



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Návrh a ekonomické zhodnocení malé FVE

**Design and economic evaluation of a small photovoltaic power
plant**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Králík, Ph.D.

**Vojtěch Češík
Praha 2020**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Češík** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **478079**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh a ekonomické zhodnocení malé FVE

Název bakalářské práce anglicky:

Design and economic evaluation of a small photovoltaic power plant

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte analýzu potřeby energie ve vybraném objektu
- 2) Identifikujte dostupná technická řešení FVE a porovnejte jejich základních technické parametry
- 3) Navrhněte vhodnou dimenzi klíčových komponent a proveďte ekonomické vyhodnocení

Seznam doporučené literatury:

- 1) BOXWELL, Michael. Solar electricity handbook: a simple practical guide to solar energy : how to design and install photovoltaic solar electric systems.
- 2) LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. 2.,

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Tomáš Králík, Ph.D., katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **27.01.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **22.05.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

Ing. Tomáš Králík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho)ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne

.....
Vojtěch Češík

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Tomáši Králíkovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, cenné rady a odborný dohled.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem malé hybridní fotovoltaické elektrárny a jeho ekonomickým zhodnocením. Je v ní popsán očekávaný budoucí vývoj elektroenergetiky, a především fotovoltaiky v České republice. Následně je zde provedena charakteristika dostupných technických řešení fotovoltaických elektráren, přičemž hlavní důraz byl kladen především na hybridní systémy. Pro vybraný objekt jsou posouzeny podmínky pro výstavbu elektrárny a následně je zde provedena analýza potřeby energie včetně spotřebních diagramů. Dále se práce zabývá návrhem vhodné dimenze hybridní elektrárny, analýzou energetických zisků a v závěrečné části také ekonomickým posouzením celého projektu.

Klíčová slova

Solární energie, fotovoltaická elektrárna, hybridní solární systémy, fotovoltaické panely, hybridní měnič, bateriové úložiště

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to design a small hybrid photovoltaic power plant and to evaluate its economic efficiency. The first part of the thesis consists of an expected future evolution of power engineering, especially photovoltaics in the Czech Republic. A summary of available technical solutions of photovoltaic power plants is described, with the focus being on hybrid systems. Necessary conditions for constructing a specific object are evaluated and later, an analysis of energy consumption is presented, including utility diagrams. The final part of the thesis consists of a dimensions design of the hybrid power plant, an analysis of energetic income and finally of an economic evaluation of the entire project.

Key words

Solar energy, photovoltaic power plant, hybrid photovoltaic systems, photovoltaic panels, hybrid inverter, battery bank

Obsah

1. Úvod	9
2. Význam solárních zdrojů v České republice	10
2.1. Vývoj spotřeby elektrické energie	10
2.2. Vývoj výroby elektrické energie	11
2.3. Obnovitelné zdroje energie v České republice	13
2.3.1. Dosavadní vývoj	13
2.3.2. Budoucnost obnovitelných zdrojů	14
3. Technická řešení FVE	16
3.1. Off-grid systémy	16
3.2. Grid-tie systémy	16
3.3. Hybridní systémy	16
4. Komponenty hybridní fotovoltaické elektrárny	17
4.1. Fotovoltaické panely	17
4.1.1. Princip funkce	17
4.1.2. Technické parametry panelů	18
4.1.3. Typy panelů	18
4.2. Hybridní měnič	19
4.2.1. Technické parametry hybridních měničů	19
4.2.2. Typy hybridních měničů	20
4.3. Bateriové úložiště	20
4.3.1. Technické parametry baterií	20
4.3.2. Typy baterií pro fotovoltaické systémy	21
5. Popis vybraného objektu	22
5.1. Konstrukční parametry	22
5.2. Zeměpisné faktory	23
5.3. Analýza spotřeby energií	24
5.3.1. Spotřeba elektrické energie	25
5.3.2. Spotřeba teplé vody	27
6. Návrh hybridní fotovoltaické elektrárny	28
6.1. Stanovení výchozích předpokladů	28
6.2. Určení požadovaných parametrů systému	29
6.2.1. Požadované parametry pole fotovoltaických panelů	29
6.2.2. Požadované parametry hybridního měniče	29
6.2.3. Požadované parametry bateriového úložiště	30

6.3. Výběr vhodných komponent	30
6.3.1. Fotovoltaické panely	30
6.3.2. Hybridní měnič	31
6.3.3. Bateriové úložiště.....	32
6.3.4. Konstrukce pro uchycení panelů.....	33
6.3.5. Kombinovaný ohřívač TUV	33
6.4. Určení optimálního počtu panelů.....	34
7. Výsledný navržený systém.....	34
7.1. Technické parametry	34
7.2. Vyrobená elektrická energie	34
7.3. Využití vyrobené elektrické energie.....	35
7.3.1. Pokrytí aktuální spotřeby v objektu	36
7.3.2. Ohřev TUV	37
7.3.3. Prodej nevyužitá elektřiny do sítě.....	38
8. Ekonomické vyhodnocení	39
8.1. Výdaje.....	39
8.1.1. Pořizovací cena HFVE.....	39
8.1.2. Opětovný nákup komponent po skončení jejich životnosti	40
8.1.3. Výdaje na údržbu, servis a pojištění	40
8.2. Úspory za energie a příjmy za prodej elektřiny	41
8.2.1. Úspory za elektrickou energii	41
8.2.2. Úspory za plyn	41
8.2.3. Prodej elektřiny do sítě	41
8.3. NPV projektu	42
8.3.1. Stanovení výše diskontu	42
8.3.2. Výpočet NPV	42
9. Citlivostní analýza.....	43
9.1. Počet fotovoltaických panelů.....	43
9.2. Výchozí cena elektrické energie	44
9.3. Průměrný roční růst ceny elektrické energie	44
9.4. Změna cen dokupovaných komponent	45
9.5. Výše diskontu	46
10. Závěr.....	47
Seznam použité literatury	49
Seznam použitých zkratk.....	51
Seznam obrázků	52

Seznam grafů.....	52
Seznam tabulek	52
Příloha 1 – Internetové obchody s komponenty	54
Příloha 2 – Výpočet NPV	55

1. Úvod

S rostoucí vyspělostí civilizace roste také spotřeba elektrické energie. Stále více nových technologií potřebuje pro svou činnost právě elektřinu, zajištění její dostatečné výroby je tedy neustále aktuální otázkou. V poslední době se ale kromě objemu samotné produkce řeší dopady postupů, jakými se elektrická energie vyrábí. Důraz na snižování škodlivých emisí a na ekologické chování jako takové vede v současnosti ke změnám v odvětví energetiky a ke snaze o hledání ekologicky šetrnějších zdrojů.

Celosvětově se nejvýznamněji na produkci podílejí především uhelné, plynové, vodní a ropné elektrárny. V posledních desetiletích také významně roste podíl elektráren jaderných. Z těchto zmíněných mají přijatelné emise pouze elektrárny jaderné a vodní. Nejen tato skutečnost vede k hledání alternativ, a tedy i k rostoucí popularitě obnovitelných zdrojů, které představují ekologicky šetrný energetický zdroj. Množství energie vyrobené právě těmito zdroji v posledních deseti letech výrazně narostlo, především pak ve vyspělých zemích.

Mezi obnovitelné zdroje patří i sluneční energie. Právě tímto druhem se bude tato práce podrobněji zabývat. Energie ze Slunce ve formě záření je neustále a zdarma předávána na Zemi, proto je na místě hledat efektivní způsoby její přeměny na energii elektrickou. V současnosti se z mnoha různých důvodů stává z fotovoltaických elektráren zajímavá možnost, a to nejen z ekologického, ale v mnoha případech také z ekonomického hlediska. Pro uživatele navíc může toto řešení představovat zvýšení energetické soběstačnosti, přičemž není vyžadována přílišná údržba a instalace elektrárny není náročná. Trend rostoucích cen elektřiny navíc naznačuje, že finanční úspory by se do budoucna mohly ještě zvyšovat. Hlavním cílem této práce je tedy pro vybraný objekt navrhnout vhodnou konfiguraci fotovoltaické elektrárny a zjistit, zda je investice do takového projektu rentabilní.

V práci bude nejprve za účelem opodstatnění významu fotovoltaických zdrojů popsán dosavadní vývoj spotřeby a výroby elektrické energie v České republice a také jejich předpokládaný budoucí vývoj odpovídající současné snaze o ekologizaci. Detailněji zde bude popsán vývoj využívání obnovitelných zdrojů u nás, především pak sluneční energie. Následně budou identifikována dostupná technická řešení fotovoltaických elektráren, přičemž detailněji budou rozebrány především hybridní systémy. Uvedeny budou důležité komponenty, jejich typy a princip funkce.

Pro vybraný objekt se dále budu zabývat posouzením podmínek pro výstavbu hybridní elektrárny a také provedu analýzu potřeby energie. Na základě těchto dat následně vypracuji návrh vhodné konfigurace hybridní fotovoltaické elektrárny a analýzu energetických zisků. V závěrečné části se budu zabývat ekonomickým posouzením projektu včetně vypracování citlivostních analýz.

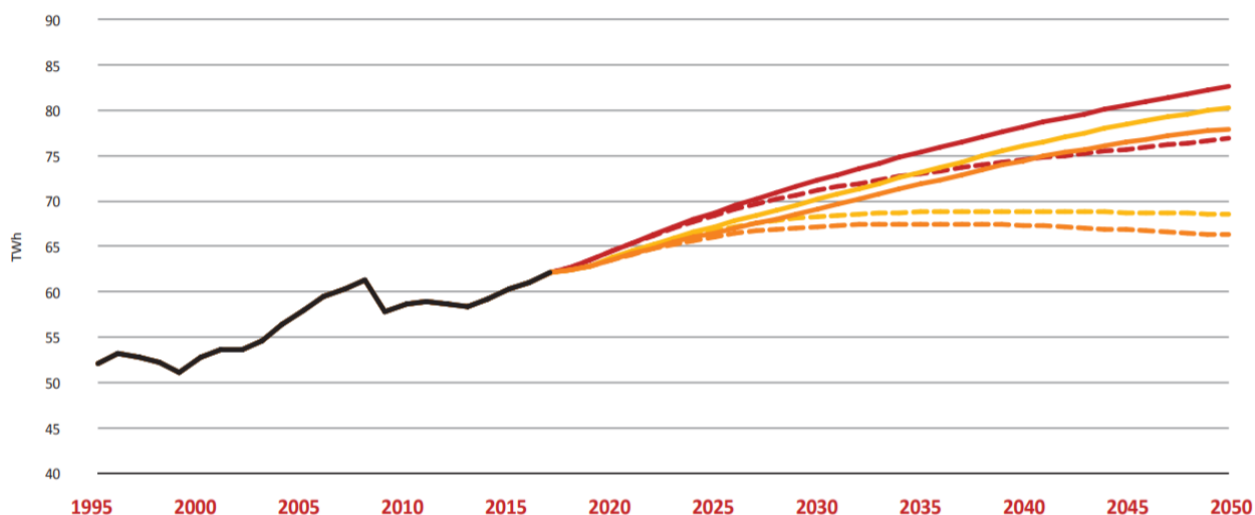
2. Význam solárních zdrojů v České republice

V České republice se v současnosti na výrobě elektrické energie podílí nejrůznější zdroje. Nejvyšší podíl stále mají uhelné elektrárny, přičemž jejich největší rozmach v tuzemsku zapříčinila tehdejší vysoká úroveň strojírenství a ocelářství. Další významný zdroj elektřiny v podobě jaderných elektráren se pak začal uplatňovat v 80. letech, kdy zahájila provoz první jaderná elektrárna na našem území – Dukovany. Hlavně tyto zdroje dlouhodobě zajišťují soběstačnost České republiky v pokrytí spotřeby elektrické energie [1; 2].

Negativní dopady spalování velkého množství fosilních paliv a snaha o ekologizaci však v poslední době vedou v oblasti elektroenergetiky k významným změnám. Dlouhodobá snaha o snižování podílu, kterým se na výrobě podílí uhelné elektrárny, v kombinaci s končící životností mnoha konvenčních zdrojů, vede k hledání nových způsobů zajištění adekvátní produkce elektřiny a je pravděpodobné, že v budoucnu dojde k zásadní přeměně struktury zdrojové základny ČR [3].

2.1. Vývoj spotřeby elektrické energie

Spotřeba elektrické energie v České republice se z dlouhodobého hlediska zvyšuje [4]. Jak lze vidět na obrázku 2.1, v posledních letech byla významně ovlivněna stavem ekonomiky, což se projevilo jejím prudkým poklesem v roce 2009, následným drobným nárůstem a stagnací mezi roky 2011 až 2014. V důsledku zlepšujícího ekonomického stavu státu od roku 2015 přetrvává pozvolný nárůst spotřeby [5; 3]. V roce 2018 dosáhla brutto spotřeba nejvyšší hodnoty od dob, kdy ji ERÚ začal uvádět ve svých ročních zprávách, konkrétně dosáhla hodnoty 73,9 TWh. [4].



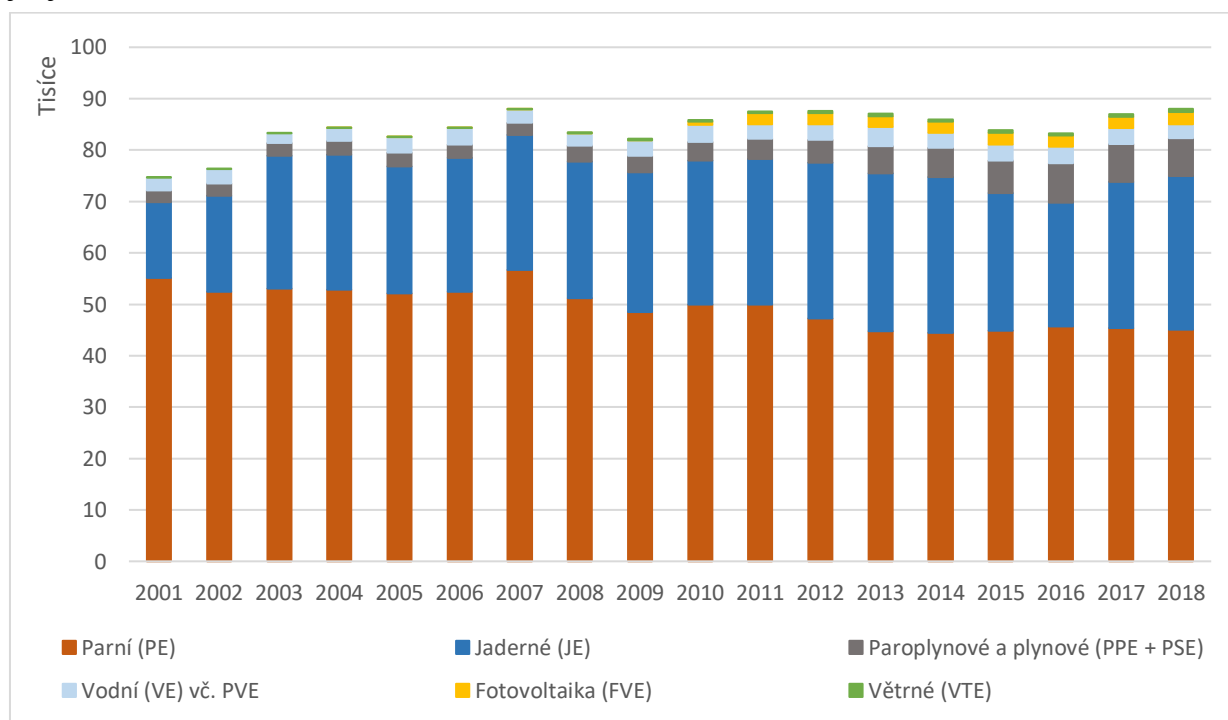
Obrázek 2.1 – Vývoj tuzemské netto spotřeby [3]

Co se týká předpokládaného vývoje do budoucna, tak ze zdrojů [2; 3] vyplývá, že spotřeba elektrické energie poroste i nadále. Na obrázku 2.1 je znázorněno několik možných scénářů budoucího vývoje, z nichž každý předpokládá různou úroveň dosahování úspor a různé využití energie v nových oblastech. Všechny tyto scénáře předpokládají nárůst netto spotřeby v ČR, a to i navzdory zvyšující se energetické účinnosti. Tento jev, kdy úspory energie vedou nakonec k nárůstu její celkové spotřeby, se nazývá Jevonsův paradox. Podle této teorie se s rostoucí účinností využívání energie zvyšuje i rychlost její spotřeby. Spotřebitelé tedy mají

tendenci využívat úsporné spotřebiče častěji a delší dobu, čímž dochází ke zvyšování konečné spotřeby elektřiny. Významným faktorem ovlivňujícím tyto scénáře je také předpokládaná míra využívání elektromobilů v ČR. Scénáře uvažující významný nárůst jejich množství jsou v obrázku 2.1 vyznačeny tučně, přičemž pravděpodobnost tohoto nárůstu se od minulého roku zvýšila [3; 6].

