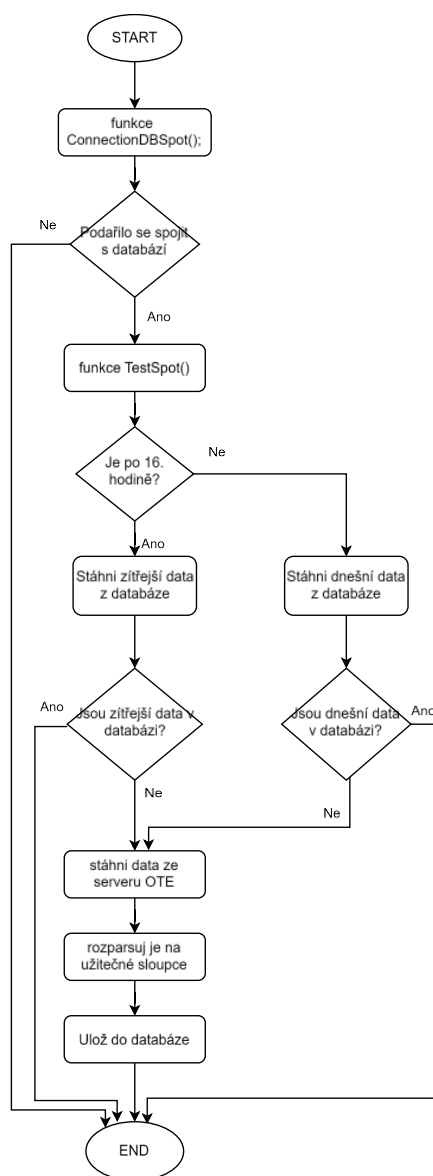
Nejvýznamnějším spotřebičem v domácnosti je zdroj teplé vody. Zde bude ohřev TUV a teplá voda do topení uvedena jako jeden spotřebič, protože v roce 2016 byl v domě vyměněn zdroj tepla z plynového kotle na tepelné čerpadlo a v rámci toho byl vyměněn elektrický boiler za akumulaci nádobu, kde je TUV a topná voda spojena do jednoho tělesa.

7.3 Stahování dat z webu

7.3.1 Spotové ceny

Pro stahování dat o spotových cenách z webových stránek OTE byl sepsán PHP script. Ten je možný spustit manuálně, například v případě, kdy se v době automatického spuštění scriptu nepodařilo zkontaktovat server, anebo automaticky podle časového rozvrhu Task Scheduler, tj. kolem 16h, kdy už jsou připravena data na další den. Algoritmus funguje tak, že

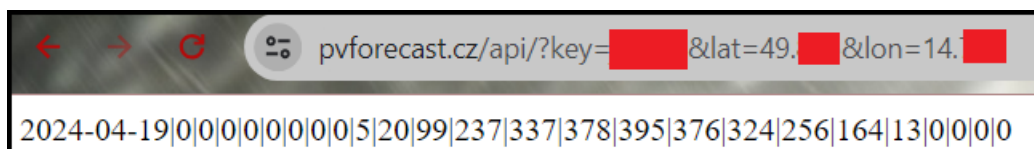
se nejprve pokusí spojit s MySQL databází, poté má dvě možnosti, pokud je ještě před 16h, vyčte data z databáze na dnešní den, a když se mu to podaří, odpoví „dnešní data už v databázi jsou“ a script se ukončí. Pokud dnešní data v databázi nenajde, pokusí se pomocí funkce DownloadSpot() stáhnout dnešní data z serveru OTE. Na URL adrese "<https://www.ote-cr.cz/cs/kratkodobe-trhy/elektrina/denni-trh/@@chart-data>" jsou data dostupná ve strojově čitelné formě ve formátu *.csv, tyto data jsou pomocí funkce jsondecode() zpracována a dále roztržena na sloupce s užitečnými daty. Nás zajímá primárně sloupec Cena (EUR/MWh). Tyto hodnoty se následně zapíší do předem připravené databáze a script se ukončí. Velmi podobně funguje kód, když je po 16h. Nejprve se stáhnou data z databáze pro zítřejší den, pokud je to možné, odpoví „zítřejší data už v databázi jsou“. Pokud zítřejší data v databázi nejsou, pokusí se je stáhnout ze serveru OTE. Stáhne je, roztrží a uloží do databáze, poté se script ukončí. Toto zdlouhavé opatření se může zdát zbytečné, ale pokud bychom kvůli každému požadavku kontaktovali OTE server, za chvíli bychom dostali „ban“ za nadměrné množství kontaktování serveru a přestal by nám odpovídat. Script by nefungoval ani kdyby byl náhlý výpadek internetu. Takto je zaručeno, že server je kontaktován pouze v případě, že na něm jsou data, která zatím nemáme ve své databázi.



Obr. 7.6 – Vývojový diagram stahování dat z OTE

7.3.2 Předpověď počasí

Předpověď počasí je dobrým pomocníkem v odhadu výroby FVE v hodinových intervalech. Služba pyforecast.cz za kterou stojí odborníci z Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze (UCEEB) se stará o předpověď osvitů pro celou ČR. Kombinuje data z několika modelů, radarových dat, meteorologických stanic i několika vlastních senzorů. Stahování dat o lokálním osvitě je zdarma, stačí pouze zadat přibližné souřadnice vlastní FVE, poté se vygeneruje API klíč a s ním už následně můžete stahovat odhad osvitů v hodinových intervalech až max. 5 dní dopředu, běžně 1 den dopředu.



Obr. 7.7– Nezpracovaná data o předpovědi osvitů v hodinových intervalech

	id	time	mnoztvi [MW]	cena [EUR/MW]	mnoztvikwh [kWh]	cenazkkwh [CZK/kWh]
<input type="checkbox"/>	217	2023-11-21 01:00:00.000000	3247.1	102.75	3.2471	2.56875
<input type="checkbox"/>	218	2023-11-21 02:00:00.000000	2682	98.2	2.682	2.455
<input type="checkbox"/>	219	2023-11-21 03:00:00.000000	2530.4	96.12	2.5304	2.403
<input type="checkbox"/>	220	2023-11-21 04:00:00.000000	2542.1	91.17	2.5421	2.27925
<input type="checkbox"/>	221	2023-11-21 05:00:00.000000	2712.9	95.75	2.7129	2.39375
<input type="checkbox"/>	222	2023-11-21 06:00:00.000000	3036.9	101.04	3.0369	2.526
<input type="checkbox"/>	223	2023-11-21 07:00:00.000000	2903.2	122.46	2.9032	3.0615
<input type="checkbox"/>	224	2023-11-21 08:00:00.000000	3561.1	135.74	3.5611	3.3935
<input type="checkbox"/>	225	2023-11-21 09:00:00.000000	3731.1	141.88	3.7311	3.547

Obr. 7.8 – Administrátor MySQL databáze s daty o spotových cenách

V této části se mi nepodařilo přesně napočítat předpovězenou hodnotu osvitů ve W/m^2 , na výrobu z panelů naší elektrárny, proto data loguji zatím pouze informativně. Problém je v tom, že předpověď je počítána pro měřicí panel umístěný vodorovně proti obloze, ale panely FVE jsou rozmístěné po střeše na východ, jih i západ pro nejlepší pokrytí výroby během celého dne.

Sledováním historie výroby a předpovědi jsem odhalil výrazné odchylky od reálné a předpokládané výroby v době, kdy se tvořily v místě FVE silné lokální mlhy, které trvaly často i do 13 h. než se rozpustily. To ovšem nelze modelu příliš vytýkat, protože tvorba lokálních mlh u řek a rybníků se těžko předvídá.

The screenshot shows the phpMyAdmin interface. The left sidebar displays a tree view of databases, with 'pvforecast' expanded to show the 'sunpower' table. The main area shows the table structure and data. The table has three columns: 'id', 'time', and 'osvit'. The data rows show a sequence of records from 2023-11-21 06:00:00 to 18:00:00, with 'osvit' values ranging from 0 to 113.

	id	time	osvit
<input type="checkbox"/>	7	2023-11-21 06:00:00.000000	0
<input type="checkbox"/>	8	2023-11-21 07:00:00.000000	0
<input type="checkbox"/>	9	2023-11-21 08:00:00.000000	0
<input type="checkbox"/>	10	2023-11-21 09:00:00.000000	0
<input type="checkbox"/>	11	2023-11-21 10:00:00.000000	10
<input type="checkbox"/>	12	2023-11-21 11:00:00.000000	48
<input type="checkbox"/>	13	2023-11-21 12:00:00.000000	78
<input type="checkbox"/>	14	2023-11-21 13:00:00.000000	104
<input type="checkbox"/>	15	2023-11-21 14:00:00.000000	113
<input type="checkbox"/>	16	2023-11-21 15:00:00.000000	17
<input type="checkbox"/>	17	2023-11-21 16:00:00.000000	0
<input type="checkbox"/>	18	2023-11-21 17:00:00.000000	0
<input type="checkbox"/>	19	2023-11-21 18:00:00.000000	0