2.2. Vývoj výroby elektrické energie

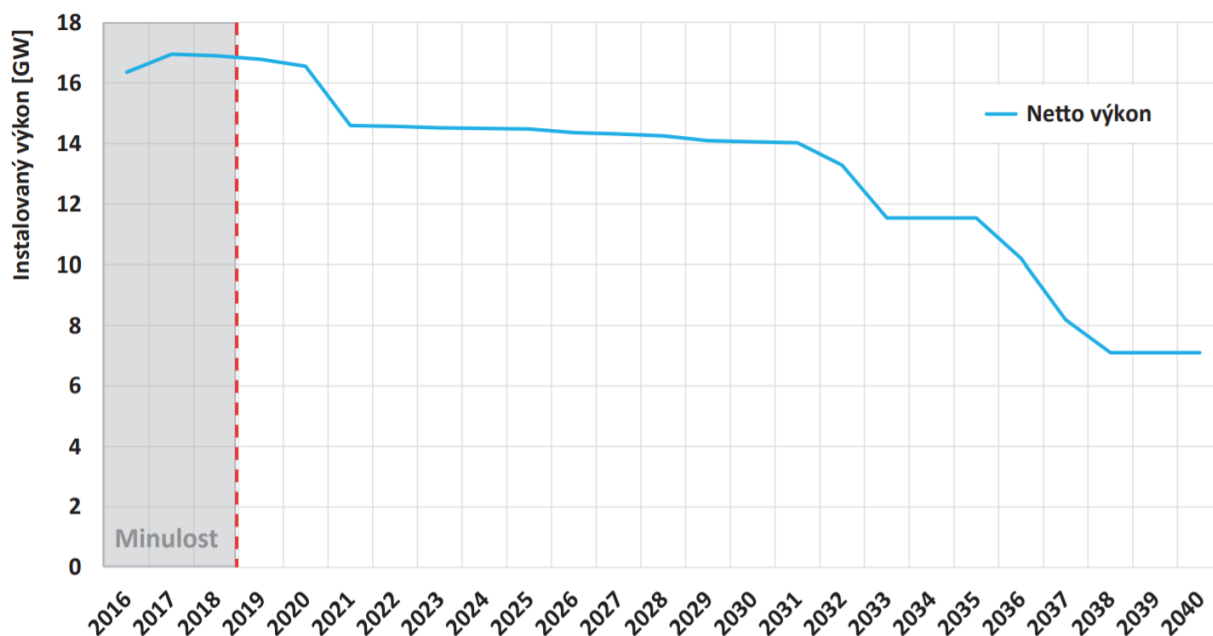
Ruku v ruce s rostoucí spotřebou v dlouhodobém měřítku roste i výroba elektrické energie. Jak už bylo zmíněno, v České republice se na výsledném energetickém mixu podílí různé zdroje, nicméně jak je patrné z obrázku 2.2, hlavní roli ve výrobě elektřiny brutto mají stále elektrárny hnědohelné. Je však zřejmé, že jaderné a plynové elektrárny spolu s obnovitelnými zdroji čím dál více zvyšují svůj podíl na úkor uhelných elektráren, které například ještě v roce 2001 měly podíl na výrobě brutto přes 70 %, přičemž v roce 2018 již jen 43 % [4].



Obrázek 2.2 – Vývoj výroby elektřiny brutto v ČR v GWh [4]

Co se týká predikcí velikosti výroby elektrické energie v budoucnu, tak dle informací dostupných z [2; 7] bude zásadně ovlivňována především postupným odstavováním stávajících tepelných, vodních a přečerpávacích vodních elektráren s instalovaným výkonem nad 10 MWe, jelikož v současnosti neprobíhá výstavba žádného takového nového zdroje.

Na obrázku 2.3 je znázorněn scénář vývoje instalovaného výkonu těchto zdrojů, který předpokládá minimální životnost jaderné elektrárny Dukovany (ukončení provozu v letech 2036–2037) a také významné odstavování uhelných elektráren, které bude zapříčiněné zejména rostoucí cenou emisních povolenek a environmentálními požadavky vyplývajícími z evropské legislativy [2; 7].



Obrázek 2.3 – Vývoj instalovaného výkonu ES ČR pro stávající zdroje nad 10 MWe, vyjma OZE [7]

V tomto období se tak předpokládají značné výkyvy ve výrobě způsobované právě odstavováním některých stávajících zdrojů. Je tedy zřejmé, že otázka zajištění adekvátní náhrady za dosluhující elektrárny je velmi aktuální. Dle různých možných scénářů je hned několik potenciálních zdrojů, na které by mohla ČR v budoucnosti spoléhat. Jednou z možností je obnova bloků v Dukovanech a rozšíření elektrárny Temelín. Například výstavba nového jaderného bloku v Dukovanech by měla být dle plánu dokončena v roce 2036, nicméně dle zdrojů [8; 9] je pravděpodobné, že tento termín nebude dodržen. Dle všech porovnávaných scénářů dojde také k nárůstu výkonu obnovitelných zdrojů, přičemž rozhodující úlohu by měly mít fotovoltaické zdroje. Uplatnění obnovitelných zdrojů si navíc vyžádá nasazení prostředků pro regulaci, zejména plynové spalovací jednotky. Významným nástrojem zabezpečení výkonové rovnováhy uplatněným ve všech porovnávaných scénářích by měly být akumuláční technologie, zejména baterie používané pro denní akumulaci [3]. Na obrázku 2.4 jsou vyobrazena data očekávaného vývoje a parametrů akumulace dle [7], přičemž uvažovány byly především velké baterie schopné dosahovat výkonů v řádu jednotek až desítek MW a baterie využívané s FVE.

	2020	2025	2030
Kapacita (MWh)	99	534	897
Vstupní/výstupní výkon (MW)	50	270	453
Účinnost cyklu (-)	0,85		

Obrázek 2.4 – Očekávaný vývoj a parametry akumulace [7]

Výsledná výkonová bilance ČR bude tedy v budoucnu závislá na rozsahu nahrazování stávajících konvenčních elektráren novými zdroji. Dle prognóz by se především při nedodržení termínů uvedení nových jaderných bloků do provozu Česká republika stala dovozcem elektrické energie [2; 3].

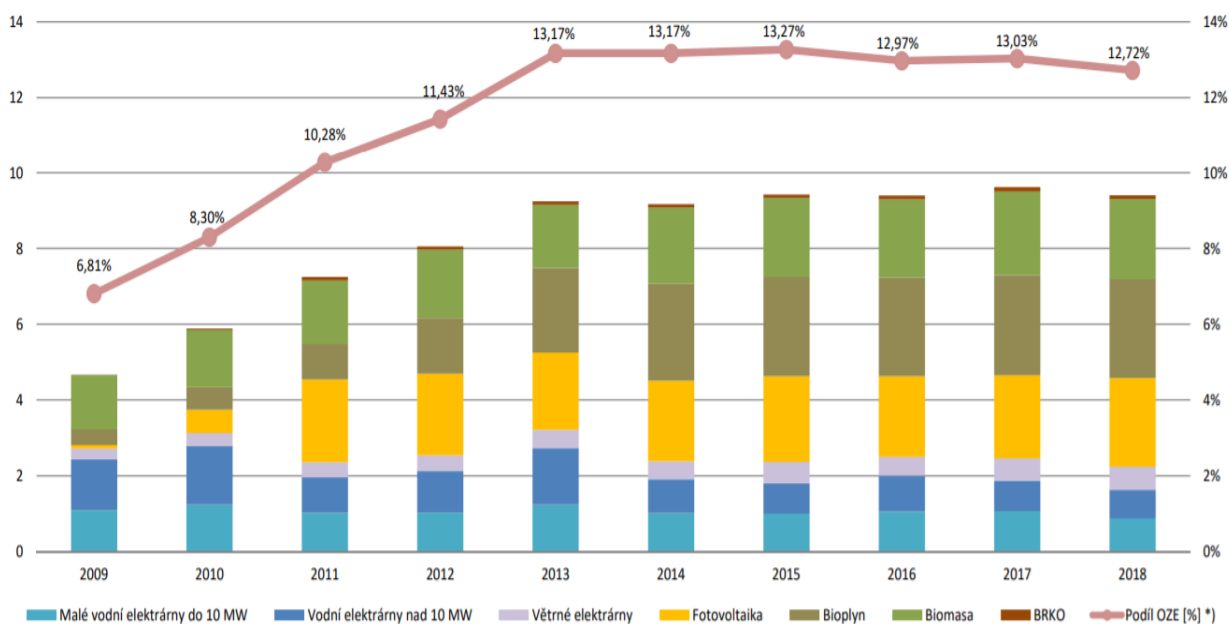
Ze všech těchto skutečností vyplývá, že OZE v budoucnu budou stále důležitější a rostoucí složkou energetického mixu ČR a snaha o využití jejich potenciálu je opodstatněná. V následující kapitole tedy budou popsány detailněji.

2.3. Obnovitelné zdroje energie v České republice

Jak vyplývá z informací uvedených v předešlých podkapitolách, dochází v současnosti v odvětví energetiky k významným změnám. Ve snaze o ekologický přístup je jedním ze základních předpokladů snižování produkce skleníkových plynů, tedy odstavování zdrojů elektrické energie produkujících tyto plyny a zároveň i hledání takových, které je naopak neprodukují. Mezi ně patří právě i obnovitelné zdroje, kterými jsou sluneční, větrná, vodní a geotermální energie. Dále také biomasa a energie přílivu. Celkový potenciál těchto zdrojů je velmi vysoký, nicméně v současné době není možné ho využít ve větší míře, obvykle zejména kvůli špatné ekonomické rentabilitě [10].

2.3.1. Dosavadní vývoj

Z obrázku 2.5 je patrné, že celková výroba elektřiny brutto z OZE rostla až do roku 2013. Od tohoto roku kolísá přibližně okolo hodnoty 9,5 TWh za rok. Stejný trend platí i pro podíl, kterým se OZE podílí na tuzemské spotřebě. Ten se konkrétně v posledních třech letech pohybuje těsně okolo hodnoty 13 %. Obnovitelné zdroje se v České republice v roce 2018 podílely na celkové výrobě elektřiny brutto z 11 % a na tuzemské brutto spotřebě z 12,72 %. Pokud to srovnáme například s hodnotou 8,3 % z roku 2010, vidíme, že došlo k nárůstu o necelá 4,5 % [4].

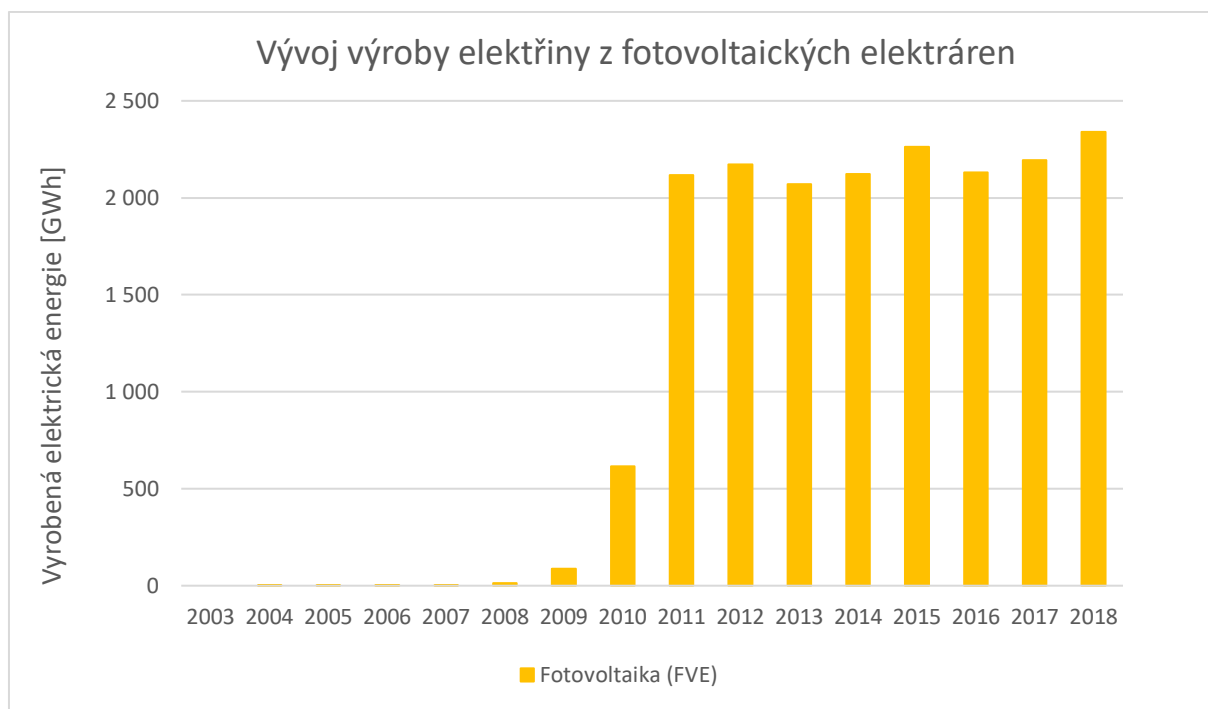


Obrázek 2.5 – Vývoj výroby elektřiny brutto z OZE a její podíl na tuzemské brutto spotřebě (TWh) [4]

Pokud se zaměříme na dosavadní vývoj výroby elektřiny fotovoltaickými elektrárnami na území ČR, kterými se tato práce zabývá detailněji, uvidíme na obrázku 2.6 veliký nárůst vyrobené elektřiny v letech 2009 a 2010. V těchto letech proběhl takzvaný solární boom, který byl zapříčiněn zejména nevhodným dotačním systémem v kombinaci s výrazným poklesem ceny komponent solárních elektráren. Důsledkem byly vysoké výkupní ceny elektrické energie z FVE.

Tento rychlý nárůst měl negativní dopad na cenu elektřiny pro spotřebitele, která rostla kvůli zvyšujícímu se příspěvku na podporu OZE. V důsledku toho byl v roce 2013 tento systém

podpory zrušen. Z obrázku 2.6, který znázorňuje vývoj výroby elektřiny z FVE, vyplývá, že v dalších letech se již instalovaný výkon FVE výrazně nemění [11].



Obrázek 2.6 – Vývoj výroby elektřiny z fotovoltaických elektráren [4]

V současné době jsou při svém instalovaném výkonu FVE na našem území schopné při vhodných podmínkách od jara do podzimu pokrýt značnou část denní špičkové spotřeby. To je dáno zejména různorodým umístěním elektráren, které zajistí rozložení maxima výkonu v čase [12].

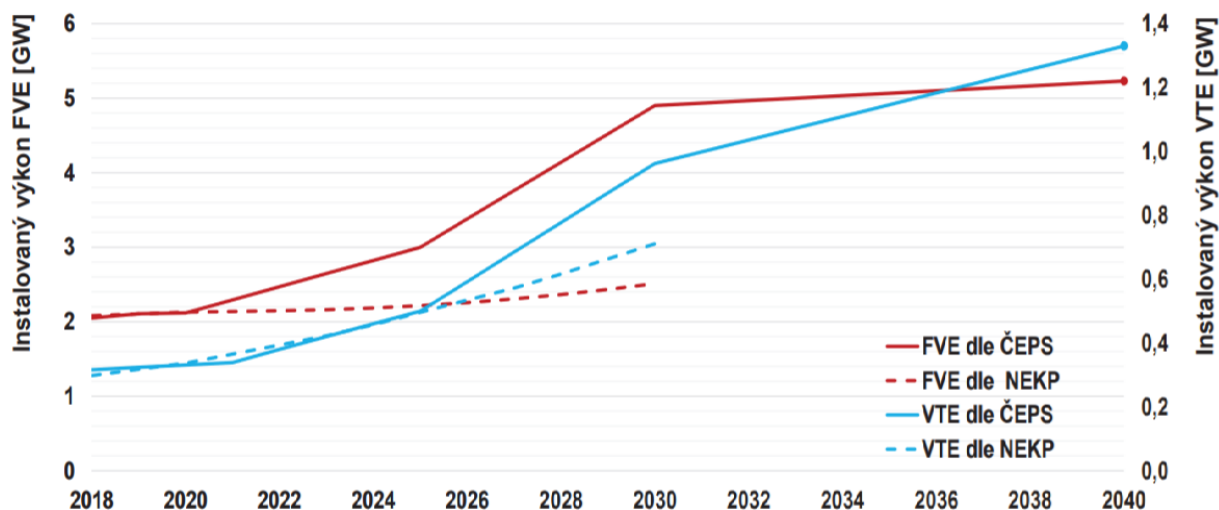
2.3.2. Budoucnost obnovitelných zdrojů

Jak vyplývá z předchozích kapitol, snižování podílu, kterým se na výrobě elektřiny podílí neekologické zdroje, bude v ČR pokračovat i nadále. Česká republika si v rámci Národního klimaticko-energetického plánu stanovila cíl pro podíl obnovitelných zdrojů na konečné spotřebě energie ve výši 20,8 % do roku 2030, přičemž v oblasti elektroenergetiky je plánovaný nárůst nejmenší, konkrétně necelých 10 % oproti roku 2016 [13]. Je tedy zřejmé, že podíl, kterým se na výrobě elektřiny podílí OZE, bude do budoucna narůstat. I přes tento předpoklad se však očekává, že pro následující dvě až tři dekády budou stále zastávat spíše doplňující roli, přičemž se počítá s koncepcí OZE jakožto rozptýleného zdroje elektrické energie [2]. Mezi hlavní cíle státu v oblasti OZE patří zejména zajištění vhodného systému podpory v souladu s ekonomickými možnostmi ČR, využití potenciálu biomasy, větrné a sluneční energie. Dále pak také připravení distribučních soustav na připojení elektráren využívajících obnovitelné zdroje, zjednodušení administrativních procesů a v neposlední řadě zajištění začlenění OZE do mechanismů řízení rovnováhy energetické soustavy [2; 3].

Snaha o zvyšování podílu elektřiny vyrobené z obnovitelných zdrojů ale v České republice naráží na několik problémů. Potenciál vodních elektráren na našem území je v současné době téměř vyčerpán, tudíž podíl, kterým tyto elektrárny přispívají, již nebude výrazně narůstat. Omezený počet vhodných oblastí zase limituje značnější rozvoj větrných elektráren.

Biomasa, jejíž podíl na celkové výrobě brutto byl v minulém roce 2 % a u které se předpokládá zvyšování podílu, bude od určité úrovně limitovaná požadavky ochrany životního prostředí a nutností zachování potravinové bezpečnosti. Všechny tyto zdroje tak mají poměrně omezený potenciál [2; 4].

Fotovoltaika se oproti tomu zdá do budoucna vhodná především jako decentralizovaný zdroj, zejména pro instalace na střechy objektů [14]. Dle výzkumů je celkový potenciál střech bytových a rodinných domů 4,5 GWp, u ostatních budov až 7,3 GWp. Reálný potenciál střešních instalací je sice nižší, ale jsou zde i jiné vhodné plochy pro instalaci FVE, jako například brownfieldy, kontaminované či jinak znehodnocené plochy, parkoviště a skládky [12]. Míra využití sluneční energie by měla do budoucna růst také díky stále se zvyšující účinnosti technologií pro výrobu elektřiny ze slunečního záření [2]. Obecně se počítá především s FVE malých výkonů v kombinaci s akumulací, které zvyšují míru využitelnosti fotovoltaických zdrojů a jsou klíčové pro regulaci sítě při vysokém podílu FVE [14; 3]. Jak je vidět na obrázku 2.7, množství celkové elektrické energie vyrobené právě fotovoltaickými elektrárnami by se dle predikcí uvedených v [7] mělo výrazně navýšit. Křivky FVE a VTE dle návrhu Národního energeticko-klimatického plánu představují minimální požadovanou hodnotu instalovaného výkonu ze strany členského státu Evropské unie tak, aby byl splněn procentní podíl vyrobené energie z obnovitelných zdrojů na celkové konečné tuzemské hrubé spotřebě energie, čímž by mělo dojít ke splnění mezinárodních klimatických závazků ze strany ČR [7].



Obrázek 2.7 – Grafické znázornění vývoje predikce FVE a VTE do roku 2040 [7]

Všechny tyto skutečnosti vedou k závěru, že význam fotovoltaických zdrojů by měl do budoucna narůstat a je tedy namístě se o tyto zdroje více zajímat. V dalších kapitolách budou tedy popsána jednotlivá technická řešení FVE, především pak hybridní fotovoltaická elektrárna. Budou pospány komponenty, z kterých se HFVE skládá, a parametry, které jsou určující při návrhu její nejvhodnější konfigurace.

3. Technická řešení FVE

Na základě výchozích požadavků lze v dnešní době vytvořit celou řadu technických řešení FVE. Ty se navzájem liší jak oblastí využití, tak i celkovou technickou náročností. Funkce výsledného systému a jeho technické parametry se odvíjí od toho, z jakých komponent se skládá. V závislosti na tom lze vytvořit například jednoduchou sestavu na ohřev TUV, ale i složitější systémy připojené k distribuční síti a využívající bateriová úložiště. Dostupná technická řešení FVE pak lze dělit do tří základních kategorií, které budou uvedeny a stručně popsány v následujícím textu. Detailněji budou rozvedeny především hybridní systémy.

3.1. Off-grid systémy

Takzvané off-grid fotovoltaické elektrárny jsou typické tím, že nejsou připojeny k distribuční síti. Z toho vyplývá, že jejich hlavním smyslem je poskytnout elektrickou energii v místech, kde není dostupný jiný vhodnější zdroj elektřiny (nebo v případech, kdy je z nějakého důvodu žádoucí zajistit nezávislost na jiném zdroji). U těchto systémů se vyrobená elektřina buď spotřebuje v reálném čase, nebo se ukládá do bateriového úložiště a dále je spotřebována dle potřeby [15].

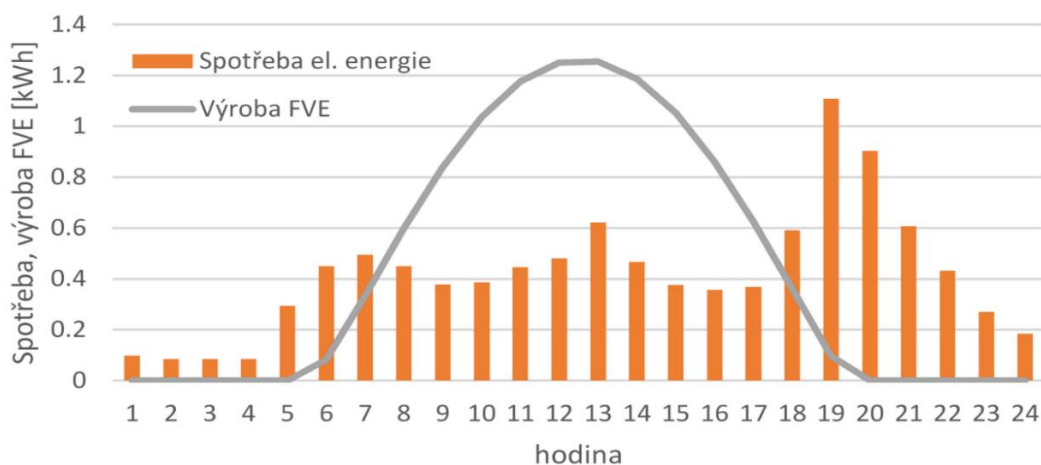
3.2. Grid-tie systémy

Pro grid-tie elektrárny je naopak typické, že jsou připojené k distribuční síti. Vyrobená elektřina je v reálném čase spotřebována v místě výroby a v případě přebytku je energie prodávána do sítě [15].

3.3. Hybridní systémy

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 2.3.2, fotovoltaika se do budoucna zdá vhodná především pro instalace na střechy různých objektů a v kombinaci s akumulací prvků [14]. Pokud je běžná FVE připojená k síti zkombinována s bateriovým úložištěm a disponuje hybridním měničem, mluvíme o hybridní fotovoltaické elektrárně [16].

Důvody pro instalaci takového systému jsou zřejmé. Jak je vidět na obrázku 3.1, diagram výroby FVE v průběhu dne se neshoduje s modelovým diagramem denní spotřeby v domácnosti. Vzhledem k nízkým výkupním cenám elektrické energie je v současnosti kladen čím dál větší důraz na zvyšování spotřeby vyrobené energie přímo v daném objektu. Případné přebytky vyrobené elektřiny lze tedy ukládat do baterií a spotřebovat v jiném čase [16; 17].



Obrázek 3.1 – Příklad denního profilu výroby FVE a spotřeby domácnosti [17]

Toto spojení má řadu výhod, ale i nevýhod. Mezi výhody patří zejména maximalizace spotřeby vyrobené elektřiny v místě výroby, nebo také možnost krátkodobého provozu v ostrovním režimu a z toho plynoucí energetická soběstačnost při výpadku dodávky. Mezi hlavní zápory patří v současnosti zejména vysoká pořizovací cena baterií, a tím daná zhoršená návratnost instalace. Další nevýhodou je i zvýšení složitosti celého systému.

Jelikož jsou hybridní systémy v současnosti stále běžnější, a navíc jsou v podstatě spojením zbylých dvou kategorií uvedených v předešlém textu, budou v následující kapitole popsány klíčové komponenty HFVE, jejich důležité technické parametry a funkce. Kapitola 4 tedy patří k části práce, která se zabývá identifikací dostupných technických řešení FVE, a je oddělena pouze pro lepší přehlednost textu.

4. Komponenty hybridní fotovoltaické elektrárny

HFVE se skládá z několika částí. Těmi nejdůležitějšími pro funkci celku jsou fotovoltaické panely, hybridní měnič napětí a bateriové úložiště (případně i další akumulární prvky). Všechny tyto komponenty, jejich nejdůležitější technické parametry a princip jejich funkce budou dále důkladněji popsány [16]. Dalšími částmi jsou nosná konstrukce, propojovací vodiče, řídicí a regulační elektronika a různé ochranné prvky [18]. Volbou různých kombinací a různých dimenzí uvedených komponent, spolu s volbou o připojení k síti, lze vytvořit systémy různých technických parametrů z jakékoli kategorie uvedené v kapitole 3. Odlišná je pro každou kategorii pouze funkce měniče, a tak rozdíly v jejich funkci budou v této kapitole také uvedeny.

4.1. Fotovoltaické panely

Fotovoltaické panely, které po propojení vytváří takzvané pole, jsou nezbytnou součástí každé FVE. Samotný panel je tvořen propojením určitého množství fotovoltaických článků, které zajišťují přeměnu dopadajícího záření ze Slunce na elektrickou energii. V současné době jsou používané převážně panely s články z krystalického křemíku, které jsou i nejlépe dostupné na trhu. Z tohoto důvodu bude dále rozebírán převážně tento typ, ale pro srovnání budou popsány také panely tenkovrstvé [19; 20].

4.1.1. Princip funkce

Princip funkce bude vysvětlen na panelech z krystalického křemíku, kde je samotná přeměna energie dopadajícího záření na elektrickou energii založena na fotovoltaickém jevu. Jednotlivé články jsou vlastně velkoplošné ploché křemíkové fotodiody. Fotony slunečního záření dopadající na článek, pokud mají dostatečnou energii, vyrazí z krystalické mřížky elektrony, které následně emitují a stávají se volnými. Na P-N přechodu se tak vytvoří napětí, přičemž každý článek je schopen generovat stejnosměrné napětí o hodnotě přibližně 0,5 V. Zvýšení výstupního napětí a proudu lze dosáhnout sériovým a paralelním propojováním více článků, čímž vzniká panel, který má nominální napětí nejčastěji 24 V, nebo 48 V. Pomocí elektrod lze elektrický proud z článků odvádět do připojeného vnějšího obvodu. Pokud vynásobíme napětí a proud, dostaneme výkon panelu. Velikost proudu je přímo úměrná intenzitě dopadajícího záření, vliv na účinnost přeměny má také orientace panelů a jejich sklon, přičemž v ČR je nevhodnější orientace k jihu a sklon okolo 35° [19; 20].

4.1.2. Technické parametry panelů

- **Instalovaný výkon**

Hlavním parametrem při výběru panelu je jeho instalovaný výkon, který udává maximální hodnotu výkonu za ideálních podmínek (světelné záření směřující kolmo na panel, ideální teplota, panel bez nečistot, definovaná výkonová hustota záření a podobně). Pro názornou ukázkou závislosti výkonu na hodných podmínkách je vhodné uvést, že při zatažené obloze může výkon poklesnout na 10 % udávaného maximálního výkonu. Jednotkou této veličiny je watt-peak [18].

4.1.3. Typy panelů

V současné době nejvyužívanějšími jsou panely monokrystalické, polykrystalické a tenkovrstvé. Tyto typy se navzájem liší postupem výroby, výkonem, vzhledem, cenou, a tedy i tím, pro jaké instalace jsou vhodné. Každý typ má své výhody a nevýhody, které je nutné zvážit pro konkrétní případ využití [21].

- **Monokrystalické panely**

Tyto panely jsou tvořeny propojením článků, které mají křemíkovou destičku vyříznutou z jednoho čistého krystalu vyrobeného takzvanou Czochralského metodou, tedy řízenou krystalizací při tažení z taveniny [18].

Mezi hlavní výhody monokrystalických panelů patří zejména vysoká účinnost, která se již v současné době může pohybovat okolo 20 %, ale je více závislá na ideálních světelných podmínkách. Hlavní nevýhodou je především vyšší pořizovací cena, která se však v současnosti stále snižuje [21].

- **Polykrystalické panely**

Tento typ je tvořen propojením článků z polykrystalického křemíku, který se vyrábí chemickými metodami, například Siemensovou metodou. Články jsou složeny z fragmentů křemíkových krystalů, které jsou roztaveny ve formě a následně rozřezány na destičky [21].

Polykrystalické panely mají nižší pořizovací cenu, ale také nižší účinnost, která se pohybuje okolo 15–17 %. Oproti monokrystalickým panelům by měly dosahovat vyšší účinnosti přeměny energie i v nepříznivých světelných podmínkách, měly by tedy být vhodnější pro instalace v místech s proměnnou mírou osvětlení [18; 21].

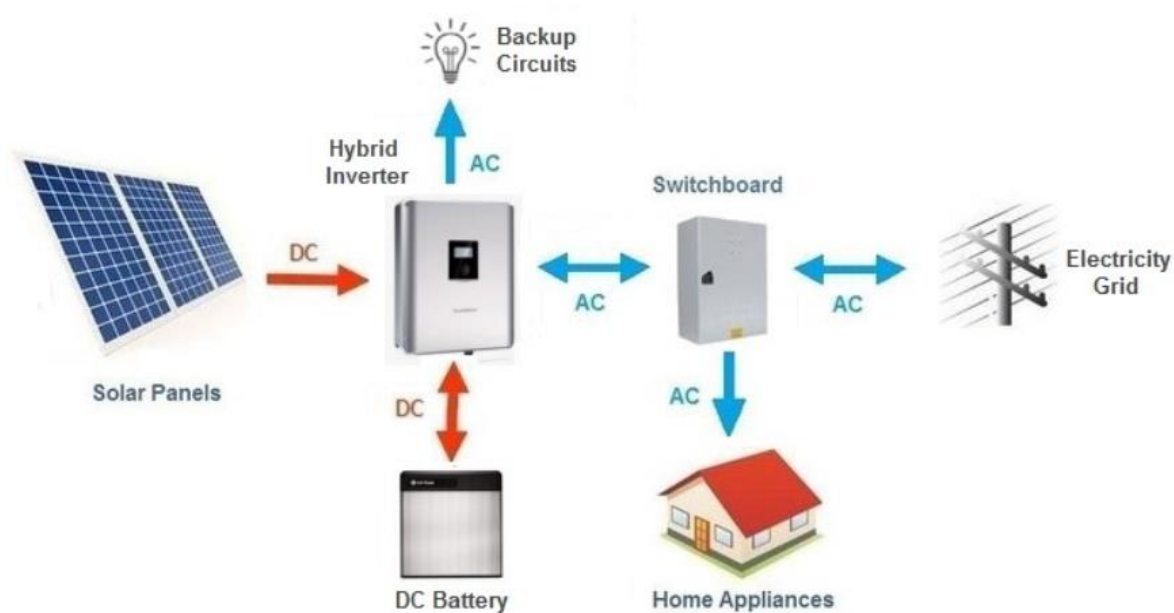
- **Tenkovrstvé panely**

Tenkovrstvé panely jsou oproti předchozím dvěma typům vyráběny z různých materiálů, například z amorfního křemíku, teluridu kadmia, či CIGS (Copper, Indium, Gallium, Selenide).

Všechny zmíněné druhy mají ve srovnání s panely z krystalického křemíku nižší účinnost, která se liší v závislosti na použitém materiálu a pohybuje přibližně okolo 11 %. Cena se také liší dle použitého materiálu, například panely z CIGS jsou z výše uvedených výrazně nejdražší. Výhodou může být menší náročnost montáže nebo také nízká hmotnost a z ní plynoucí možnost využití na střechách, které nemají dostatečně vysokou nosnost pro použití tradičních panelů [21].

4.2. Hybridní měnič

Hybridní měnič je nepostradatelnou součástí každé HFVE a jeho vhodným výběrem lze zásadně ovlivnit efektivitu celého systému. Obecně je funkcí měniče pro FVE měnit stejnosměrné napětí na střídavé. Hybridní měnič se ale od běžných střídačů, které se využívají v off-grid a grid-tie systémech, liší hned několika faktory, především pak schopností synchronizace procesu výroby a spotřeby elektrické energie. Dle požadavků je schopen řídit všechny toky energie v objektu najednou a umožňuje spotřebu energie v reálném čase přímo z panelů, ale i z baterií a sítě. Ukládání do bateriového úložiště probíhá pouze v případě přebytků vyrobené energie. Schématické zobrazení systému s hybridním měničem a možné toky energie jsou vyobrazeny na následujícím obrázku 4.1. Z výše uvedeného lze vyvodit rozdíl mezi hybridním měničem a těmi pro grid-tie a grid-off systémy. Ty jsou zpravidla schopny pouze přeměny stejnosměrného napětí na střídavé (přímo z pole panelů v případě grid-tie systémů, nebo v případě off-grid systémů z baterií, které jsou nabíjeny elektrinou z panelů přes regulátor) a řízení toku energie pouze v jednom směru [16; 23].



Obrázek 4.1 – Schématické zobrazení HFVE [22]

V dnešní době jsou hybridní měniče již velmi inteligentní a nabízejí rozsáhlé možnosti nastavení a řízení [16; 23]. Moderní hybridní měniče již v sobě navíc mají zabudované regulátory nabíjení, nejčastěji MPP trackery, které regulují napětí na výstupu, jež kolísá v důsledku proměnné výroby FVE. Z toho vyplývá, že jsou přímo uzpůsobené pro kombinaci s bateriovým úložištěm [18].

4.2.1. Technické parametry hybridních měničů

Měniče mají samozřejmě celou řadu technických parametrů, nicméně zde budou uvedeny pouze ty, které jsou absolutně zásadní pro správnou funkci výsledného systému.

- **Výstupní výkon měniče**

Výstupní výkon měniče udává, kolik energie je měnič poskytnout za jednotku času. Udává se nejčastěji ve wattech. Pokud je výkon nedostatečný, není měnič schopný pokrýt spotřebu v okamžitém čase a elektrina bude muset být dokupována ze sítě. Je tedy zřejmé, že výběr měniče s odpovídajícím výstupním výkonem je klíčový [23].

- **Výkon na jedné fázi (platí pouze pro třífázové měniče)**

Stejně jako v předchozím bodě jde o množství energie, které je schopný měnič dodat za jednotku času, nicméně v tomto případě pouze na jednu fázi. I relativně výkonné měniče s celkovým výkonem nad 5 kW jsou na jednu fázi schopny poskytnout například pouze 2 kW.

Z toho vyplývá, že při využívání více spotřebičů na jedné fázi naráz nemusí výkon dostačovat a zbylou energii je nutné dokupovat. Toto bývá pro mnoho investorů skrytým úskalím značného počtu systémů nabízených na trhu [23].