Obr. 7.9 – Administrátor MySQL databáze s daty o osvitu

7.4 Stahování místních dat

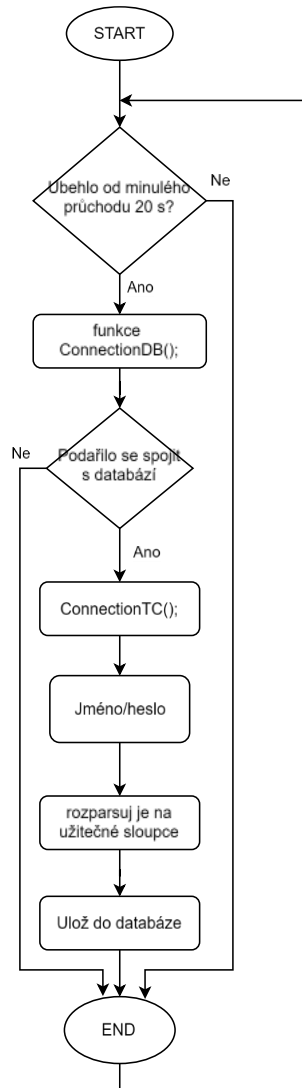
7.4.1 Tepelné čerpadlo

Stahování dat z tepelného čerpadla bylo zpočátku docela obtížné. Na vnitřní jednotce jsem našel pouze SD kartu, kam se ukládalo nastavení a logovala některá data, to nebylo úplně vhodné pro integraci do chytré domácnosti. Po několika mailech s výrobcem (TČ instalováno v roce 2016) jsem dostal tip na servisní ethernet konektor, který jsem odhalil až po odstranění krytu. V tuto chvíli už bylo poměrně snadné připojit TČ pomocí ETH kabelu k domácímu routeru, přidělit přes DHCP server adresu a začít komunikovat. Objevil jsem na něm web server, který vypadal totožně jako na dotykovém panelu vnitřní jednotky. Po několika pokusech se povedlo nalézt adresu s daty pro strojové zpracování ve formátu XML.



Obr. 7.10 – Ovládací panel UTI-IQCP

K logovaným datům uloženým na SD kartě, se bohužel nedá přes web server dostat. Proto je nutné je logovat vlastním řešením. Zvolil jsem podobný způsob logování jako pro čtení spotových cen. Každých 20 s (možná by stačilo každou minutu) spustím script, který se připojí k databázi, vyčte z tepelného čerpadla užitečná data, rozřadí je do patřičných sloupců a uloží do databáze.



Obr. 7.11 – Vývojový diagram stahování dat z TČ

id	time	t_in teplota venku [°C]	t_out teplota uvnitř [°C]	t_top teplota topení [°C]	t_tuv teplota TUV [°C]	Power aktuální výkon TC [%]	st1	st2	st_tuv 0 = neohřívá TUV, 1 = ohřívá TUV	st4	st5
9961	2023-11-19 22:01:02	24	7.7	43.9	45.6	0	1	4	0	0	0
9962	2023-11-19 22:01:22	24	7.6	43.9	45.6	0	1	4	0	0	0
9963	2023-11-19 22:01:42	24	7.6	43.9	45.5	0	1	4	0	0	0
9964	2023-11-19 22:02:02	24	7.6	43.9	45.4	0	1	4	1	0	0
9965	2023-11-19 22:02:22	24	7.6	43.8	45.4	50	1	4	1	0	0
9966	2023-11-19 22:02:42	24	7.6	43.8	45.6	50	1	4	1	0	0
9967	2023-11-19 22:03:03	24	7.6	43.7	45.7	50	1	4	1	0	0
9968	2023-11-19 22:03:23	24	7.6	43.6	45.8	50	1	4	1	0	0
9969	2023-11-19 22:03:43	24	7.6	43.8	45.7	50	1	4	1	0	0
9970	2023-11-19 22:04:03	24	7.6	44.1	45.8	50	1	4	1	0	0
9971	2023-11-19 22:04:23	24	7.6	44.3	45.8	50	1	4	1	0	0
9972	2023-11-19 22:04:43	24	7.6	44.6	45.9	50	1	4	1	0	0
9973	2023-11-19 22:05:03	24	7.6	44.9	45.9	50	1	4	1	0	0
9974	2023-11-19 22:05:23	24	7.7	45.2	45.9	50	1	4	1	0	0
9975	2023-11-19 22:05:43	24	7.8	45.5	45.9	50	1	4	1	0	0
9976	2023-11-19 22:06:03	24	7.8	45.8	46	50	1	4	1	0	0

Obr. 7.12 – Administrátor MySQL databáze s daty o TČ

```

http://10.0.0.90/control.xml
<response>
<st1>1</st1>    //1 = Zap, 2 = Vyp
<st2>1</st2>    //1 = Topí, 2 = Chladí
<st3>1</st3>    //1 = Léto, 2 = Zima
</response>

http://10.0.0.90/status.xml
<response>
<rtcc>Út 09:35:35 02.05.2023 </rtcc>
<tep2> 25.6°C</tep2>    //teplota vnitřní
<tep3> 45.6°C</tep3>    //teplota topení
<tep4> 48.4°C</tep4>    //teplota TUV
<tep8> 11.5°C</tep8>    //Venkovní teplota
<pwr>0 %</pwr>        //aktuální výkon TC
<st1>1</st1>
<st2>4</st2>
<st3>0</st3>          // 0 = neohřívá TUV, 1 = ohřívá TUV
<st4>0</st4>
<st5>0</st5>
</response>

```

Obr. 7.13 – XML data z TČ

7.4.2 Fotovoltaický měnič

Logování dat z fotovoltaického měniče SOLAX, je možné dělat několika způsoby. Nejjednodušší způsob je podívat se na web www.solaxcloud.com nebo aplikaci [SolaxCloud](#), ve kterém se zobrazují všechny historicky logovaná data přehledně v interaktivních tabulkách.

Logování probíhá v 5min intervalech. Z pohledu firmy je to logické, protože tato služba je zdarma. Obsloužit všechny jejich měniče za kratší dobu než 5 min by bylo obtížně realizovatelné, ale uživatel v reálném čase nevidí všechny změny, výroby a spotřeby. Proto existuje lokální varianta přístupu k datům, konkrétně přes v průmyslu hojně využívaný Modbus. Střídač ho podporuje, jak v jeho TCP verzi přes Ethernet/WiFi, tak jako sériový po

RS485. Já jsem zvolil sériový přenos, protože střídač byl dodán pouze s wifi modulem, ne s Ethernet modulem, a wifi signál do sklepa nemá moc dobrý dosah, proto docházelo k častým výpadkům. Vyžádal jsem si od výrobce modbusovou mapu a jako první seznámení se střídačem jsem vyrobil jednoduchý ON/OFF regulátor s hysterezí pro zapínání a vypínání dodatečně instalovaných PC ventilátorů pro chlazení střídače podle vnitřní teploty čtené přes Modbus. V letních dnech při vysoké výrobě a spotřebě dosahoval chladič střídače i 65 °C, při přehřátí omezoval výrobu. To bylo z důvodu snížené návratnosti nežádoucí. Po instalaci ventilátorů se teplota pohybovala i v zátěži od 45 do 55 °C. Toto řešení zvýšilo účinnost a zároveň potenciálně zvýšilo životnost teplem namáhaných součástek.

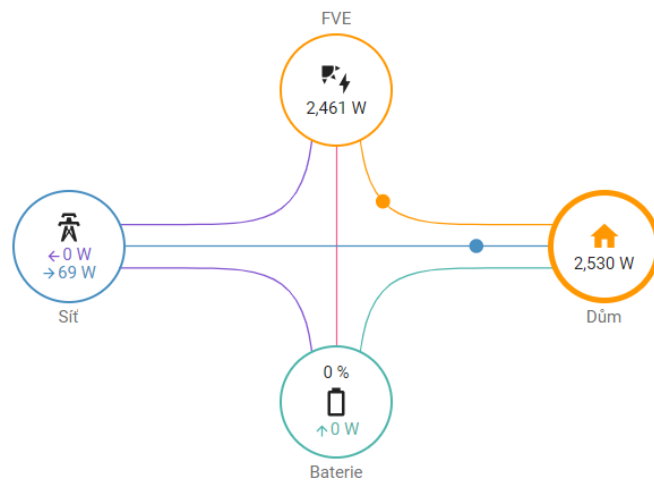
Později bylo ale potřeba více. Z důvodu jednoduchosti jsem vsadil na integraci do HomeAssistant, tam je už od komunity odladěná knihovna, která umí číst i zapisovat parametry a dělat logy. Je tam podpora pro TCP i serial verzi. Frekvence logování je libovolná, já jsem zvolil jednou za 10 s.