- **Účinnost**

Z fyzikální podstaty vyplývá, že účinnost jakékoli přeměny energie je vždy menší než 100 %. Tuto přeměnu vždy doprovází ztráty. Účinnost vyjadřuje podíl výstupní energie ku energii vstupní. Udává se v procentech a je klíčovým ukazatelem efektivitu zařízení [23]

4.2.2. Typy hybridních měničů

- **Jednofázové hybridní měniče**

Prvním typem jsou jednofázové hybridní měniče, které jsou vhodné zejména pro využití v objektech, kde je spotřeba soustředěna na jedné fázi. Je také vhodné uvést, že existuje omezení výkonu jednofázové elektrárny, kterou lze připojit na síť. Toto omezení se liší u různých distribučních společností a pohybuje se zhruba okolo 4 kW [23].

- **Třífázové hybridní měniče**

Druhým typem jsou třífázové hybridní měniče, které se dále dělí na symetrické a asymetrické. Symetrický měnič rozděluje výkon rovnoměrně do všech tří fází bez ohledu na to, na jakých fázích je v dané době soustředěn odběr, zatímco asymetrický je schopen regulovat dodávku do jednotlivých fází na základě reálné momentální spotřeby. Tím se maximalizuje využití vyrobené elektřiny přímo v daném místě a předejde se tak nechtěnému prodávání elektřiny do sítě [23].

4.3. Bateriové úložiště

Bateriové úložiště instalované spolu s FVE slouží především k ukládání přebytečné vyrobené elektrické energie, která se v reálném čase nespotřebovala. Využití baterií může uživatelům přinést řadu výhod, nicméně zejména kvůli vysokým pořizovacím nákladům není jejich využití vhodné pro všechny instalace. Při posuzování přínosu jejich zařazení do systému je nutné porovnat také technické parametry jednotlivých druhů. Nejdůležitějšími kritérii při výběru jsou kapacita a výkon baterie, hustota energie, maximální hloubka vybití (DOD), účinnost nabíjecího/vybíjecího cyklu, životnost a také kvalita garantovaná výběrem spolehlivého výrobce a potvrzena zárukou [24; 25]. Jelikož jsou tyto parametry určující pro správnou funkci celého systému HFVE, budou v podkapitole 4.3.1 blíže popsány.

4.3.1. Technické parametry baterií

- **Kapacita, výkon a hustota energie**

Kapacita baterie udává množství elektrické energie, které je možno do baterie uložit. Uvádí se většinou v kilowatthodinách a je určujícím parametrem při navrhování správné konfigurace celého systému elektrárny, jelikož příliš malá kapacita by nemusela dostačovat nárokům při konkrétní aplikaci a zbytečně vysoká kapacita naopak znamená bezúčelné zvýšení

vstupních investic. Většina bateriových úložišť využívajících se v kombinaci s FVE se skládá z více propojených bateriových modulů, přičemž připojováním dalších takových modulů se dá kapacita celého úložiště navyšovat. Hustota energie pak udává podíl kapacity a hmotnosti úložiště.

Výkon na druhou stranu udává, kolik elektrické energie je schopna baterie poskytnout za jednotku času. Uvádí se většinou v kW a podobně jako u kapacity je potřeba navrhnout bateriové úložiště tak, aby bylo schopno poskytovat výkon odpovídající okamžité spotřebě v daném objektu [24].

- **Maximální hloubka vybití (DOD)**

Tento parametr vychází ze skutečnosti, že u většiny baterií je žádoucí při vybíjení zachovat určitý náboj. Pokud budeme baterii zcela vybíjet, výrazně se tím sníží její životnost a dojde k znehodnocení vstupní investice.

Hloubka vybití se vztahuje ke kapacitě dané baterie. Pokud má například baterie kapacitu 10 kWh a výrobce uvádí DOD 90 %, není žádoucí využít po plném nabití více jak 9 kWh. Čím vyšší má baterie DOD, tím více je možné využít z celkové kapacity baterie [24].

- **Účinnost nabíjecího/vybíjecího cyklu**

Účinnost nabíjecího/vybíjecího cyklu je poměr elektrické energie, kterou můžeme při vybíjení baterie získat, ku energii potřebné pro její nabití. Uvádá se v procentech a čím je vyšší, tím více se celý proces nabíjení vyplatí [24].

- **Životnost**

U většiny aplikací HFVE dochází k nabíjení i vybíjení denně. S mírou využívání baterie v čase klesá postupně i její kapacita. Životnost baterií se tedy uvádí v počtu nabíjecích cyklů, nebo v letech, přičemž výrobce garantuje určitou hodnotu kapacity, kterou si i po tomto množství cyklů, či let využívání, baterie udrží [24].

4.3.2. Typy baterií pro fotovoltaické systémy

- **Olověné akumulátory**

Olověné akumulátory se pro ukládání energie používají celá desetiletí. Jsou typické relativně krátkou životností a také nižším DOD v porovnání s lithiovými bateriemi. Jsou ale také jednou z nejméně nákladných možností pro skladování elektrické energie vyrobené FVE. Zejména proto jsou tyto akumulátory vhodné pro aplikace vyžadující instalaci větší kapacity při zachování nižších investičních nákladů [24].

- **Lithium-iontové akumulátory**

Většina nově vznikajících instalací HFVE využívá k ukládání energie lithiové akumulátory. Tyto akumulátory disponují oproti olověným vyšší hustotou energie. Mají také vyšší DOD a delší životnost, nicméně jsou oproti těm olověným dražší.

5. Popis vybraného objektu

V následující kapitole bude popsán vybraný objekt, jeho konstrukční parametry, podmínky dané umístěním a další faktory, které významně ovlivňují funkci celé elektrárny. Následně bude provedena analýza spotřeby energií v objektu a uvedeny denní a roční diagramy spotřeby elektrické energie. Na základě těchto poznatků bude dále možné provést návrh konkrétních konfigurací elektrárny.

5.1. Konstrukční parametry

Pro účely navrhování konkrétní konfigurace HFVE jsem vybral rodinný dům s dvěma nadzemními podlažními. Tento dům je rohový, částečně podsklepený a jednu stěnu sdílí se sousedním domem. Co se tvaru střechy týká, jde o atypický tvar, který nejvíce připomíná valbovou střechu, přičemž střešní krytinou jsou betonové tašky. U tohoto typu střech ve většině případů nebývá problém s ukotvením panelů ani s nedostatkem nosnosti.



Obrázek 5.1 – Snímek strany domu orientované na jihozápad

Na obrázku 5.1 lze vidět názorný snímek jedné ze stran domu, konkrétně strany nejvíce orientované k jihu, která je pro usazení fotovoltaických panelů nejvhodnější. Sklon střechy na této straně je 35°.

Celková plocha této části střechy je přibližně 52,2 m², nicméně zejména kvůli dvěma střešním oknům a jedné zešikmené hraně není možno tuto plochu zcela využít. Při velikosti konvenčního panelu 1,65 m x 1 m, a alespoň základním respektování estetické stránky jejich umístění, jsem stanovil maximální možný počet panelů na 18.

V okolí domu se nenachází žádný objekt, který by ve větší míře zabraňoval dopadu slunečního záření na instalované panely. Jedinou překážkou je lehce zvýšená zeď sousedního domu, která by mohla v ranních hodinách částečně zastínit panely umístěné blízko ní, přičemž větší část dne by neměla výrazněji zastiňovat žádný z panelů.

5.2. Zeměpisné faktory

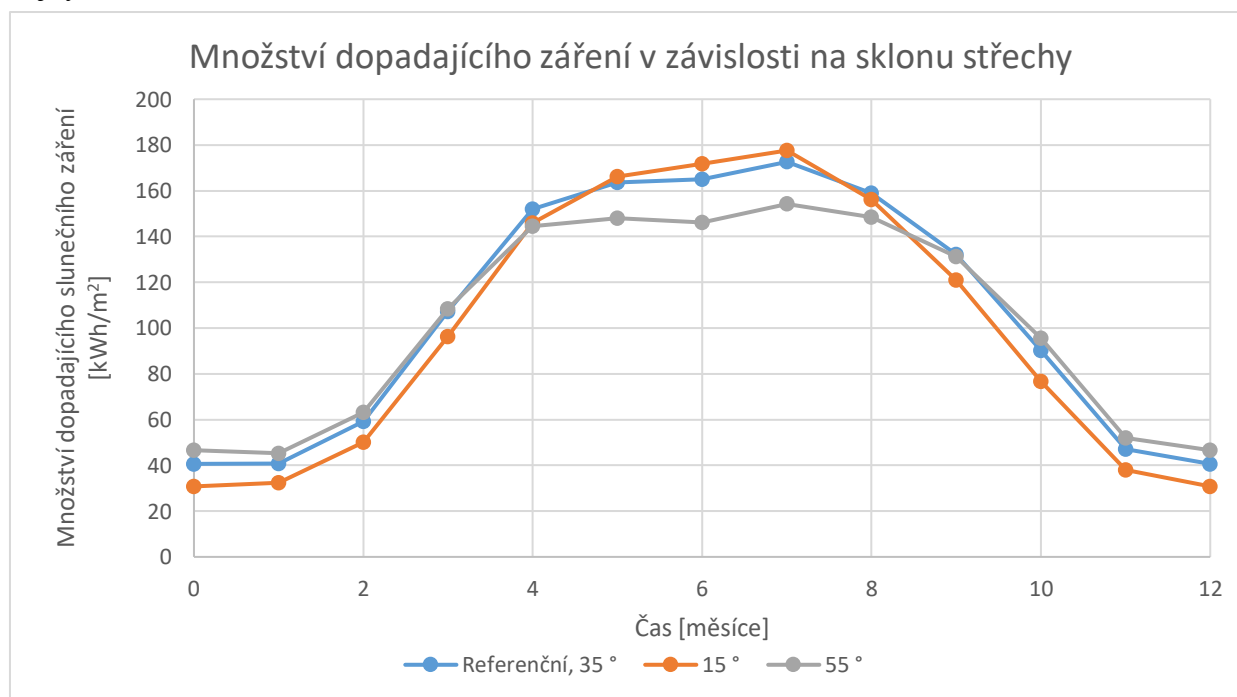
Dům se nachází v Pardubicích. Konkrétní souřadnice jsou 50.0192900N, 15.7684925E. Následující tabulka uvádí průměrné doby slunečního svitu v této oblasti dle [26].

Měsíc	Hodiny
Leden	36
Únor	60
Březen	122
Duben	158
Květen	220
Červen	210
Červenec	181
Srpen	209
Září	154
Říjen	108
Listopad	52
Prosinec	39
CELKEM	1 549

Tabulka 5.1 – Tabulka průměrných dob slunečního svitu v Pardubicích [26]

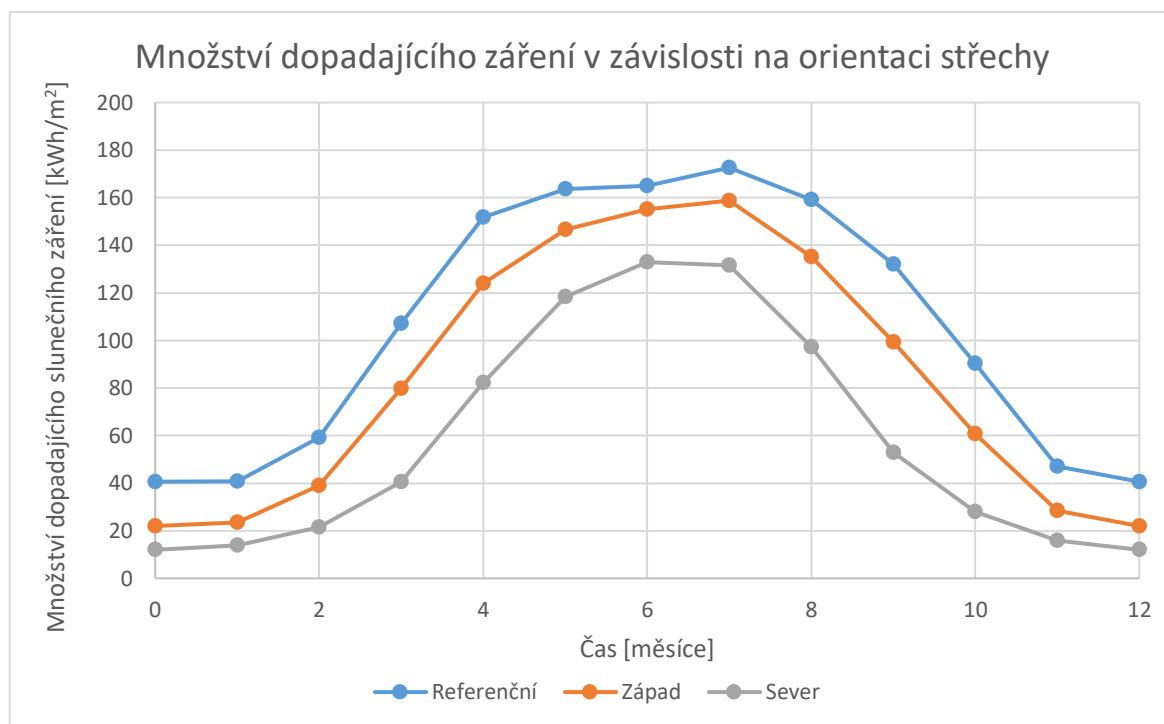
Uvažovaná část střechy vhodná pro instalaci panelů je orientovaná na jihozápad, konkrétně je odkloněna od jihu o 15° . Jak již bylo zmíněno v podkapitole 4.1.1, intenzita dopadajícího záření v místě instalace spolu s orientací a sklonem panelů jsou zásadními faktory ovlivňujícími optimální výkonnost elektrárny. V tomto případě budou panely umístěny souběžně s uvažovanou částí střechy.

Vliv sklonu je patrný z grafu 5.1, v němž vidíme porovnání referenčního sklonu střechy námi vybraného domu (35°) se střechami se sklonem 15° a 55° ve stejném místě dle dat dostupných z [27]. Celkové množství dopadajícího slunečního záření je pro referenční sklon nejvyšší.



Graf 5.1 – Množství dopadajícího slunečního záření v závislosti na sklonu střechy

Vliv orientace je naopak patrný z grafu 5.2, který znázorňuje množství dopadajícího slunečního záření pro různé orientace střechy při jejím sklonu 35° ve stejném místě dle dat dostupných z [27]. V grafu vidíme, že referenční orientace střechy (odklon od jihu o 15° na jihozápad) je v porovnání se střechami orientovanými na západ a sever vhodnější.



Graf 5.2 – Množství dopadajícího slunečního záření v závislosti na orientaci střechy [27]

Z dat vyplývajících z předchozích grafů je zřejmé, že orientace i sklon střechy jsou pro instalaci FVE vhodné a má smysl o výstavbě elektrárny uvažovat.

5.3. Analýza spotřeby energií

Celý dům je vytápěn plynovým kotlem, který je využíván i pro ohřev teplé vody. Část odebraného plynu se spotřebuje i při vaření na plynovém sporáku. Výměna plynového kotle za jiný topný systém se v současné době nepředpokládá, v úvahu přichází pouze ukládání přebytků vyrobené elektrické energie do teplé vody.

Elektrina se v současnosti v domě využívá pouze k napájení běžných elektrických spotřebičů, její spotřeba je tedy relativně nízká. V následujících tabulkách jsou uvedeny údaje o energetických vstupech, které byly získány z faktur od dodavatelů za poslední fakturační rok. V tabulce 5.2 jsou uvedeny informace o množství spotřebované energie a v tabulce 5.3 jednotkové ceny (počítané pouze z variabilní části ceny), které budou dále využívány při výpočtech. S dodavatelem elektřiny je momentálně smlouvena dvoutarifová sazba D26d.

Energetické vstupy	Jednotka	Celkové množství	Rozdělení spotřeby dle tarifu	
			VT	NT
Elektrická energie	kWh	2 832	2 042	790
	GJ	10,2	7,35	2,85
Zemní plyn	m ³	2045	-	-
	GJ	78,5	-	-

Tabulka 5.2 – Tabulka energetických vstupů

Energetické vstupy	Jednotka	Tarif	Jednotková cena bez DPH (počítáno pouze z variabilní části ceny)	Jednotková cena s DPH (počítáno pouze z variabilní části ceny)
Elektrická energie	Kč/MWh	VT	2580	3122
	Kč/MWh	NT	1610	1948
Zemní plyn	Kč/m ³	-	8,4	10,2
	Kč/GJ	-	219	265

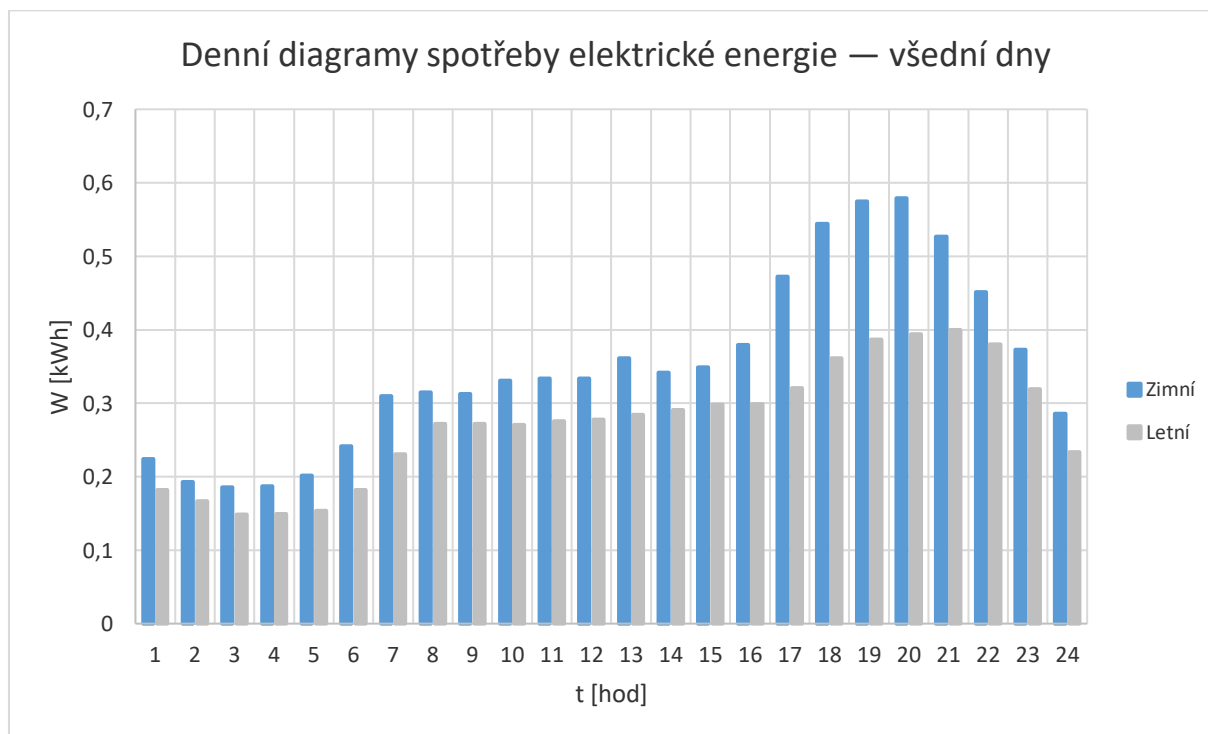
Tabulka 5.3 – Tabulka jednotkových cen energií.