7.5 Home assistant

Home assistant je všestranné centrum domácí automatizace, které integruje velké množství inteligentních spotřebičů různých značek. Je možné ho neomezeně rozšiřovat, přidávat vlastní zařízení. Tato zařízení se následně rozdělí do různých automatizačních skupin podle funkcí a způsobu použití. Automatizovat je možné pomocí různých scriptů, případně externího programovacího nástroje NodeRed, na základně různých událostí např. je levnější, dražší než ..., nebo podle časového rozvrhu. Home asisistent dále obsahuje databázový server kam se ukládá každá změna stavu jakékoliv entity. Tato data se přehledně zobrazují v různých grafech. V našem domě je tento nástroj automatizace využit pro integraci solárního měniče, bezdrátového senzoru teploty a stahování dat o spotových cenách. Na obrázcích 7.14, 7.15 a 7.16 jsou vidět různé interaktivní vizualizace dat, pohled na aktuální distribuci elektřiny, cenu energie v jednotlivých hodinách nebo solární výrobu po hodinách v celém předchozím dni.

Home asisistent běží na domácím serveru, všechna data tak zůstávají na lokálním úložišti. Je to velká výhoda oproti jiným výrobcům různých modulů pro domácí automatizaci, kde automatizace často běží na vzdáleném serveru a moduly jsou pouze vstupně výstupní jednotky. V tom případě dochází k vysoké latenci a pokud dojde k výpadku internetu ochromí to celý systém. U nás automatizace pracuje na domácím serveru vytvořeném z Raspberry Pi 5.

Tento minipočítač má dostatečný výkon, malé rozměry a nízkou spotřebu, což je pro účely nepřetržitého provozu ideální.

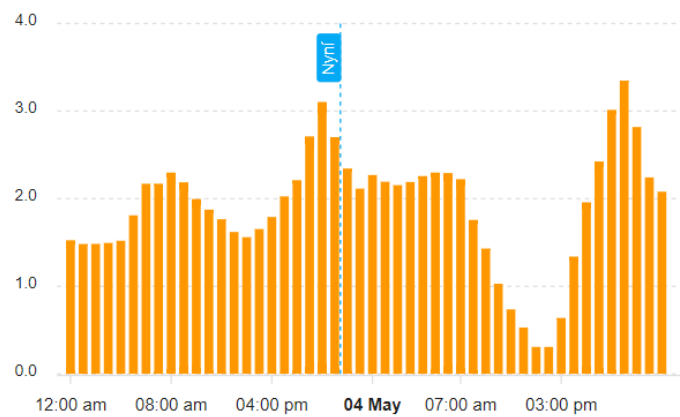


Obr. 7.14 – Aktuální distribuce energie Home Assistant

Graf spotových cen

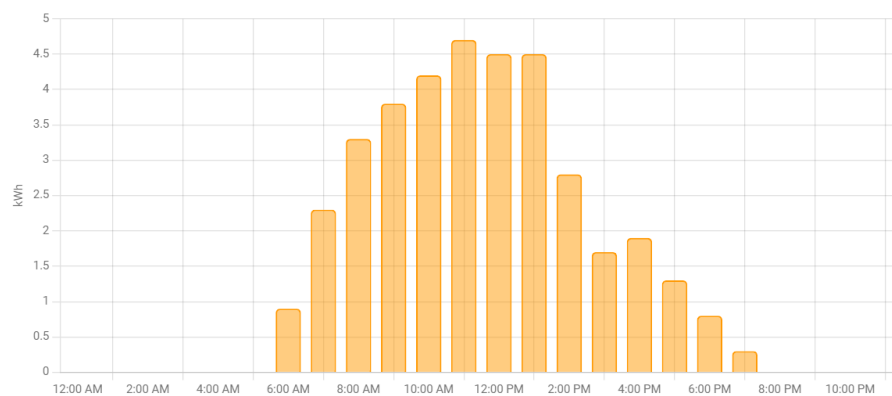
2.7 Kč/kWh

Current Spot Electricity Price



Obr. 7.15 – Graf spotových cen Home Asisstant

Solar production



Obr. 7.16 – Graf solární produkce Home Assistant

7.6 Algoritmy řízení

7.6.1 Modelová situace 1

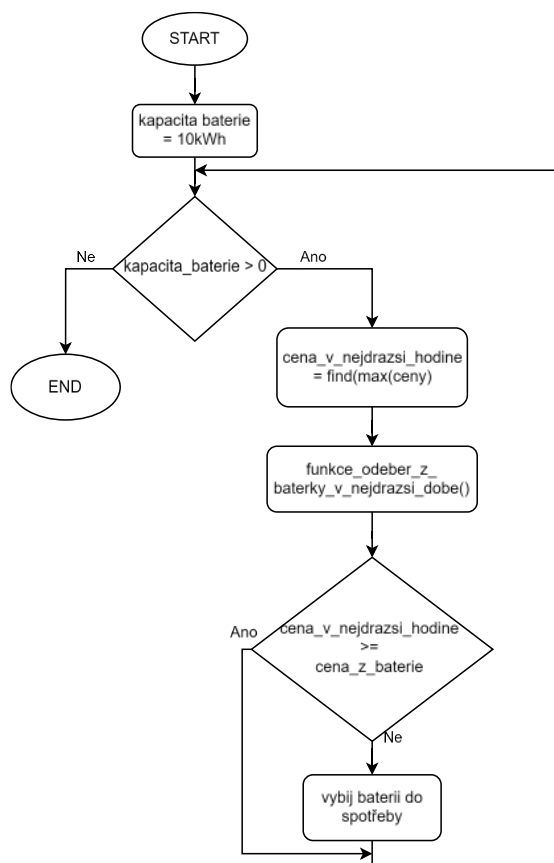
V první situaci se cena na spotovém trhu během dne výrazně mění (rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší cenou je až devítinásobný). Je zatažený, zimní deštivý den, výkon FVE je možné zanedbat. Dům má poměrně velkou spotřebu elektřiny pro vytápění tepelným čerpadlem v průběhu celého dne. Chytrým využitím domácího úložiště (baterie) je možné nabít baterii v nejlévnější době a uspokojit poptávku v nejdražších dobách v průběhu dne z akumulované energie a tím snížit účet za nakoupenou energii.

Nabíjení baterie se sítě

Algoritmus vyhledá období s nejnižší cenou spotové energie pomocí funkce hledání minima, zjistí počáteční levnou hodinu, začne dobíjet baterii. Baterie s kapacitou 10 kWh se nedokáže nabít za 1 hodinu, max rychlost nabíjení je 4 kW za hodinu. To znamená, baterie se bude nabíjet přibližně 2 h a 30 min. Jakmile se nabije, algoritmus vypočítá, kolik Kč stálo nabití baterie (4,236 Kč), k této hodnotě přičte odpovídající cenu za opotřebení a ztráty při nabíjení 0,5 Kč/kWh, které podělí kapacitou baterie. Tím vyjde přibližná cena 0,9236 Kč/kWh energie z baterie.