5.3.1. Spotřeba elektrické energie

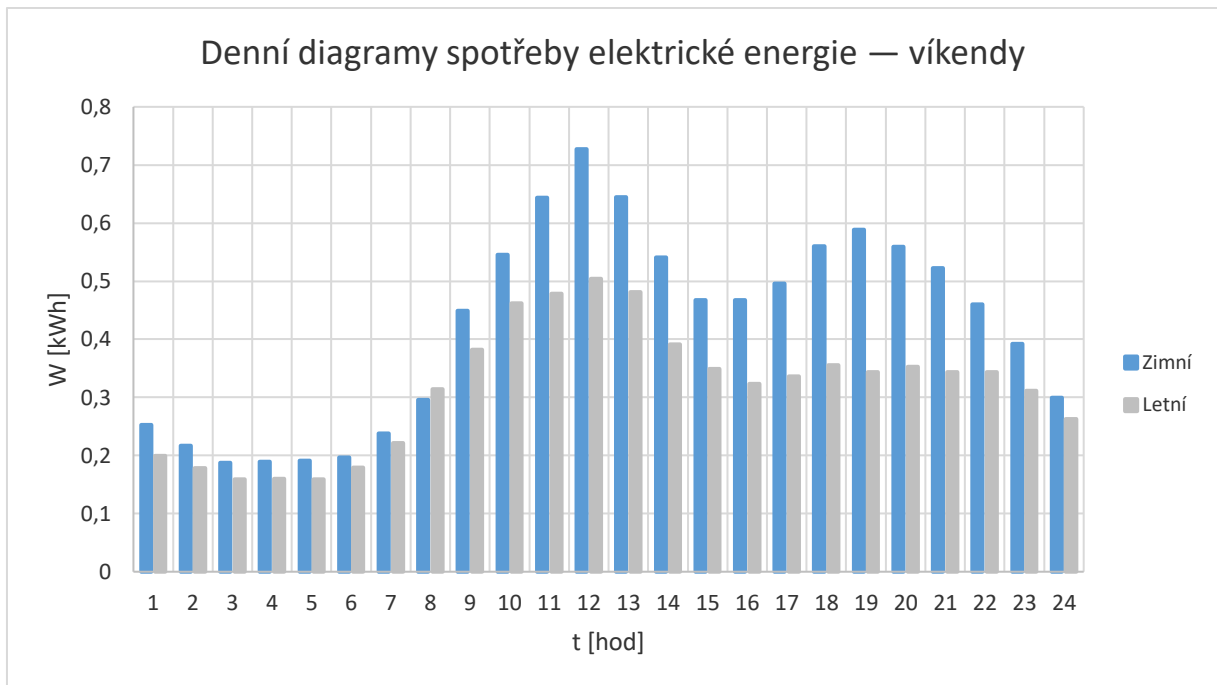
- **Denní diagramy**

Jelikož uvažovaný dům nedisponuje chytrým elektroměrem a z faktur od dodavatele lze zjistit pouze údaj o roční spotřebě elektrické energie, bylo nutné diagramy spotřeby vytvořit. Pro přepočítání na základě údajů o roční spotřebě byly využity normalizované typové diagramy dodávky elektřiny z [28], konkrétně TDD 4, který charakterizuje odběr domácnosti bez tepelného využití elektřiny.

Pro dostatečné zachycení průběhu spotřeby v objektu jsem provedl rozdělení zaprvé na pracovní dny a víkendy a zadruhé na dny v zimním a v letním období. Jednotlivé diagramy jsou vyobrazeny v následujících grafech 5.3 a 5.4.



Graf 5.3 – Graf denních diagramů spotřeby elektrické energie (všední dny)

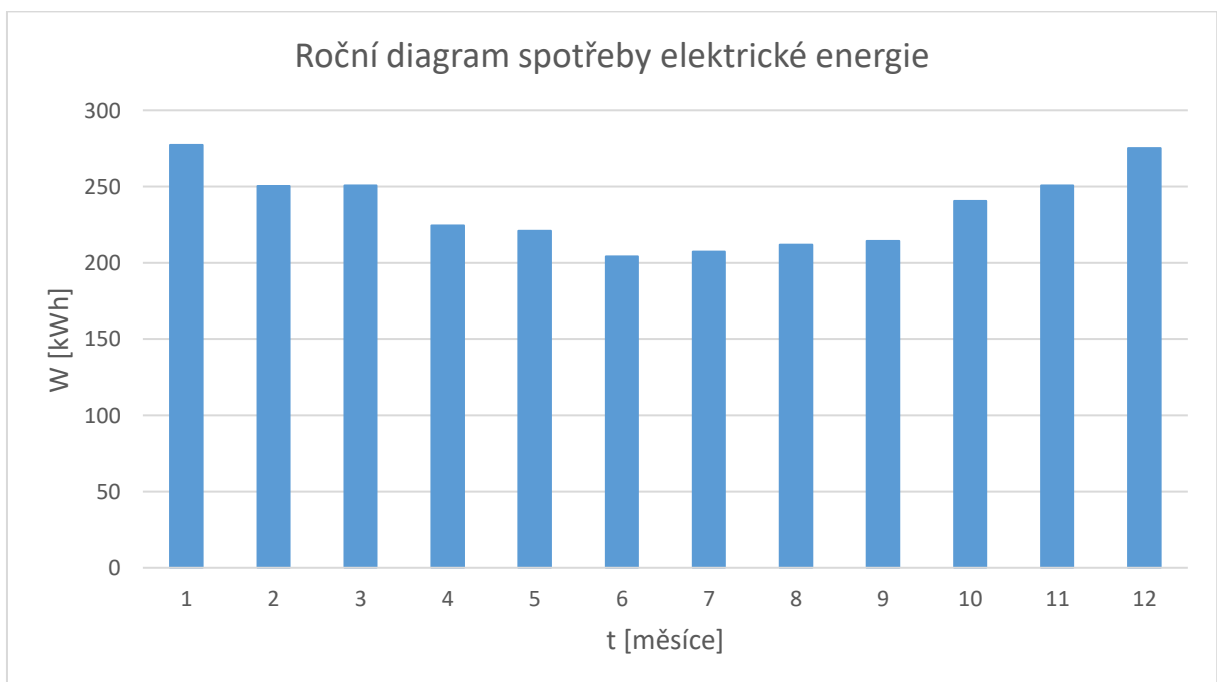


Graf 5.4 – Graf denních diagramů spotřeby elektrické energie (víkendy)

- **Roční diagram**

Pro vytvoření ročního diagramu spotřeby elektřiny jsem stejně jako v případě denních diagramů využil data dostupná z [28]. Výsledná roční spotřebovaná elektrická energie dle přepočteného diagramu zobrazeného v grafu 5.5 odpovídá skutečné hodnotě odečtené z faktury a je dána vzorcem:

$$W_{cel} = \sum_{i=1}^{12} W_i = 2828 \text{ kWh}$$



Graf 5.5 – Roční diagram spotřeby elektrické energie

5.3.2. Spotřeba teplé vody

Z pozorování chování spotřebitelů v objektu a také z údajů dostupných z [29] jsem přibližně určil průměrnou spotřebu teplé vody v objektu. Množství spotřebované vody v jednotlivých měsících je uvedeno v tabulce 5.4, přičemž v letních měsících jsem uvažoval nižší spotřebu danou vyššími teplotami okolí. Délka měsíce je v tomto případě pro zjednodušení počítána jako 30 dní. Předpokládaná teplota vody po ohřevu je 60 °C.

Měsíc	Objem [l]
Leden	3 600
Únor	3 600
Březen	3 600
Duben	3 600
Květen	3 600
Červen	3 000
Červenec	3 000
Srpen	3 000
Září	3 600
Říjen	3 600
Listopad	3 600
Prosinec	3 600
Celkem	41 400

Tabulka 5.4 – Spotřeba teplé vody v objektu

6. Návrh hybridní fotovoltaické elektrárny

V této kapitole se budu věnovat návrhu vhodné konfigurace HFVE. Nejprve stanovím požadované parametry systému, na jejichž základě následně provedu výběr vhodných komponent a určím odpovídající dimenzi celé elektrárny.

6.1. Stanovení výchozích předpokladů

Při návrhu systému FVE je důležité si stanovit, co od výsledného systému očekáváme a co požadujeme. V závislosti na těchto požadavcích se pak výsledné systémy výrazně liší velikostí, složitostí a cenou použitých komponent. V našem případě budou základní požadavky následující:

- **Systém musí v prvním roce provozu pokrýt spotřebu elektřiny v objektu alespoň z 85 % a tím zajistit určitou nezávislost domu na dodávkách z DS**

Při stanovování této podmínky jsem vycházel především z informací uvedených v kapitole 2. Ze závěrů této kapitoly vyplývá, že situace na trhu s elektřinou v budoucích letech může být značně nejistá a při naplnění některých scénářů by mohlo dojít nejen ke zdražování elektrické energie, ale v nejhorších případech také k možným výpadkům dodávky. Z toho vyplývá, že je na místě uvažovat o instalaci vlastního zdroje a tím i o zvýšení nezávislosti na dodávkách z DS, dokud stát instalaci takových zdrojů finančně podporuje.

- **Systém musí splňovat podmínky programu Nová zelená úsporám v podoblasti C.3.7**

Při návrhu bude kladen důraz na splnění všech podmínek příslušné podoblasti tohoto programu tak, aby bylo možné dosáhnout na nejvyšší finanční podporu a tím co možná nejvíce snížit vstupní náklady. Podmínky pro tuto podoblast jsou uvedeny v tabulce 6.1. Tímto by navíc mělo být zajištěno, že elektrárnu bude možné provozovat jako mikrozdroj bez licence.

Sledovaný parametr	Jednotka	C.3.7
Celkový využitelný zisk	[kWh.rok ⁻¹]	≥ 4 000
Minimální míra využití vyrobené elektřiny pro krytí spotřeby v místě výroby	[%]	70
Akumulace přebytků energie do teplé vody	-	Možná
Minimální měrný objem zásobníku teplé vody nebo akumulární nádrže	[l]	-
Akumulace přebytků energie do elektrických akumulátorů	-	Povinná
Minimální měrná kapacita lithiových akumulátorů	[kWh.kWp ⁻¹]	1,25
Výše dotace včetně příspěvku na odborný posudek	[Kč]	155 000

Tabulka 6.1 – Požadované parametry a výše dotace v podoblasti podpory C.3.7 [30]

Celkový využitelný zisk elektrárny se zjednodušeně stanoví dle vzorce:

$$Q_{FV,celk} [\text{kWh} \cdot \text{rok}^{-1}] = P_{inst} [\text{kWp}] \cdot 1000$$

- **Systém by při splnění předchozích podmínek měl být co možná nejvíce ekonomicky výhodný**

Při splnění předchozích podmínek bude klíčové, aby výsledný systém byl v rámci možností co možná nejvíce ekonomicky výhodný. To bude ovlivňovat zejména výběr komponent s dobrým poměrem mezi cenou a užitnou hodnotou a také volbu vhodné dimenze systému.

6.2. Určení požadovaných parametrů systému

V následujících podkapitolách budou uvedeny minimální požadované parametry nejdůležitějších částí HFVE určené na základě výchozích předpokladů stanovených v podkapitole 6.1.

6.2.1. Požadované parametry pole fotovoltaických panelů

Při stanovování minimálního instalovaného výkonu jsem vycházel z požadavků na celkový využitelný zisk dle podmínky č. 2 uvedené v podkapitole 6.1. Následně jsem provedl výpočet ověřující splnění podmínky č. 1, přičemž míra pokrytí spotřeby elektřiny v objektu by při minimální hodnotě instalovaného výkonu uvedeného v tabulce 6.2 byla 87 %. K tomuto číslu jsem došel zjednodušeným porovnáním vyrobené elektřiny dle [31] a spotřeby objektu při uvažování dostatečně velkého bateriového úložiště k rozložení vyrobené elektřiny v čase. Uvedené minimum tak splňuje obě tyto podmínky.

Parametr	Hodnota
Instalovaný výkon [Wp]	$\geq 4\ 000$

Tabulka 6.2 – Požadovaný instalovaný výkon elektrárny

6.2.2. Požadované parametry hybridního měniče

- **Problematika měření po fázích**

V současné době je značným problémem pro vlastníky fotovoltaických elektráren systém měření platný v ČR, konkrétně měření po jednotlivých fázích. Při tomto typu měření totiž distribuční společnosti účtují zákazníkům nikoli celkové saldo spotřebované a vyrobené elektřiny, ale počítají saldo na každé ze tří fází. Je tedy klíčové navrhnout systém správně tak, aby nedocházelo k nechtěnému prodávání vyrobené elektřiny za nízké výkupní ceny a současně k opětovnému nakupování za cenu výrazně vyšší.

- **Požadavky na měnič**

Jediným řešením výše uvedeného problému je v tomto případě pořízení třífázového asymetrického měniče s dostatečným výstupním výkonem. Tato alternativa relativně dobře vyřeší otázku nerovnoměrného rozdělení spotřeby na jednotlivé fáze. Požadované parametry jsou uvedeny v tabulce 6.3.

Parametr	Hodnota
Typ	Třífázový asymetrický
Výstupní výkon [W]	$\geq 7\ 000$
Výkon na jedné fázi [W]	$\geq 3\ 000$

Tabulka 6.3 – Požadované parametry hybridního měniče

Celkový minimální výstupní výkon a výkon na jedné fázi jsem zvolil přibližným odhadem na základě znalosti chování spotřebitelů tak, aby bylo možné současně využívat více spotřebičů na jednotlivých fázích bez nutnosti výrazného dokupování elektřiny z DS. Značný počet měničů totiž není schopný poskytovat dostatečný výkon na jednu fázi, tím pádem je často nutné zbytečně nakupovat elektřinu ze sítě, i když výroba elektrárny by spotřebu s přehledem pokryla. Z průzkumu trhu vyplývá, že tento problém má i poměrně značný počet nabízených systémů od profesionálních firem. Předpoklad měniče s dostatečným výkonem je tedy absolutně klíčový, pokud chceme spotřebovat co nejvíc elektřiny přímo v místě výroby a tím zajistit co možná nejvyšší ekonomickou výnosnost.

6.2.3. Požadované parametry bateriového úložiště

Při určování požadavků na bateriové úložiště jsem vycházel jednak z podmínek programu Nová zelená úsporám a také jsem se opět snažil co možná nejvíce předejít nechtěnému dokupování elektřiny z DS zapříčiněnému nedostatečným výkonem. Z toho důvodu jsem stanovil minimální výkon tak, aby bylo možné z baterií napájet více spotřebičů nejednou. Příslušné požadované parametry bateriového úložiště jsou uvedeny v tabulce 6.4.

Parametr	Hodnota
Velikost lithiových baterií	$\geq 1,25 * P_{inst}$
Výstupní výkon [W]	$\geq 4\ 000$

Tabulka 6.4 – Požadované parametry bateriového úložiště

6.3. Výběr vhodných komponent

Na základě požadavků z kapitoly 6.2 jsem provedl výběr vhodných komponent. Začal jsem výběrem měniče, od kterého se dále odvíjí i ostatní součásti HFVE, především bateriové úložiště, které musí být kompatibilní. V následujících podkapitolách jsou tedy uvedeny vybrané komponenty a jejich nejdůležitější technické parametry. Všechny ceny a informace o komponentech jsou dostupné ze stránek obchodů uvedených v příloze 1.

6.3.1. Fotovoltaické panely

Po průzkumu trhu a porovnání různých panelů od mnoha značek jsem se rozhodl pro výběr monokrystalických křemíkových panelů Jinko Solar 325Wp MONO, viz následující obrázek.



Obrázek 6.1 – Fotovoltaický panel Jinko Solar 325Wp MONO

Tento typ panelu jsem zvolil zejména díky vysokému výkonu, účinnosti a také díky poměrně nízké pořizovací ceně.

• Parametry panelu

V tabulce 6.5 jsou uvedeny důležité parametry panelu:

Parametr	Hodnota
Jmenovitý výkon (P_{max})	325 Wp
Účinnost (η)	19,48 %
Jmenovité napětí (V_{mpp})	33,6 V
Maximální proud při zátěži (I_{mpp})	9,68 A
Pracovní teplota	-40 °C až 85 °C
Rozměry	1665 mm x 1002 mm x 35 mm
Záruka	10 let na produkt, 25 let na výkon
Cena za kus	3 104 Kč

Tabulka 6.5 – Parametry fotovoltaického panelu Jinko Solar 325wp MONO

6.3.2. Hybridní měnič

Při výběru hybridního měniče jsem dbal na to, aby splňoval veškeré požadavky z podkapitoly 6.2.2. Bylo také podstatné, aby vyhovoval podmínkám pro získání dotace z programu Nová zelená úsporám. Posledním kritériem byla výrobcem zaručená kompatibilita s větším počtem baterií na trhu. Z měničů splňujících tyto podmínky jsem vybral Solax X3-Hybrid-8.0T, viz obrázek 6.2.



Obrázek 6.2 – Hybridní měnič X3-Hybrid-8.0T

Tento měnič je vybaven dvěma MPP trackery a je vhodný pro připojení vysokonapěťových baterií. Je vybaven integrovanou EPS jednotkou, která umožňuje v případě výpadku distribuční sítě přechod do ostrovního provozu a tím po určitou dobu zachovat provoz důležitých spotřebičů. Pro správnou funkci měniče je zapotřebí instalovat také elektroměr, který slouží k měření směru a velikosti výkonu a proudu. K měniči lze dokoupit také kapesní Wi-Fi router, který umožňuje shromažďovat data o celém systému HFVE a přenášet je na monitorovací webovou stránku a do mobilní aplikace. Obě tyto zařízení jsem také vybral od firmy Solax, zejména díky kompatibilitě.

- **Parametry měniče**

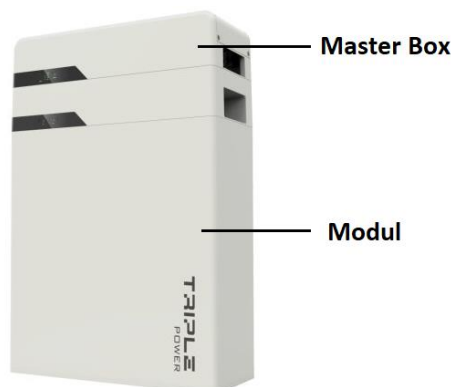
V tabulce 6.6 jsou uvedeny parametry měniče důležité pro tuto instalaci:

Parametr	Hodnota
Maximální vstupní výkon (DC)	10 000 W
Jmenovitý výstupní výkon (AC)	8 000 W
Maximální výkon na jedné fázi (AC)	3 105 W
Rozsah napětí baterie	170-500 V
Maximální nabíjecí/vybíjecí proud	25 A
Maximální efektivita	97,6 %
Rozměry	655 mm x 456 mm x 208 mm
Záruka	10 let
Cena	74 951 Kč

Tabulka 6.6 – Parametry hybridního měniče X3-Hybrid-8.0T

6.3.3. Bateriové úložiště

Hlavním kritériem při výběru bateriového úložiště byla kromě podmínek z podkapitoly 6.2.3 především jeho kompatibilita s měničem, která je důležitá pro správnou funkci celého systému. Z toho důvodu jsem vybral bateriový systém Solax Triple Power, který se skládá z tzv. Master Boxu a jednotlivých bateriových modulů T45, jak je patrné na obrázku 6.3.



Obrázek 6.3 – Solax Triple Power

- **Master Box**

Tato část jednak funguje jako BMS, tedy slouží k monitorování stavu baterie, řídí nabíjecí/vybíjecí proces a zajišťuje ochranu baterie před provozem mimo bezpečnou provozní oblast. Další důležitou funkcí Master Boxu je možnost rozšíření systému propojením až čtyř bateriových modulů.

Parametr	Hodnota
Cena	15 885 Kč

- **Bateriový modul**

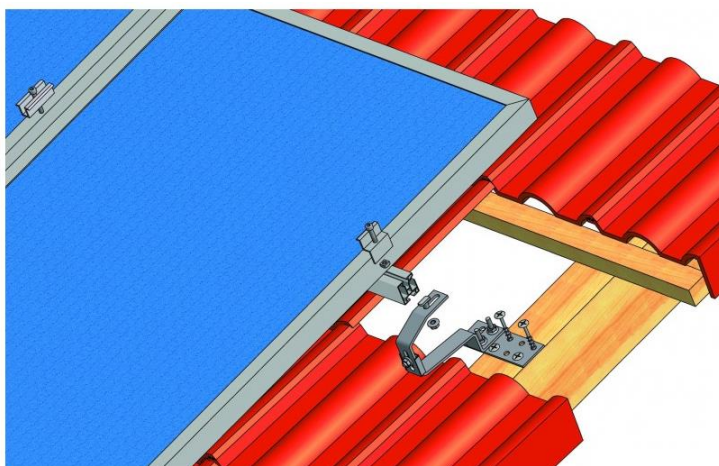
Celkové parametry úložiště jsou dané počtem spojených lithium-iontových bateriových modulů T45, které vynikají zejména vysokou životností a udávaným DOD. Z parametrů měniče uvedených v tabulce 6.6 a také z podmínek, které jsou uvedeny v tabulce 6.4, vyplývá požadavek na propojení minimálně dvou těchto modulů.

Parametr	Hodnota
Jmenovitá kapacita	4,5 kWh
Jmenovité napětí	100,8 V
Maximální nabíjecí/vybíjecí proud	30 A
Doporučený nabíjecí/vybíjecí proud	25 A
Maximální výkon	3 kW
Standartní výkon	2,5 kW
DOD	90 %
Životnost (100 % DOD, 25 °C)	6 000 cyklů
Účinnost nabíjecího/vybíjecího cyklu (C/3, 25 °C)	95 %
Záruka	10 let
Cena	58 378 Kč

Tabulka 6.7 – Parametry bateriového modulu T45

6.3.4. Konstrukce pro uchycení panelů

Pro uchycení panelů na střechu domu jsem vybral kompletní set určený pro montáž na taškové střechy, který využívá háky přivrtané ke střešním trámům. Princip uchycení je zřejmý z obrázku 6.4.



Obrázek 6.4 – Princip uchycení panelů ke střeše

Cena tohoto setu se liší v závislosti na množství uchycených panelů a je uvedena v následující tabulce:

Počet panelů	Cena
10	9 051 Kč
12	9 708 Kč
14	11 451 Kč
16	12 414 Kč
18	14 728 Kč
20	14 816 Kč

Tabulka 6.8 – Ceny setů pro montáž na taškové střechy

6.3.5. Kombinovaný ohřívač TUV

Z důvodu nutnosti zvýšení spotřeby elektrické energie, a také za účelem efektivního využití přebytků, jsem se rozhodl systém rozšířit o kombinovaný ohřívač Dražice OKC 125, který lze napojit na externí teplovodní zdroj, v našem případě kondenzační plynový kotel. To umožňuje v zimních měsících přípravu teplé vody tepelným výměníkem pomocí kotle a v letních měsících lze naopak k ohřevu využít elektrinou napájené keramické topné těleso, a tak využít přebytky z elektrárny. Parametry ohřívače jsou uvedeny v následující tabulce.

Parametr	Hodnota
Objem	120 l
Příkon topného tělesa	2 200 W
Doba ohřevu elektrickou energií (z 10 °C na 60 °C)	3,2 h
Jmenovitý tepelný výkon	9 000 W
Doba ohřevu výměníkem (z 10 °C na 60 °C)	55 min
Cena	7 680 Kč

Tabulka 6.9 – Parametry kombinovaného ohřívače Dražice OKC 125

6.4. Určení optimálního počtu panelů

Z požadavku na minimální instalovaný výkon, který je uveden v tabulce 6.2, jsem určil minimální vyhovující počet panelů na 13. Maximální počet, který je dán naopak omezenými rozměry střechy, je 18. Z ekonomického srovnání vyšla nejlépe právě maximální varianta s využitím všech využitelných panelů. Výsledný systém bude detailně popsán v následujících kapitolách a bude na něm názorně ukázáno, jakou cestou byly jednotlivé varianty ekonomicky hodnocené a porovnávány.

7. Výsledný navržený systém

V této kapitole budou popsány především technické parametry výsledného systému HFVE a údaje o očekávaných energetických ziscích.

7.1. Technické parametry

V následující tabulce 7.1 jsou uvedeny nejdůležitější technické parametry celého systému, které vyplývají z parametrů jednotlivých komponentů uvedených v podkapitole 6.3. Je patrné, že systém splňuje všechny požadavky z podkapitoly 6.2.

Parametr	Hodnota
FVE	
Počet panelů [ks]	18
Výkon panelu [Wp]	325
Instalovaný výkon elektrárny [Wp]	5 850
Měnič	
Jmenovitý výstupní výkon [W]	8 000
Maximální výkon na jedné fázi [W]	3 105
Bateriové úložiště	
Počet bateriových modulů [ks]	2
Kapacita bateriového modulu [Wh]	4 500
Využitelná kapacita modulu dle DOD [Wh]	4 050
Kapacita bateriového úložiště [Wh]	9 000
Využitelná kapacita úložiště dle DOD [Wh]	8 100
Standartní výkon [W]	5 000
Efektivita nabíjecího/vybíjecího cyklu [%]	95

Tabulka 7.1 – Technické parametry navržené HFVE

7.2. Vyrobená elektrická energie

V tabulce 7.2 jsou uvedeny průměrné hodnoty vyrobené elektrické energie dle informací dostupných z [27; 31], přičemž dle [27] jsou uvažovány ztráty v systému 13 %. Toto konečné číslo zohledňuje ztráty v měniči a ve vodičích, ale i předpokládané ztráty způsobené ulpěním nečistot na panelech.

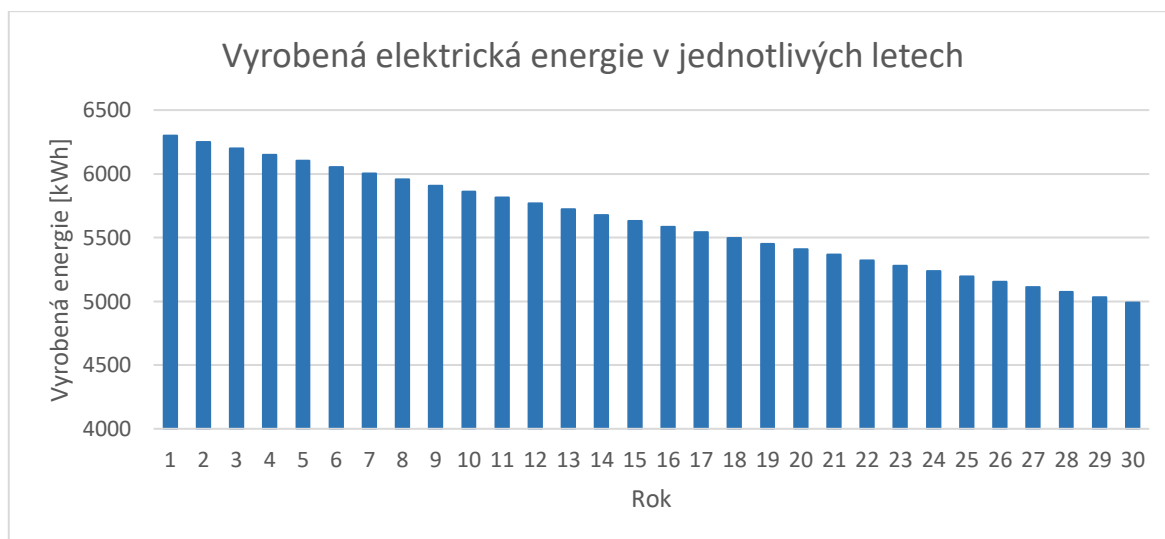
Množství vyrobené energie za den [kWh]	
Letní den	25
Zimní den	7,6
Průměrná hodnota	17,3

Množství vyrobené energie v jednotlivých měsících [kWh]	
Leden	234
Únor	357
Březen	556
Duben	702
Květen	784
Červen	749
Červenec	755
Srpen	743
Září	573
Říjen	421
Listopad	240
Prosinec	187
Celková roční výroba	6 301

Tabulka 7.2 – Množství vyrobené energie

- **Pokles výkonu panelů**

Hodnoty uvedené v tabulce 7.2 lze uvažovat pouze pro první rok po instalaci HFVE. V následujících letech je potřeba vzít v úvahu pokles výkonu panelů, který dle výrobce nepřesáhne 0,8 % ročně, což je garantováno zárukou na výkon. Množství vyrobené elektrické energie v jednotlivých letech je při uvažování tohoto poklesu a životnosti panelů 30 let znázorněno v grafu 7.1.

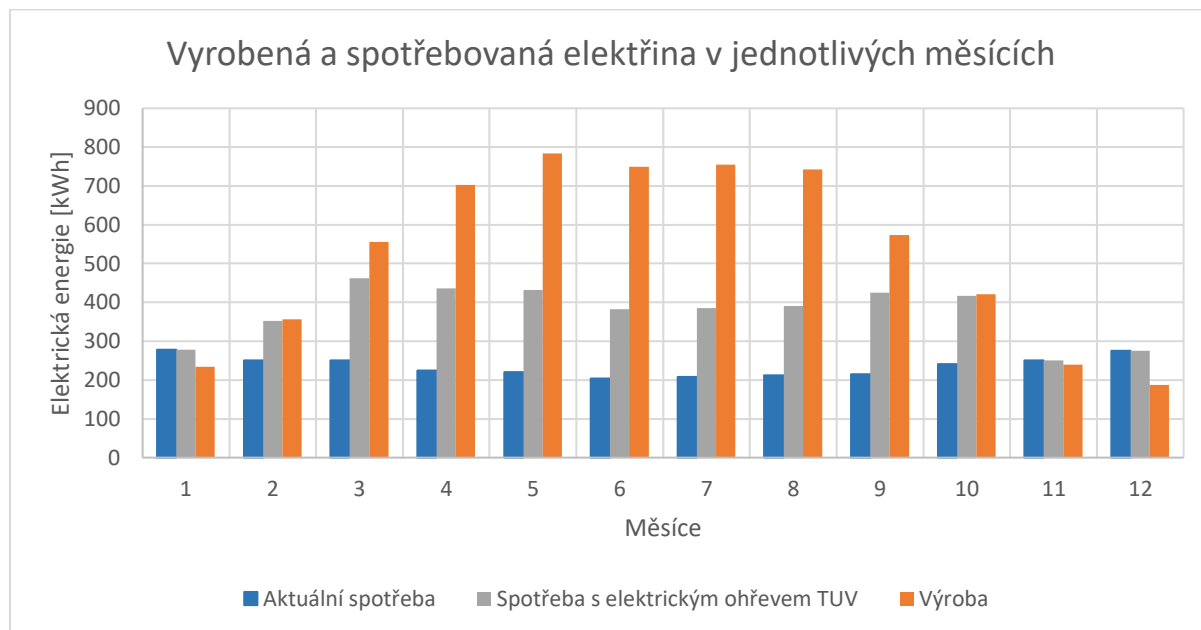


Graf 7.1 – Vyrobena elektrická energie v jednotlivých letech

7.3. Využití vyrobené elektrické energie

Vyrobena elektrická energie bude sloužit především k pokrytí spotřeby v domě, přičemž údaje o velikosti aktuální spotřeby jsou uvedeny v podkapitole 5.3. Případné přebytky budou využívány primárně na ohřev TUV v kombinovaném ohřívači. Elektřina, která se nevyužije přímo v domě, bude prodávána do sítě. Údaje o výrobě a spotřebě elektrické energie v jednotlivých měsících, včetně uvažovaného využití elektrického ohřevu vody, jsou vyobrazeny v grafu 7.2, na který se budou odkazovat následující podkapitoly detailněji popisující zmíněné způsoby využití elektřiny.

Uvedené hodnoty v tabulkách a grafech v těchto podkapitolách platí pro první rok. Pokles výkonu v následujících letech dle grafu Graf 7.1 bude uvažován v ekonomickém vyhodnocení.



Graf 7.2 – Vyrobená a spotřebovaná energie v jednotlivých měsících

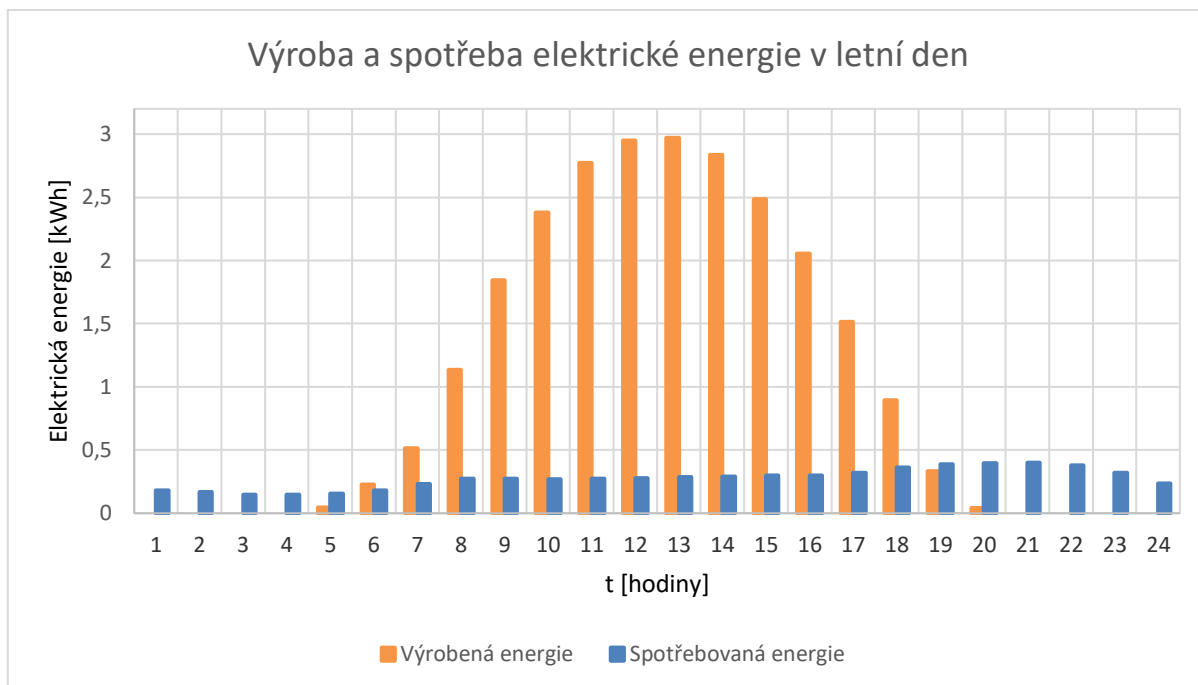
7.3.1. Pokrytí aktuální spotřeby v objektu

Jak je patrné z grafu 7.2, aktuální spotřeba elektřiny v objektu není zcela pokryta pouze v lednu, listopadu a prosinci. I v těchto měsících je však pokryta z větší části a je zřejmé, že nainstalovaná HFVE by výrazně snížila závislost domu na dodávkách z distribuční sítě, což bylo jedním z výchozích předpokladů při návrhu. Množství dokupované elektřiny v těchto měsících a také míra pokrytí aktuální spotřeby jsou uvedeny v následující tabulce (platí pro první rok po instalaci). Je zřejmé, že podmínka na pokrytí spotřeby alespoň z 85 % je tedy splněna. Je nutné zdůraznit, že při výpočtech nebylo uvažováno případné dokupování elektřiny zapříčiněné nedostatečným výkonem měniče nebo bateriového úložiště. Tyto výkony sice byly zvoleny tak, aby bylo možné využívat více spotřebičů naráz (například rychlovarnou konvici, počítač a osvětlení), nicméně i tak je žádoucí, aby se spotřebitelé chovali v tomto směru odpovědně a nevyužívali značný počet energeticky náročných spotřebičů najednou.