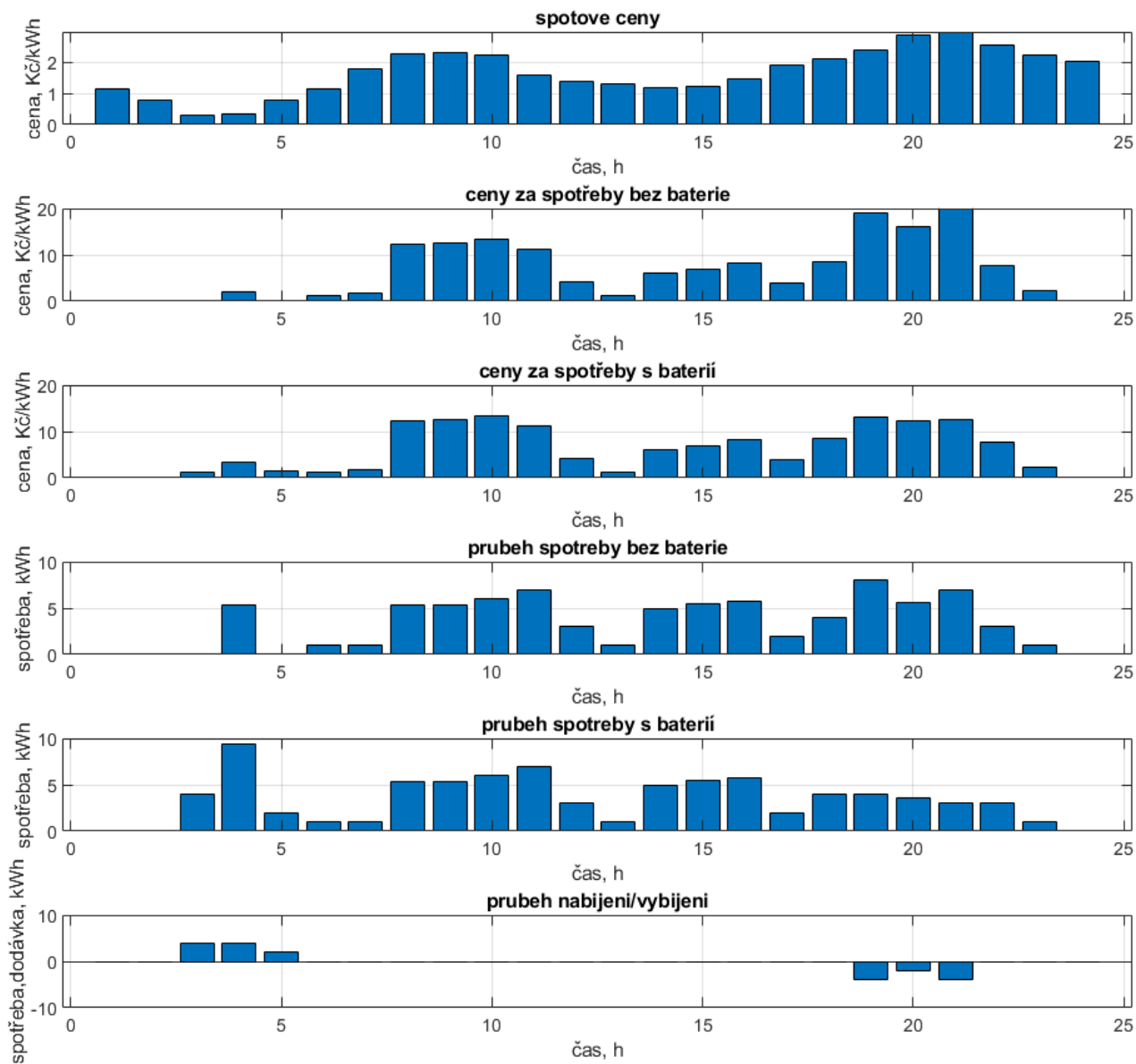
Vybíjení baterie do spotřeby

Nyní už se baterie chová jako kterýkoliv jiný tržní zdroj energie. V této chvíli algoritmus prohledává, kdy je nejvýhodnější vybití baterii. Nejdříve si nasimuluje, kolik peněz stojí spotřeba v jednotlivých hodinách, kdy by všechnu energii nakupoval na spotovém trhu, ty uloží do pole „cena_v_nejdrazsi_hodine“. Poté pomocí funkce hledání maxima, nalezne nejdražší cenu. Nyní funkcí „funkce_odeber_z_baterky_v_nejdrazsi_dobe()“ napočítá kolik by bylo možné z baterie odebrat energie a za jakou cenu. Stejně jako u nabíjení, ani vybití nelze nekonečnou rychlostí, max. rychlost vybití je omezena na 4 kW za hodinu. Ze spotového trhu je nabídnuta cena 2,982 Kč/kWh, baterie nabízí 0,9236 Kč/kWh, to je při max 4 kWh z baterie úspora 8,2336 Kč. V baterii zbylo 7 kWh, nyní algoritmus najde druhou nejvyšší cenu a smyčka se opakuje, dokud není baterie úplně vybitá. Na závěr se shrnou výsledky. Silová energie za celý den pouze ze spotu by stála 159,3361 Kč, energie za celý den s pomocí baterie (nabití a vybití) by stála 149,47 Kč, to je čistá úspora asi 10 Kč / den.



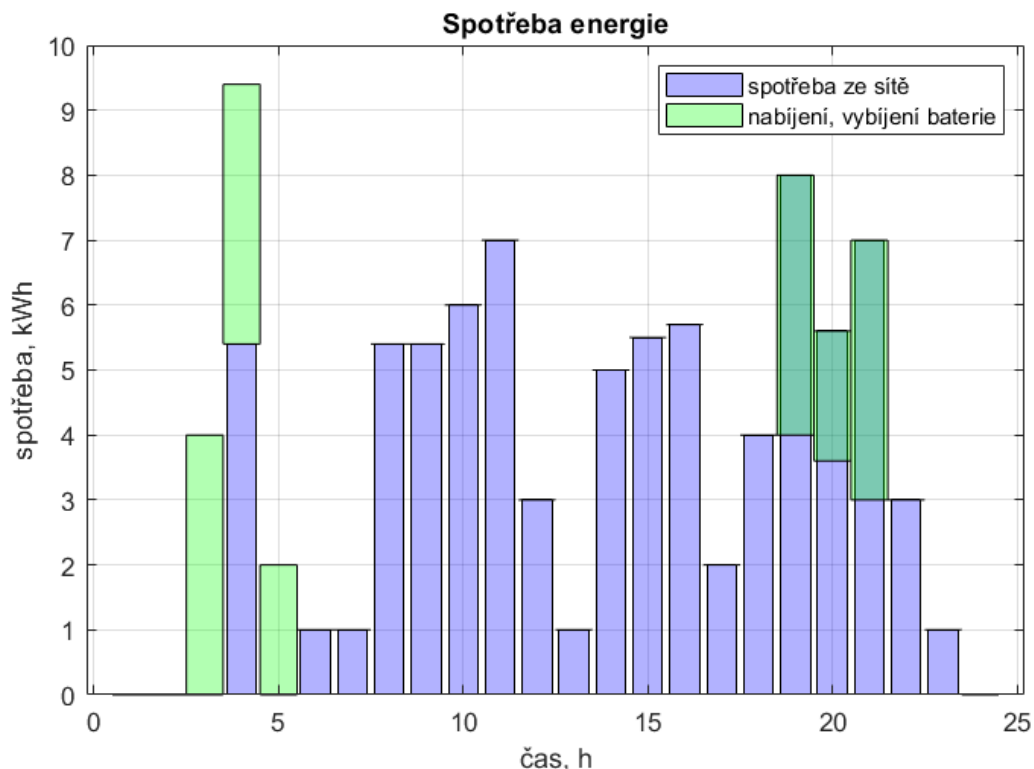
Obr. 7.17 – Vývojový diagram vybíjení baterie do spotřeby

První z grafů zobrazuje průběh spotových cen v Kč/kWh za den v hodinových intervalech od 0. hodiny až do 23. hodiny. Tato cena zahrnuje pouze její silovou složku (neregulovanou část), k ní je třeba ještě připočítat odměnu obchodníkovi, cenu za distribuci a další poplatky. Tyto složky ovšem nelze ovlivnit a platí se i při nabíjení baterie ze sítě. Proto se ve výsledné úspoře nepromítnou. Druhý graf zobrazuje ceny za jednotlivé hodiny v případě, že se všechna energie nakoupí za spotové ceny. Sumu těchto hodnot jsme se snažili co nejefektivněji minimalizovat za pomoci nabíjení a vybíjení baterie. To je vidět na třetím grafu, kde se o něco zvýšila cena od 4 do 6 hodiny nabíjením, ale o mnohem více se cena snížila od 19. do 21 hodiny. Třetí a čtvrtý graf zobrazuje to samé, jen ve spotřebě. Na posledním z grafů je průběh nabíjení a vybíjení baterie.



Obr. 7.18 – Graf spotřeby, spotových cen a baterie

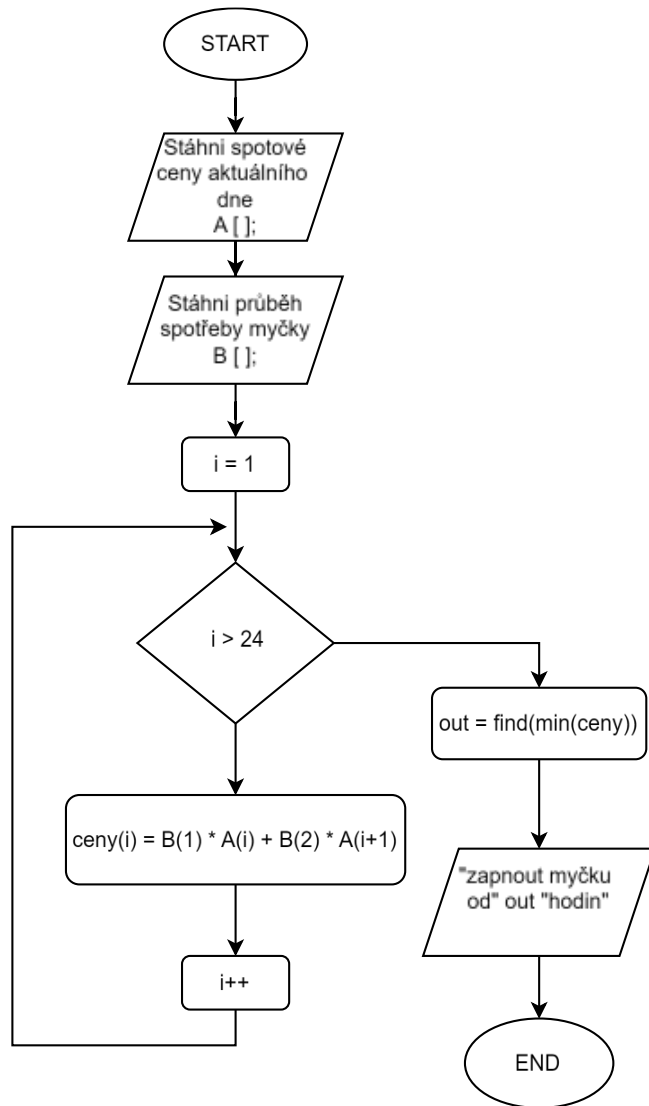
Na grafu obr. 7.19 jsou vidět kombinované hodnoty spotřeby domácnosti s účastí baterie. Modré sloupce určují spotřebu ze sítě, zelené nabíjení a vybíjení baterie.