Měsíc	Nákup elektřiny ze sítě [kWh]
Leden	43,4
Listopad	10,8
Prosinec	87,9
CELKEM	142
Míra pokrytí aktuální spotřeby [%]	95

Tabulka 7.3 – Množství dokupované elektrické energie, míra pokrytí aktuální spotřeby

Co se týká porovnání výroby a spotřeby v jednotlivých dnech, tak jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3, diagram výroby FVE v průběhu dne se neshoduje s diagramem denní spotřeby v domácnosti. Situace konkrétně pro tento vybraný dům a navrženou FVE je znázorněna v následujícím grafu 7.3, který ukazuje rozdíl mezi vyrobenou a spotřebovanou energií v jednotlivých hodinách letního dne.



Graf 7.3 – Výroba a spotřeba energie v letní den

Aby byla spotřeba pokryta i v čase, kdy FVE elektřinu nevyrábí, je třeba ji uložit do bateriového úložiště. V následující tabulce 7.4 jsou uvedeny údaje znázorňující jeho využití, které byly stanoveny z porovnání denních diagramů výroby a spotřeby.

Údaj	Letní období		Zimní období	
	Pracovní den	Víkend	Pracovní den	Víkend
Kapacita bateriového úložiště [Wh]	9 000			
Spotřeba elektřiny z baterií [Wh]	2 491	2 391	4 930	3 328
DOD [%]	28	27	55	37

Tabulka 7.4 – Míra využívání bateriového úložiště

Tyto údaje byly využity jednak při výpočtech, kde je nutné zahrnout ztráty při nabíjecím/vybíjecím cyklu, a také při určování životnosti baterií.

7.3.2. Ohřev TUV

Jak je vidět v grafu 7.2, ve většině měsíců je množství vyrobené energie vyšší, než je množství aktuálně spotřebovávané. Využití těchto přebytků na elektrický ohřev TUV je výhodné z více důvodů. Jednak tím snížíme náklady na plyn a také zvýšíme míru využití vyrobené elektřiny v místě výroby tak, aby bylo možné získat nejvyšší možnou dotaci dle podmínek uvedených v podkapitole 6.1. V tabulce 7.5 jsou uvedeny informace o množství spotřebované elektrické energie pro ohřev TUV, přičemž množství spotřebované vody za den odpovídá údajům uvedeným v podkapitole 5.3.2.

Veličina	Hodnota	
Příkon topného tělesa [W]	2200,00	
Objem ohřívání vody za den [l]	120	100
Doba potřebná k ohřátí z 10 °C na 60 °C [h]	3,2	2,7
Energie spotřebovaná na jedno ohřátí [kWh]	7,0	5,9
Energie spotřebovaná za měsíc [kWh]	211,2	178,2

Tabulka 7.5 – Spotřeba elektřiny na ohřev TUV

Jakékoli přebytky tedy díky regulátoru budou využity přednostně na ohřev, přičemž množství energie využitě pro tento účel je uvedeno v tabulce 7.6 a celá situace je znázorněna v grafu 7.2. Uvedené přebytky jsou v jednotlivých měsících menší o uvažované ztráty při nabíjecím/vybíjecím cyklu pro příslušné DOD uvedené v tabulce 7.4.

Měsíc	Přebytky elektrické energie [kWh]	Přebytky využité na ohřev TUV [kWh]
Únor	101	101
Březen	301	211
Duben	474	211
Květen	560	211
Červen	542	178
Červenec	544	178
Srpen	527	178
Září	355	211
Říjen	176	176
CELKEM	3580	1656

Tabulka 7.6 – Využití energie na ohřev TUV

7.3.3. Prodej nevyužitě elektřiny do sítě

Dle podmínek provozování mikrozdroje bez licence je provozovatel povinen vyřešit, jak bude nakládáno s elektřinou, kterou si v danou chvíli sám doma vyrobí, ale nespotřebuje. V našem případě budou ve chvíli, kdy všechnu energii není možné spotřebovat přímo v objektu, budou nadbytky prodávány do sítě. Množství prodané elektřiny je uvedeno v následující tabulce.

Měsíc	Prodej elektřiny do sítě [kWh]
Únor	5,1
Březen	93,7
Duben	266,3
Květen	351,8
Červen	366,4
Červenec	369,0
Srpen	352,9
Září	147,9
Říjen	4,9
CELKEM	1957,9

Tabulka 7.7 – Množství prodávané elektřiny

Pro výkup přebytků elektřiny vyrobené fotovoltaickou elektrárnou bude využíván produkt Bonus S-Power. Průměrná výkupní cena a poplatek za tento produkt jsou uvedeny v následující tabulce.

Údaj	Hodnota
Průměrná výkupní cena [Kč/kWh]	1,342
Poplatek za produkt S-Power [Kč/kWh]	0,363

Tabulka 7.8 – Prodej elektřiny do sítě

Výhodami tohoto produktu jsou zejména relativně vysoké výkupní ceny a fakt, že dodávka do sítě není nijak limitována. Finanční odměna za vykoupenou energii je z daňového hlediska považována za ostatní příjem a zákazník je povinen ji zdanit, nicméně nepodnikající osoby jsou do výše příjmu 30 000 Kč za rok od této daně osvobozeny.

Tento produkt je však určen výhradně zákazníkům Bohemia Energy typu domácnost, kteří mají v daném odběrném místě uzavřenou smlouvu na dodávku elektřiny a mají fotovoltaickou elektrárnu splňující podmínky pro provoz bez licence. Před instalací tedy bude nutné změnit dodavatele a tarif. Konkrétně jsem vybral produkt ENERGIE A++, u kterého je cena silové elektřiny stanovována pro každou hodinu dodávky zvlášť dle ceny vzniklé obchodováním na denním trhu. Tento produkt by měl být výhodný, jelikož ceny elektřiny jsou menší v době, kdy FVE elektřinu nevyrábí a je třeba ji dokupovat. Cenu kvůli změnám na denním trhu není možné určit přesně, tudíž jsem ji na základě dostupných dat stanovil na průměrnou hodnotu 3,2 Kč/kWh (počítáno pouze z variabilní části ceny).

8. Ekonomické vyhodnocení

V této kapitole v první řadě provedu výpočet ekonomické návratnosti navrženého systému.

8.1. Výdaje

8.1.1. Pořizovací cena HFVE

Veškeré náklady na použité komponenty, instalační materiál a také údaj o výši dotace, jsou uvedeny v následující tabulce 8.1. Ceny elektroinstalačního materiálu, jističů, ochrany a montážních prací jsou uvedeny pouze přibližně, jelikož není dopředu známé naprosto přesné provedení instalace.

Komponenty	Typ	Počet [ks]	Celková cena s DPH [Kč]
Panely	Jinko Solar 325 Wp	18	55 872
Montážní prvky	Set pro montáž 18 panelů	1	14 728
Měnič	Solax X3-8.0-DE, 8.0KW	1	74 907
Monitoring měniče	Solax Wifi modul	1	856
Elektroměr	Solax 3f Smart Meter	1	4 183
BMS	Solax TriplePower Master box	1	15 884
Baterie	Solax TriplePower 4.5 kW	2	116 756
Kombinovaný ohřívač vody	Dražice OKC 125	1	7 680
Regulátor přebytků	Wattrouter MX	1	8 783
Rozvaděčová skříň	DB118S 1X18P/SMD	2	800
Elektroinstalační materiál	-	1	7 000
Jističe, přepět'ové ochrany	-	1	5 200
Montážní práce	-	1	25 000
Posudek specialisty NZÚ	-	1	5 000
Dotace	C.3.7	1	-155 000
CELKEM	-	-	195 522

Tabulka 8.1 – Tabulka komponentů navržené HFVE

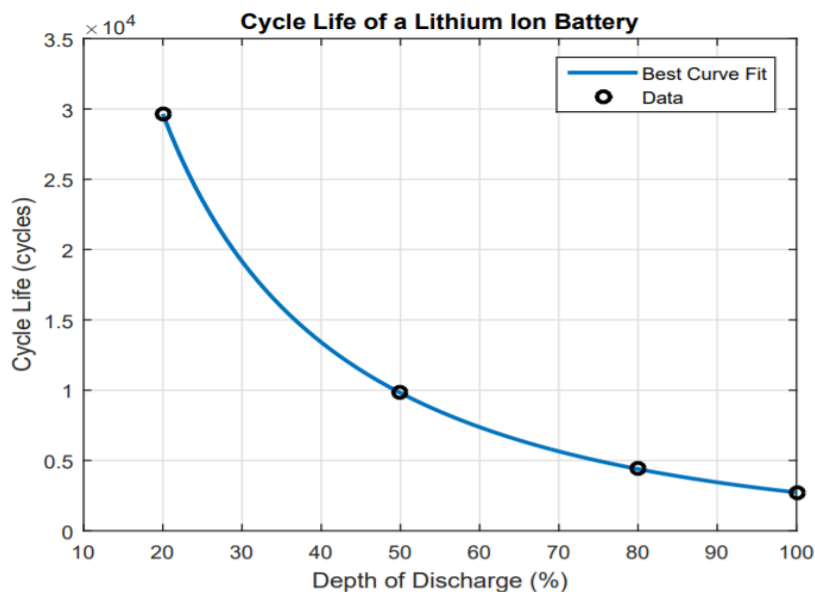
8.1.2. Opětovný nákup komponent po skončení jejich životnosti

Předpokládanou životnost projektu jsem stanovil na 30 let na základě očekávané životnosti fotovoltaických panelů. Této životnosti však nedosahují všechny použité komponenty. U měniče (včetně monitoringu), BMS, kombinovaného ohříváče vody a regulátoru jsem stanovil životnost na 15 let. Na začátku šestnáctého roku provozu tedy bude nutné provést opětovnou investici. Její výše je uvedena v následující tabulce. Nominální nárůst cen zapříčiněný vlivem inflace jsem neuvažoval, jelikož dle informací dostupných z [32] by měly v budoucnu ceny komponent pro HFVE spíše klesat.

Údaj	Hodnota
Výše opětovné investice [Kč]	108 110

Tabulka 8.2 – Výše opětovné investice v šestnáctém roce provozu

Co se týká životnosti baterií, tak dle informací dostupných z [33] závisí životnost lithiium-iontových baterií na hloubce vybíjení, přičemž danou závislost lze vidět na obrázku 8.1.



Obrázek 8.1 - Závislost životnosti lithiových baterií na DOD

Z této křivky vyplývá, že pro vypočítané DOD uvedené v tabulce 7.4 by baterie mohly při uvažování vhodných podmínek (jako jsou stálá pokojová teplota, dodržování předepsaného nabíjecího/vybíjecího proudu a využívání BMS) dosahovat relativně vysoké životnosti. Pro výpočty při ekonomickém hodnocení bude tedy uvažována životnost baterií 30 let, tedy přibližně 11 000 cyklů. Je však nutné podotknout, že nelze zcela jistě říct, jaký bude po tak dlouhé době reálný stav a funkčnost konkrétně námi vybraného typu baterií.

8.1.3. Výdaje na údržbu, servis a pojištění

Pro správnou funkci celé HFVE je důležité provádět její pravidelné revize. Dle informací z [34] jsem stanovil, že budou prováděny každých 5 let provozu (kromě třicátého roku, kdy už by revize neměla smysl). Kvůli možným rizikům jsem přibližně určil také pojištění. Uvedené hodnoty v následující tabulce budou ročně navyšovány o inflaci 2 %.

Údaj	Hodnota
Cena servisní prohlídky [Kč]	1 999
Cena pojištění	250

Tabulka 8.3 – Cena servisní prohlídky

8.2. Úspory za energie a příjmy za prodej elektřiny

8.2.1. Úspory za elektrickou energii

- První rok po instalaci

Údaj	Bez HFVE	S HFVE
Množství kupované elektřiny [kWh]	2 830	142
Průměrná jednotková cena (počítáno pouze z variabilní části ceny) [Kč/kWh]	2,8	3,2
Celková cena [Kč/kWh]	7 902	455
Celková úspora [Kč]	7 448	

Tabulka 8.4 – Úspory za elektrickou energii první rok po instalaci

- Následující roky

V dalších letech provozu HFVE musí být brán v úvahu jednak pokles výkonu panelů dle grafu 7.1 a také možný růst cen elektrické energie. Odhadovat vývoj cen elektřiny v ČR lze jen velmi obtížně. Pro účely této práce budu při určování nominálního růstu cen vycházet z inflačního cíle ČNB, který je dlouhodobě 2 %. Ze závěrů kapitoly 2 však vyplývá, že růst cen elektřiny by mohl být pravděpodobně i o něco vyšší než tato hodnota. Z tohoto důvodu bude pro základní scénář předpokládán průměrný roční růst ceny elektřiny o 2,5 % (uvažováno pro variabilní část ceny).

8.2.2. Úspory za plyn

- První rok po instalaci

Údaj	Hodnota
Množství ušetřeného plynu [kWh]	1 656
Jednotková cena (počítáno pouze z variabilní části ceny) [Kč/kWh]	0,95
Celková úspora [Kč]	1 573

Tabulka 8.5 – Úspory plyn první rok po instalaci

- Následující roky

Kromě poklesu výkonu panelů dle grafu 7.1 bude pro následující roky ve výpočtu uvažován také nárůst cen plynu. Ten jsem stanovil jako hodnotu inflačního cíle ČNB, tedy 2 % (uvažováno pro variabilní část ceny).

8.2.3. Prodej elektřiny do sítě

- První rok po instalaci

Údaj	Hodnota
Množství prodané elektřiny [kWh]	1 958
Průměrná výkupní cena po odečtení poplatku za produkt S-Power [Kč/kWh]	0,98
Celkový příjem [Kč]	1 917

Tabulka 8.6 – Odměna za prodej elektřiny do sítě první rok po instalaci

- Následující roky

Na základě stejných předpokladů jako v podkapitole 8.2.1 bude uvažován průměrný roční růst výkupní ceny elektřiny o 2,5 %.

8.3. NPV projektu

Jako kritérium pro hodnocení výnosnosti projektu budu využívat metodu NPV. Tato metoda je jedním z nejpoužívanějších finančních ukazatelů. Její hlavní výhodou je, že bere v úvahu časovou hodnotu peněz a také fakt, že výsledkem je hodnota přínosu investice v dnešních cenách. Výpočet NPV se provede dle vzorce:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

Kde: *NPV*.... čistá současná hodnota,
CF_t.... peněžní toky v jednotlivých letech,
n.... doba životnosti projektu,
r.... diskontní úroková míra.

Pokud vyjde NPV kladné, znamená to, že je projekt ekonomicky výhodný. V případě srovnání více investičních alternativ, je preferována alternativa s vyšší NPV.

8.3.1. Stanovení výše diskontu

Důležitým aspektem při výpočtu NPV je stanovení diskontu. Ten lze stanovit například sečtením bezrizikové úrokové sazby a prémie za riziko, které realizací projektu investor podstupuje. Bezriziková nominální úroková sazba lze stanovit na základě úrokových sazeb vládních obligací pro různé časové horizonty. Z informací dostupných z [35] vyplývá, že takzvané proti-inflační státní dluhopisy emitované 1. 4. 2020 garantují roční výnos, který plně pokrývá meziroční inflaci zveřejněnou ČSÚ pro dané období a k tomu navíc garantuje fixní bonus 0,5 %. Meziroční inflaci jsem pro výpočet opět stanovil z inflačního cíle ČNB na hodnotu 2 %. Prémii za riziko jsem stanovil na 0,5 %. Výsledný diskont pro základní scénář je tedy 3 %.

8.3.2. Výpočet NPV

Výpočet NPV jsem provedl dle výše uvedeného vzorce. Veškerá vstupní data (investice, výdaje, příjmy, diskont, pokles výkonu panelů a růst cen komodit) jsou jasně definována v podkapitolách 8.1 a 8.2. Postup výpočtu a informace o peněžních tocích v jednotlivých letech jsou znázorněny v příloze 2. Výsledné NPV pro základní scénář je tedy:

$$NPV = 2\,926 \text{ Kč}$$

Z kladné výsledné hodnoty vyplývá, že projekt by v této podobě při uvážení zvolených vstupních předpokladů byl ekonomicky výhodný a má smysl o instalaci HFVE uvažovat. Je ale zřejmé, že hodnota NPV není v porovnání s výší investice až tak vysoká. Vliv na tento výsledek má ale celá řada veličin. Předmětem následující kapitoly tedy bude vypracování citlivostních analýz, které znázorní závislost výsledného NPV na nejdůležitějších z těchto veličin.