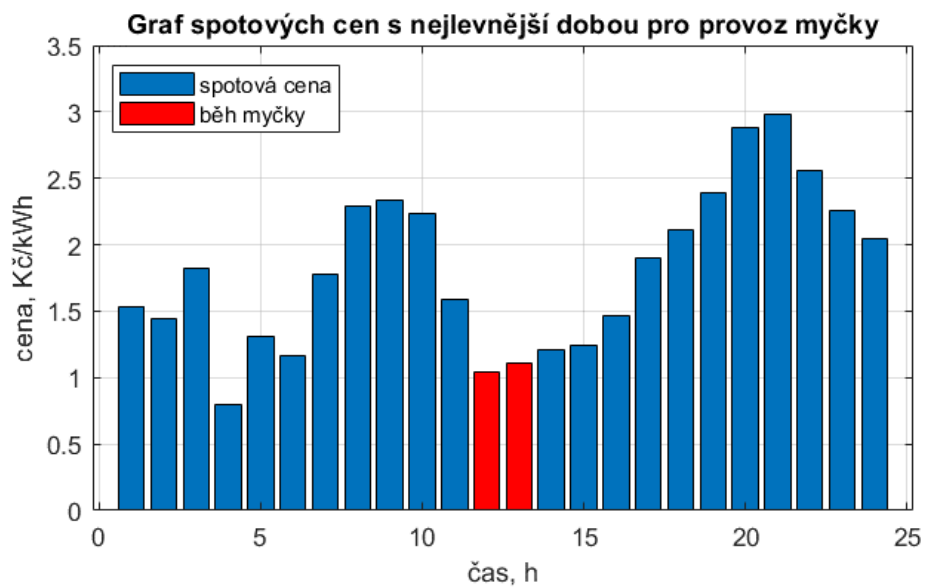
Obr. 7.19 – Graf nabíjení/vybíjení 10kWh baterie a spotřeby domu

Zapnutí flexibilního spotřebiče ze sítě

Algoritmus pro nalezení nejnižší ceny pro provoz flexibilního zařízení funguje velmi podobně jako algoritmus pro hledání nejnižší ceny pro nabíjení baterie. V databázi máme uloženy předem změřené průběhy příkonu flexibilních spotřebičů (pračky, myčky), tyto hodnoty jsou zjednodušeny pouze na spotřebu elektřiny v jednotlivých hodinách pracovního cyklu. Na následujícím příkladu bude znázorněno, jakým způsobem se hledá nejnižší cena pro provoz myčky. V první hodině myčka spotřebuje 0,507 kWh a ve druhé 1,241 kWh. Tato dvojice je postupně násobena s dvojicemi hodinových spotových cen. Jejich součet je uložen do pole „ceny[];“ Toto se opakuje, dokud se neprojde celé pole. Následně se v tomto poli pomocí minimalizace najde nejmenší hodnota a její index ukazuje na čas, od kdy je vhodné spotřebič zapnout. Takto je dosaženo nejlevnějších hodnot po celou dobu běhu myčky. Snažil jsem se na grafu názorně předvést, že i přestože je cena ve 3 h ráno bezkonkurenčně nejnižší, tak při dvouhodinové provozu je v součtu levnější spustit myčku až od 11 h.



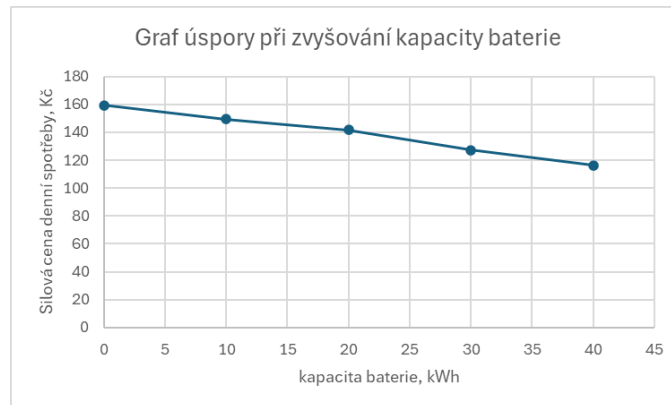
Obr. 7.20 – Vývojový diagram nejlevnější cena pro spuštění myčky



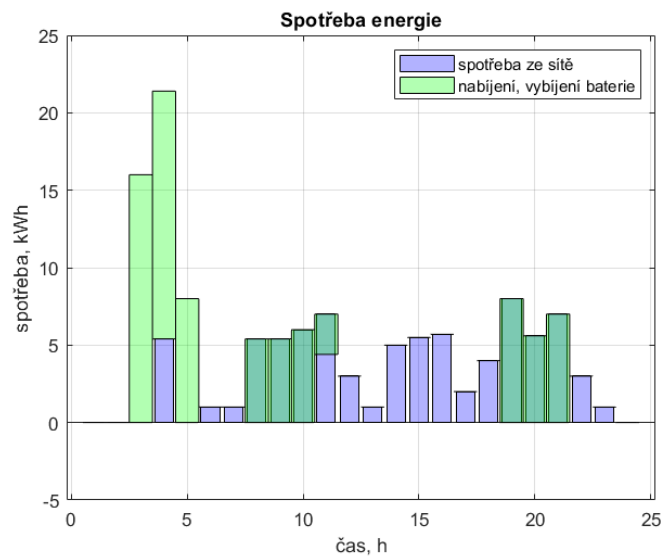
Obr. 7.21 – Graf spotových cen s nejlevnější dobou pro provoz myčky

7.6.2 Modelová situace 2

V této situaci bude popsáno a nasimulováno, zda by se vyplatilo pro ten samý den jako v situaci 1 přikoupit větší kapacitu baterie. Úspora se zvyšováním kapacity baterie roste téměř lineárně. Při 50 kWh baterie se narazilo na limit, kdy už není dostatek předražených hodin a cena z baterie byla levnější než cena ze spotu. To znamená že baterie přestává spořit.



Obr. 7.22 – Graf ceny za den při zvyšování kapacity baterie



Obr. 7.23 – Graf nabíjení/vybíjení 40kWh baterie a spotřeby domu

Pokud cena na spotu během dne výrazně kolísá, je možné s přebytečnou kapacitou baterie obchodovat (v drahé době vybíjet do sítě).

(nejnižší spotová cena + distribuce a další poplatky + opotřebení baterie)

<

nejvyšší spotová cena

Když je po většinu dní v roce splněna tato podmínka, vyplatí se prodávat nakoupenou energii do sítě.

$$(\text{nejnižší spotová cena} \times 3) < \text{nejvyšší spotová cena}$$

Taková bilance vychází ještě lépe v případě, že energie do baterie není nakoupena, ale vyrobena jako přebytek z FVE, v tu chvíli se totiž nepočítá cena za distribuci, ale jen cena opotřebení baterie, opotřebení FVE a odměna obchodníkovi.

$$(0,5 + 0,3 + 0,6) < \text{aktuální spotová cena}$$

Není nutné k tomuto účelu kupovat drahou samostatnou baterii, v budoucnu bude možné připojit si baterii vlastního elektromobilu k domu a využívat ji k pokrytí vlastní spotřeby a zároveň s ní za výhodných podmínek obchodovat na burze. Vše ovšem záleží na ceně baterie, rychlosti opotřebení a ztrátách.

7.6.3 Modelová situace 3

V této situaci bude rozebrána úspora v případě využití tepelného čerpadla. Tepelnému čerpadlu o tepelném výkonu 13 kW, trvá vytopit rodinný dům o +1 °C přibližně jednu hodinu při venkovní teplotě +7 °C.

Tabulka vlastností tepelného čerpadla:

				+1 °C	-1 °C
+7 °C / 45 °C radiátory	Tepelný výkon	kW	13,1	1 hodina	4 hodiny
	Příkon		3,7		
	COP		3,25		
-7 °C / 45 °C radiátory	Tepelný výkon	kW	13,1	2 hodiny	1 hodina
	Příkon		5,39		
	COP		2,43		

Tab. 7.1 – Vlastnosti tepelného čerpadla

Do algoritmu musíme nejprve přidat několik vstupních parametrů jako spotové ceny aktuálního dne, příkon TČ, teplota okolí, požadované teploty pro režim komfort a útlum a časový plán režimů. On / Off regulátor s hysterezí se podle časového plánu a aktuální teploty v domě rozhodne, zda je třeba topit nebo ne. Následně se pomocí rovnice zjednodušeného energetického modelu domu spočítá, jestli má teplota v domě klesnout nebo vzrůst a o kolik. Rovnice 7.2 popisuje jak se teplota v domě mění v čase na základě interakce s okolním prostředím. Pro její výpočet se používají numerické metody, konkrétně Eulerova metoda. Tato metoda je nejjednodušší metodou numerického řešení obyčejných diferenciálních rovnic s danými počátečními podmínkami. Pro lepší kvalitu regulace bylo rozlišení zvýšeno na 240 kroků, to znamená po 6 minutách.

Rovnice říká, že hodnota teploty v čase „i+1“ je rovna hodnotě teploty v čase „i“, plus „k“ násobku rozdílu mezi okolní teplotou a teplotou v domě, plus případný výkon topení.

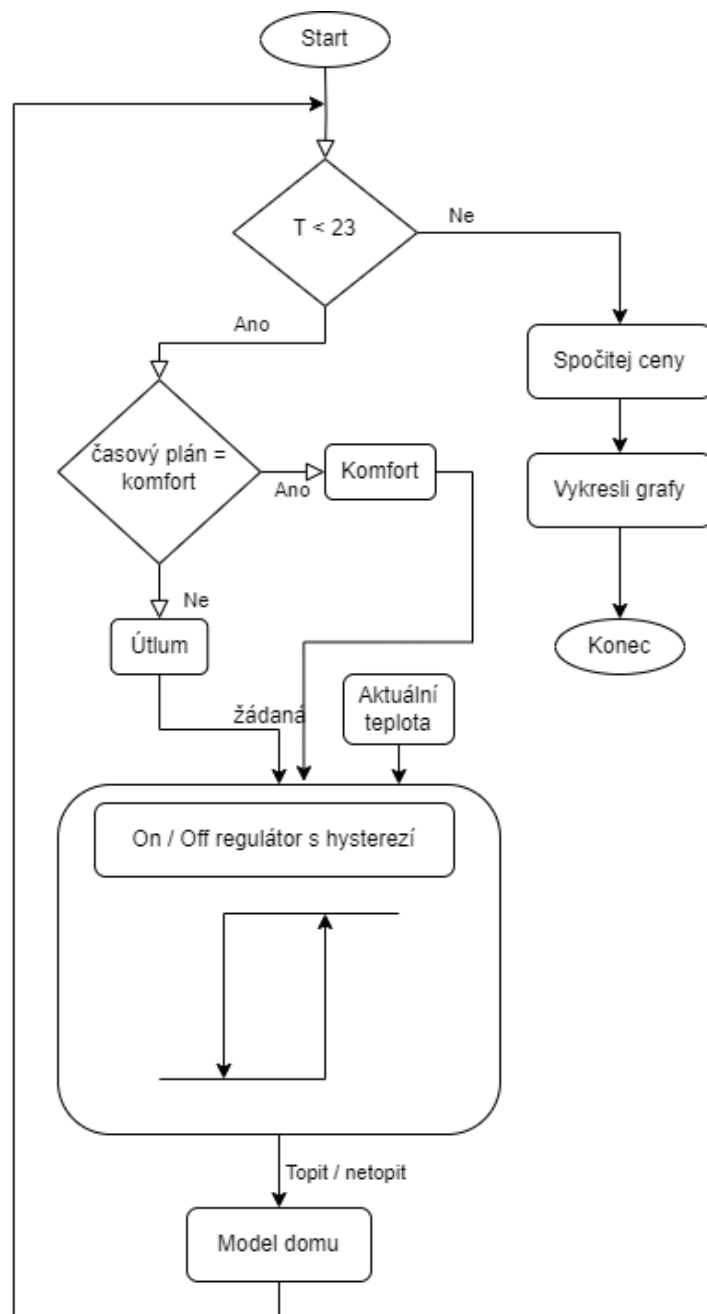
$$T_{i+1} = T_i + k \times (T_{okolni_i} - T_i) + vykon_topeni; \quad (7.2)$$

kde T_i – teplota v čase i, °C

T_{okolni_i} – teplota okolí v čase i, °C

k – koeficient, který ovlivňuje jak prudká je reakce na změnu a okolní teplotu, čím vyšší, tím rychlejší změna, -

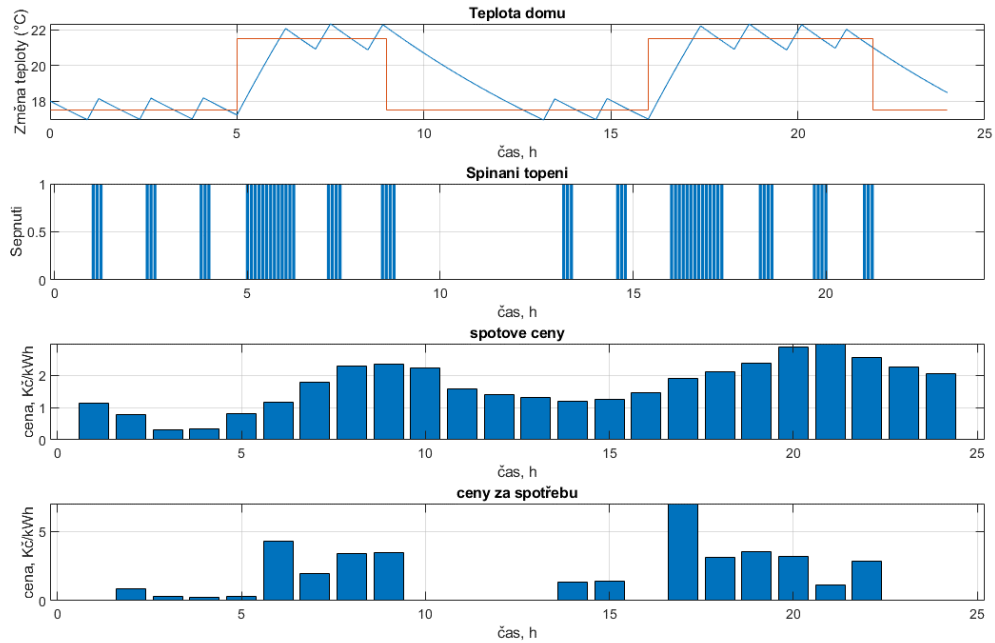
vykon_topeni – výkon topení, W.



Obr. 7.24 – Vývojový diagram topení v domě

Všední den, teplota okolí +7 °C

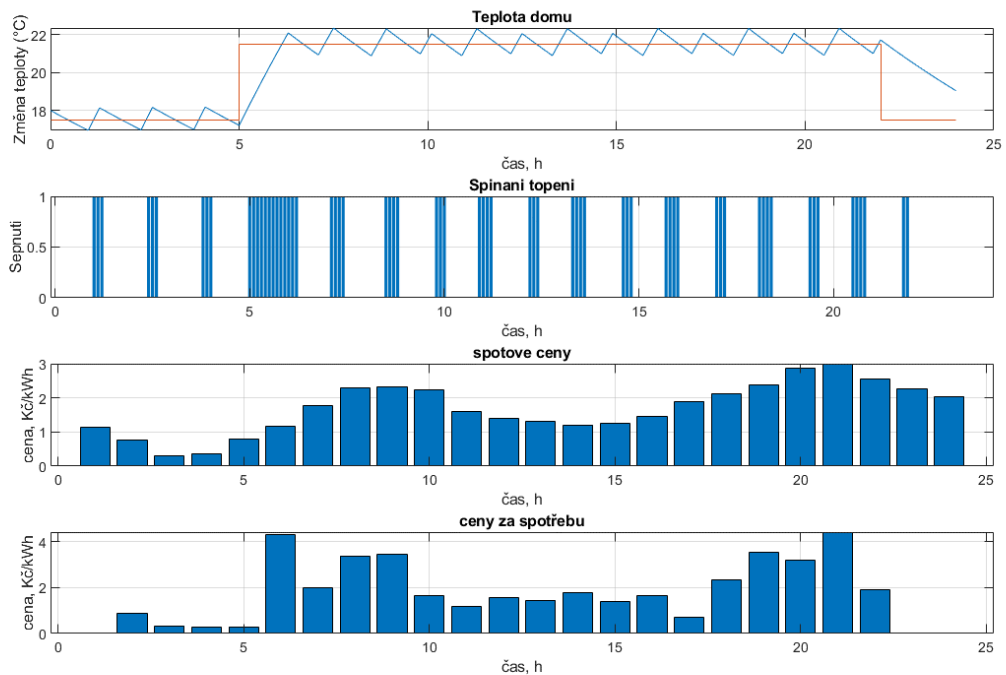
Spotřeba domu za celý den je 22,5 kWh a cena silové energie 38,4 Kč. Na grafu je vidět, že nevyšší spotřeba se téměř protíná s dobou drahých spotových cen ráno i večer.



Obr. 7.25 – Graf topení v domě, všední den, $T_o = +7$ °C

Víkend, teplota okolí +7 °C

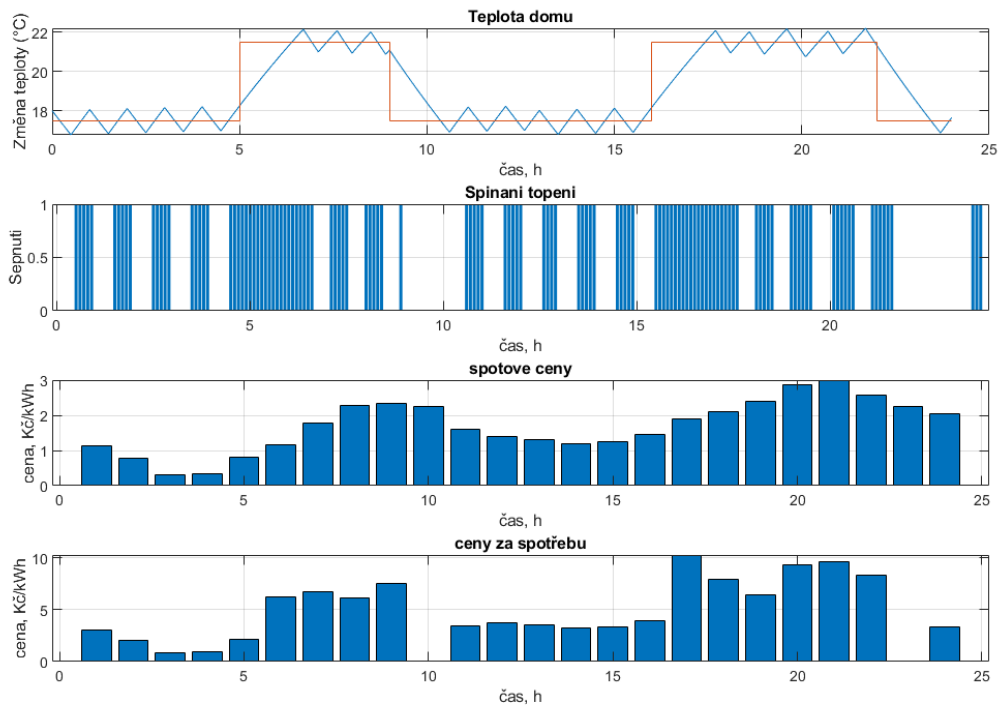
Spotřeba domu za celý den je 24,8 kWh a cena silové energie 41,5 Kč.



Obr. 7.26 – Graf topení v domě, víkend, $T_o = +7$ °C

Všední den, teplota okolí -7 °C

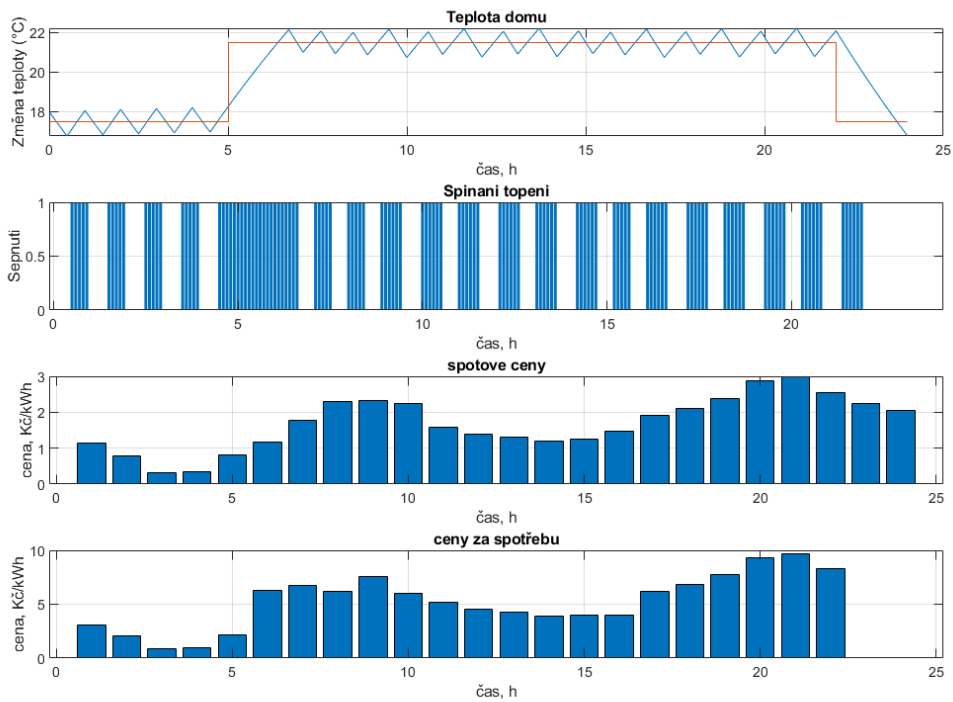
Spotřeba domu za celý den je 67,5 kWh a cena silové energie 112 Kč.



Obr. 7.27 – Graf topení v domě, všední den, $T_0 = -7$ °C

Víkend, teplota okolí -7 °C

Spotřeba domu za celý den je 69,7 kWh a cena silové energie 115 Kč.



Obr. 7.28 – Graf topení v domě, víkend, $T_0 = -7$ °C

Simulací byla zjištěna zajímavá věc. V době, kdy není dům obýván (obvykle 8 – 17h), se obecně nevyplatí nastavovat termostat do útlumu. Samozřejmě to neplatí pro dlouhodobě neobývané prostory. Velká změna žádané z útlumu na komfort znamená, že TČ musí pracovat i 1,5h v kuse, aby vyrobilo dostatečné množství tepla pro ohřátí budovy, k tomu dochází většinou večer, kdy cena energie je nejvyšší a teploty už jsou nízké, tudíž TČ má horší účinnost. V případě že se dům temperuje průběžně na komfort, TČ vyrovnává pouze ztráty domu.

Spotřebu by bylo možné zoptimalizovat přesným řízením dodávky tepla pomocí prediktivních regulátorů, nebo fuzzy regulátoru, který by dokázal šetrně rozhodnout, zda by bylo výhodnější při drahých hodinách snížit komfort (chladnější teplota v domě), anebo topit za jakoukoli cenu.

8 ZÁVĚR

V této diplomové práci byla analyzována problematika optimalizace nákladů a zrychlení návratnosti fotovoltaického systému instalovaného na střeše rodinného domu. Byly zkoumány možnosti snižování těchto nákladů, zejména v oblasti napojení na spotový trh. V praktické části byl navržen a implementován řídicí systém pro energeticky významné spotřebiče. Byla sbírána data ze senzorů teploty, elektroměrů, spotových cen a předpovědi počasí z internetu, aby bylo možné efektivně řídit spotřebu elektřiny. Na základě těchto dat byly nasimulovány čtyři modelové situace a porovnány různé řídicí algoritmy. Výsledky ukazují, že efektivní řízení spotřeby elektřiny na základě sledování spotového trhu může výrazně snížit náklady na provoz domácnosti. Tímto způsobem lze dosáhnout rychlejší návratnosti investice do fotovoltaiky.

Tato práce obsahuje souhrn znalostí o domácí FVE, různých typech akumulace energie, způsobů optimalizace nákladů na vytápění a využívání energeticky náročných spotřebičů, dále přispívá k lepšímu porozumění této velmi aktuální problematice. Poskytuje užitečné informace pro všechny, nejen pro majitele rodinných domů s fotovoltaickými systémy. Představuje to jeden z udržitelných způsobů výroby elektřiny a její efektivní využití, který může mít pozitivní dopad nejen na životní prostředí, ale i na rodinný rozpočet.

Tato práce má velký potenciál rozšíření do budoucna. Bylo by možné do ní implementovat prvky umělé inteligence pro přizpůsobení se chodu jednotlivých domácností a zoptimalizovat tak jejich energetické náklady, zároveň pomoci stabilizovat distribuční síť.

POUŽITÁ LITERATURA

- BALOG a HORÁČEK. 2024 "Novela energetického zákona (Lex OZE II)." PWC [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: blog.pwc.cz/novela-energetickeho-zakona-lex-oze-ii
- BAŠTA a A KOL. 2020 "Skladování elektřiny prostřednictvím tepla aneb Carnotovy baterie 1. díl – principy a přehled." Online. ČVUT. [online]. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/21610-skladovani-elektriny-prostrednictvim-tepla-aneb-carnotovy-baterie-1-dil-principy-a-prehled
- BARTHOLOMEW, Brian. 2023 "California's duck curve" @BPBartholomew. Twitter.com [online]. 27. 4. 2023 [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: twitter.com/BPBartholomew/status/1651348197200019460
- ČERNÝ, A. 2023 "Modely energetických společenství (es) a sdílení elektřiny." Energetický regulační úřad [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2023/3/03_Modely-ES-Sdileni.pdf
- ČSN EN 62056-21. "Měření elektrické energie - Výměna dat pro odečet elektroměru, řízení tarifu a regulaci zátěže - Část 21: Přímá místní výměna dat." Březen 2004.
- ČSN EN 13757-2. "Komunikační systémy pro měřidla - Část 2: Komunikace pomocí kabelové sběrnice M-Bus." Říjen 2018.
- ČSN EN 13757-3. "Komunikační systémy pro měřidla - Část 3: Aplikační protokoly." Říjen 2018.
- ČEZ. 2003a "Energie ze všech stran: encyklopedie energetiky." 2., upr. vyd. Praha: České energetické závody, 2003. ISBN (brož.).
- ČEZ. 2003b "Energie z obnovitelných zdrojů: encyklopedie energetiky." 2., upr. vyd. Praha: České energetické závody, 2003. ISBN (brož.).
- ČEZ. 2024 "Komunitní sdílení elektřiny." ČEZ [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: www.cezdistribuce.cz/cs/pro-zakazniky/potrebuji-vyresit/stavajici-pripojeni/sdileni-elektriny/komunitni-sdileni-elektriny
- ENSLIN, J. 1997 "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter." ECEE University of Colorado Boulder [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: www.semanticscholar.org/paper/Integrated-photovoltaic-maximum-power-point-Enslin-Wolf/4833d690f7e0a4020ef48c1a537dbb5b8b9b04c6
- ERÚ, 30.11.2023 "ERÚ zveřejnil regulované ceny elektřiny a plynu na rok 2024" Tisková zpráva Energetického regulačního úřadu. Dostupné z: eru.gov.cz/sites/default/files/obsah/prilohy/20231130tzcreruproelektroenergetikuaplynarenstvi.pdf
- EON, 2023 "Z čeho se skládají ceny elektřiny a plynu". [online]. [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: www.eon.cz/radce/energie/ceny-energie/z-ceho-se-skladaji-ceny-elektriny-a-plynu
- FRAUNHOFER ISE. 2021 "PV Report: Facts about solar energy worldwide" [online]. [cit. 2024-04-11] Dostupné z: www.pveurope.eu/markets/fraunhofer-ise-pv-report-facts-about-solar-energy-worldwide
- FVESYSTEMY. 2021 "Konstrukce panelu." [online]. [cit. 2024-04-11]. Dostupné z: www.fvesystemy.cz/Terminologie-a5_0.htm

- HLADÍK, R. 2023 "Amorfni solární panely." EVOLTY. [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: evolty.cz/solarni-panely/amorfni-solarni-panely/
- HINCL, J. 2023 "-30 % za elektřinu domácnosti?" [online]. [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: www.youtube.com/watch?v=zrLZtN1gkFk&t=574s&ab_channel=ElectroDad
- KADLECOVÁ, M. 2024 "Co je to kachni křivka a proč by ji měli znát provozovatelé fotovoltaiky?" Solarnimagazin.cz [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: solarnimagazin.cz/co-je-to-kachni-krivka-a-proc-by-ji-meli-znat-provozovatele-fotovoltaiky/
- KRÝŠOVÁ, S. 2024a "Přehledně: Jak se zapojit do sdílení elektřiny a které poplatky vás neminou?" Seznam Zprávy [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: www.seznamzpravy.cz/clanek/ekonomika-firmy-prehledne-jak-se-zapojit-do-sdileni-elektřiny-a-ktere-poplatky-vas-neminou-242851
- KRÝŠOVÁ, S a P KUSÝ. 2024b "Nová položka na účtu, změna tarifů i posílení sítě. Co přinese sdílení proudu." Seznam Zprávy [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: www.seznamzpravy.cz/clanek/audio-podcast-agenda-nova-polozka-na-uctu-zmena-tarif-u-i-posileni-site-co-prinese-sdileni-proudu-248395
- LYČKA, Z. 2021 "Spočítejte si: Kolik tepla vysálá bojler či kouřovod?" Vytapeni.tzb-info.cz. [online]. [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: vytapeni.tzb-info.cz/22089-spocitejte-si-kolik-tepla-vysala-bojler-ci-kourovod
- MALÝ, M. 2016 "Protokol MQTT: komunikační standard pro IoT." Root, Big Clown. [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: www.root.cz/clanky/protokol-mqtt-komunikacni-standard-pro-iot/
- MATUŠKA, T a B ŠOUREK. 2014 "Porovnání solárního fototermického a fotovoltaického ohřevu vody" [online]. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/11103-porovnani-solarniho-fototermickeho-a-fotovoltaickeho-ohrevu-vody
- NANO ENERGIES. 2024 "Merit Order" [online]. [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: nanoenergies.cz/slovník/merit-order
- NEMAKEJ. 2021 "Jaký je rozdíl mezi střídačem a měničem?" Nemadej.cz [online]. [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: www.nemadej.cz/jaky-je-rozdil-mezi-stridacem-a-menicem-o544
- NPÚ. 2022 "Fotovoltaické systémy v památkové péči." Národní památkový ústav [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: www.npu.cz/portal/o-nas/npu-a-pamatkova-pece/npu-jako-institute/hlavni-temata-sezony/2022/fotovoltaika/fotovoltaika-v-pp---upraveno-23.pdf
- PLYN. 2023 "Kde se bere LNG a 2 další fosilní plyny" [online]. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: www.plyn.cz/kde-se-bere-lng-a-2-dalsi-fosilni-plyny
- STAŇEK, K. 2020 "Fotovoltaika pro budovy - přehled technologie." Online. ČVUT Praha, Fakulta stavební. Aktualizováno 2020. [online]. [cit. 2024-04-11] Dostupné z: docplayer.cz/13042222-Cvut-v-praze-fakulta-stavebnithakurova-7-166-29-praha-6--email-kamil-stanek-fsv-cvut-cz-http-fotovoltaika-fsv-cvut-czbudovy-prehled-technologie.html
- TZB-INFO. 2024 "Akumulace elektřiny." Oze.tzb-info [online]. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny
- VIDIM, J. 2013a. "Instalace komunikační sběrnice M-Bus, I. část." TZB-info, Domat Control System s.r.o. [online]. 5.2.2013 [cit. 2024-03-07]. Dostupné z: elektro.tzb-info.cz/merici-a-regulacni-technika/9539-instalace-komunikacni-sbernice-m-bus-1-cast

- VIDIM, J. 2013b. "Instalace komunikační sběrnice M-Bus, 2. část - Převodníky." TZB-info, Domat Control System s.r.o. [online]. 11.2.2013 [cit. 2024-03-07]. Dostupné z: elektro.tzb-info.cz/merici-a-regulacni-technika/9550-instalace-komunikacni-sbernice-m-bus-2-cast-prevodniky
- VOJÁČEK, A. 2010 "Sběrnice Wireless M-BUS - jde to i bezdrátově..." Automatizace.hw.cz. [online]. 13.2.2010 [cit. 2024-03-07]. Dostupné z: automatizace.hw.cz/sbernice-wireless-mbus-jde-i-bezdratove
- VS ELEKTRO. 2020 "Fotovoltaika - monokrystal, nebo polykrystal." VS ELEKTRO. [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: www.vselektro.eu/fotovoltaika-monokrystal-nebo-polykrystal/
- VOTRUBA, V. 2023 "S výrobou zeleného vodíku nesmí Česko zaspát. A co takhle do jeho produkce zapojit i jádro?" Hospodářské noviny [online]. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: archiv.hn.cz/c1-67275050-s-vyrobou-zeleneho-vodiku-nesmi-cesko-zaspat-a-co-takhle-do-jeho-produkce-zapojit-i-jadro
- WAGNER, V. 2018 "Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie." OENERGETICE.CZ [online]. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: oenergetice.cz/akumulace-energie/velky-prehled-vyuzivane-i-perspektivni-technologie-akumulace-energie
- WOLF, P. 2024 "Platba za jistič: Kolik nás stojí rezervovaný příkon?" Cenyenergie.cz. [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: www.cenyenergie.cz/poplatek-platba-za-jistic-rezervovany-prikon/#/promo-ele-mini
- YUAN, M. 2021 "Getting to know MQTT." IBM Developer. [online]. [cit. 2024-03-14] Dostupné z: <https://developer.ibm.com/articles/iot-mqtt-why-good-for-iot/>
- ZILVAR, J. 2018 "Ideální akumulace sluneční energie? Pokud možno ve formě tepla." [online]. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: oze.tzb-info.cz/akumulace-tepla/17208-idealni-akumulace-slunecni-energie-pokud-mozno-ve-forme-tepla
- ZILVAR, Mgr. Jiří. 2021 "Za jak dlouho fotovoltaický panel vyrobí tolik energie, kolik se vynaložilo na jeho výrobu?" Tzb-info [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/22652-za-jak-dlouho-fotovoltaicky-panel-vyrobi-tolik-energie-kolik-se-vynalozilo-na-jeho-vyrobu

PŘÍLOHY

A – CD

Příloha k diplomové práci

Modelování a implementace automatického řízení bilance elektrické energie pro domácnost s fotovoltaickým systémem, baterií a účastí na spotovém trhu s elektřinou

Bc. Tomáš Mezera

CD

OBSAH

- 1 Text diplomové práce ve formátu PDF.
- 2 Algoritmy řízení