9. Citlivostní analýza

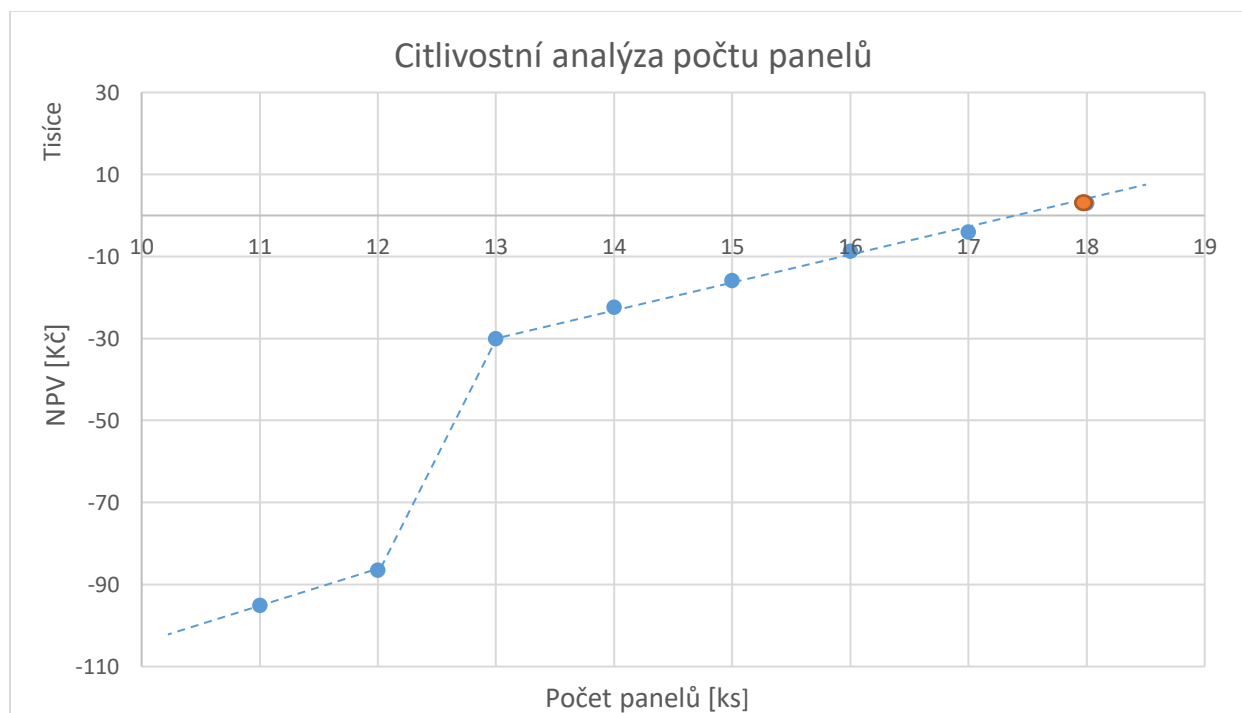
V kapitole 8 je znázorněn celý výpočet NPV pro takzvaný základní scénář. Tento výpočet má celou řadu vstupních proměnných. Tato kapitola se bude zabývat vlivem změny těchto proměnných na výsledek. V následující tabulce jsou pro shrnutí uvedeny vstupní hodnoty pro základní scénář, pro které budou v následujících podkapitolách zpracovány citlivostní analýzy. V grafech budou příslušné hodnoty pro základní scénář vyznačeny červeně.

Údaj	Hodnota
Počet fotovoltaických panelů [ks]	18
Výchozí jednotková cena elektřiny (počítáno pouze z variabilní části ceny) [Kč/kWh]	2,8
Průměrný roční růst ceny elektřiny [%]	2,5
Změna cen dokupovaných komponent [%]	0
Diskont [%]	3

Tabulka 9.1 – Vstupní proměnné pro základní scénář

9.1. Počet fotovoltaických panelů

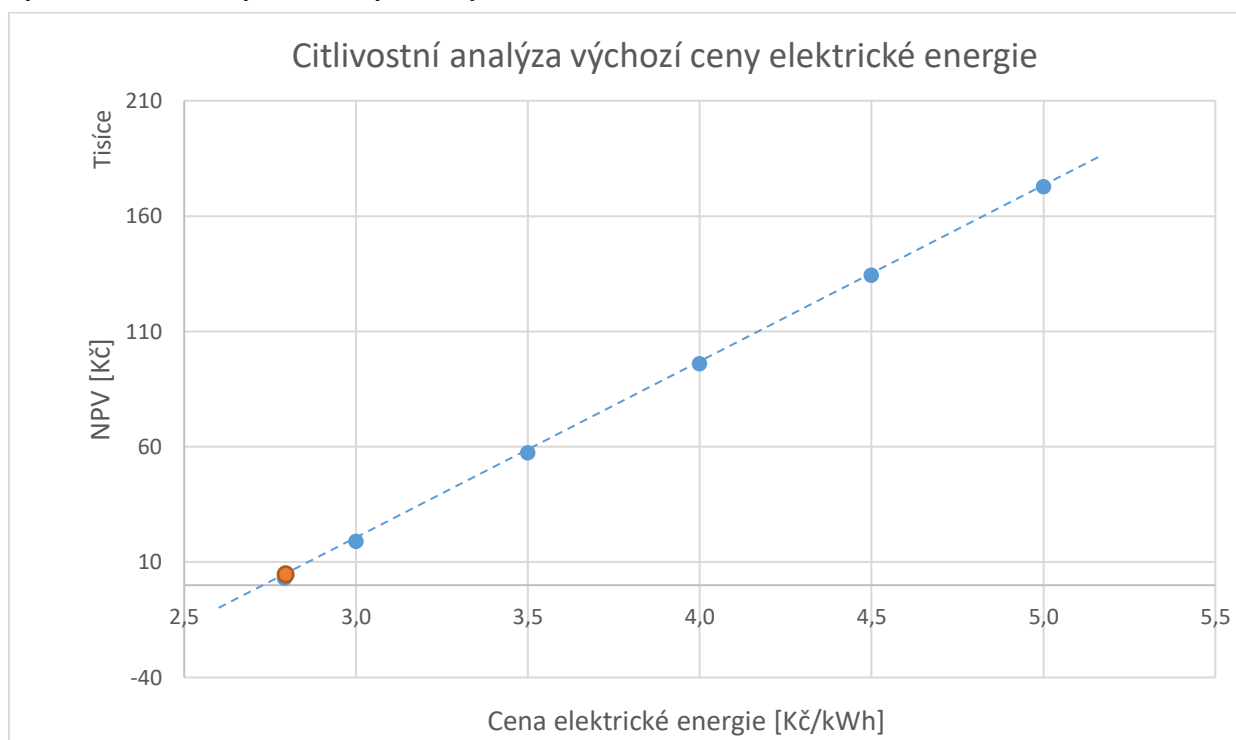
V následujícím grafu je znázorněna závislost NPV na počtu nainstalovaných fotovoltaických panelů. Jak bylo zmíněno v podkapitole 6.4, nejvýhodnější je z uvedených varianta s osmnácti panely, jejíž NPV je dokonce jediné kladné, přičemž při přidání dalších panelů by se dále zvyšovalo. Pokud by to tedy umožňovala velikost střechy, bylo by výhodné instalovat maximální počet vyhovující možnostem měniče (v tomto případě konkrétně 30). V grafu je taky patrný veliký rozdíl mezi variantami s dvanácti a třinácti panely. Ten je zapříčiněn tím, že varianty s nižším počtem panelů než 13 nesplňují podmínky pro obdržení dotace v podoblasti C.3.7.



Graf 9.1 – Citlivostní analýza počtu panelů

9.2. Výchozí cena elektrické energie

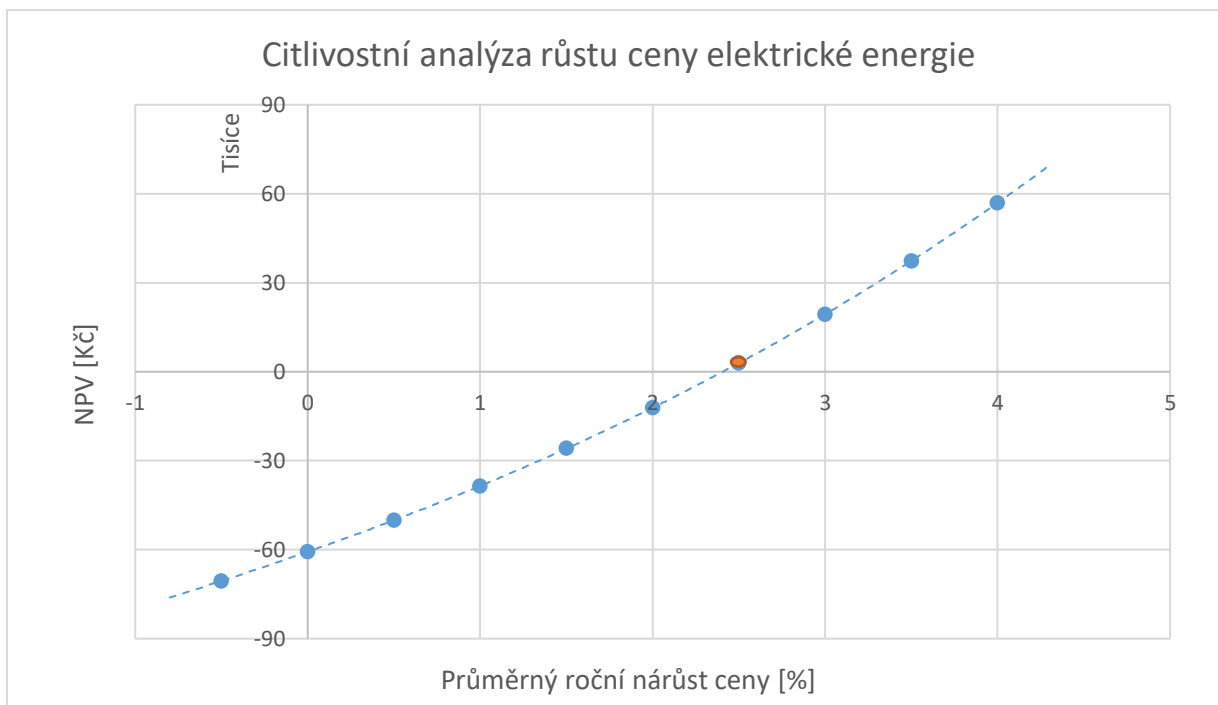
Jedním z faktorů, který měl zásadní vliv na výsledné NPV pro základní scénář, je výchozí cena elektrické energie. Současná průměrná cena za 1 kWh je totiž v současné době díky dvoutarifové sazbě asi 2,8 Kč, nicméně takto výhodná sazba není zdaleka garantována na celou dobu životnosti projektu. Jak vyplývá z [36], průměrná cena elektřiny pro domácnosti je často výrazně vyšší. Například v hojně využívané jednotarifové sazbě D02d je průměrná celková cena v ČR asi 4,77 Kč/kWh. Je tedy na místě porovnat, jaký vliv má výchozí cena elektřiny na výsledné NPV. Daná závislost je vyobrazena v následujícím grafu. Je zřejmé, že pro vyšší ceny, které jsou ale pro domácnosti v ČR naprosto běžné, by již NPV bylo výrazně vyšší a investice by dávala vyšší smysl.



Graf 9.2 – Citlivostní analýza výchozí ceny elektrické energie

9.3. Průměrný roční růst ceny elektrické energie

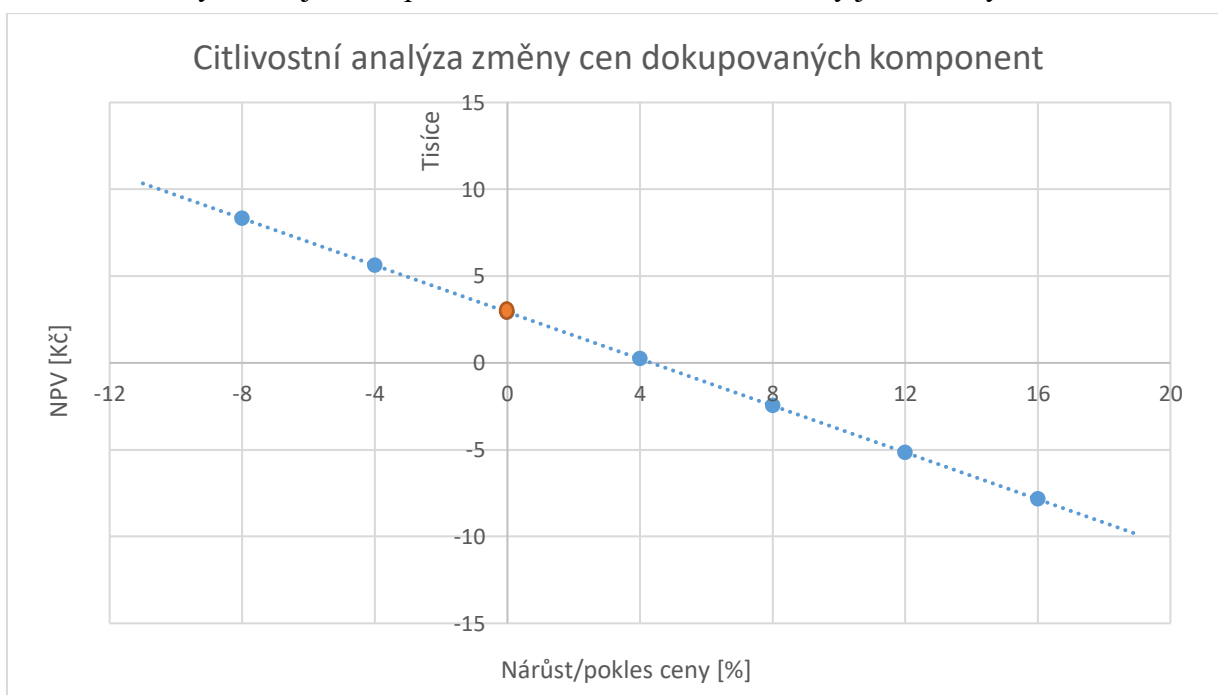
Stejně jako výchozí cena elektřiny, i její růst může výrazně ovlivnit návratnost systému. Pro základní scénář byl určen průměrný roční nárůst na 2,5 %. Navýšení o 0,5 % oproti předpokládané inflaci bylo určeno na základě závěrů kapitoly 2, ze kterých lze ovšem usuzovat, že by toto navýšení mohlo být při naplnění některých scénářů i vyšší. V takových případech by investice byla z pohledu investora zajímavější. Pokud by však růst byl nižší než inflace, celá investice by byla naopak prodělečná.



Graf 9.3 – Citlivostní analýza růstu ceny elektrické energie

9.4. Změna cen dokupovaných komponent

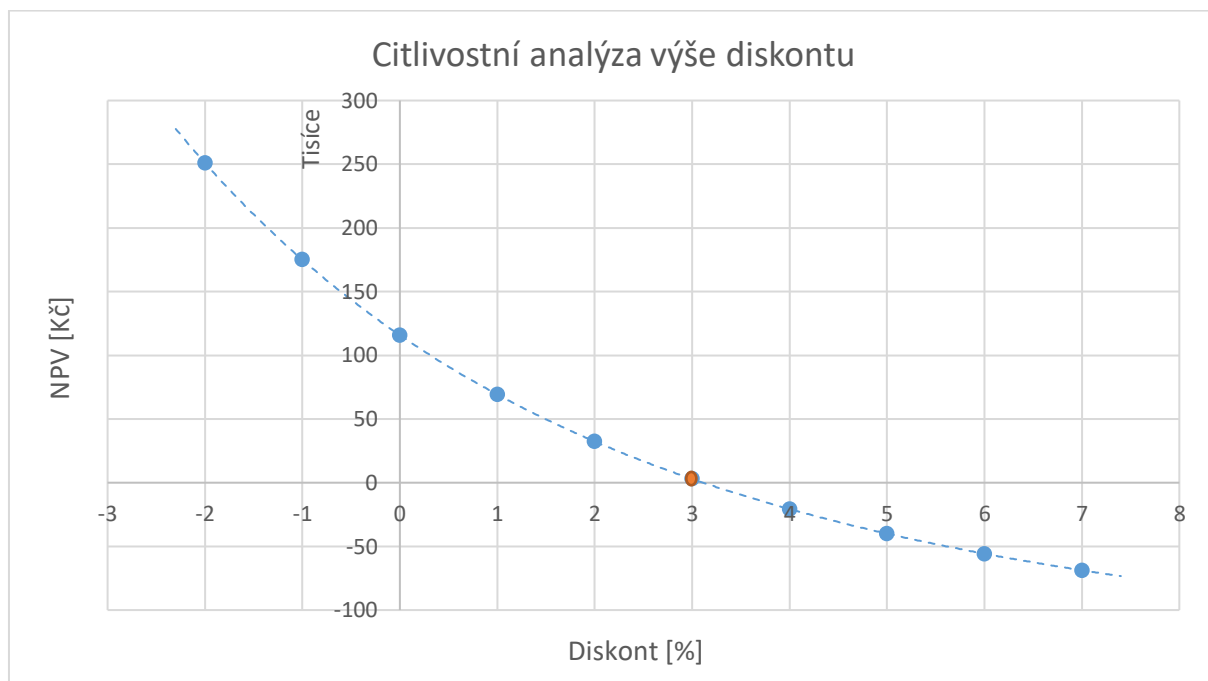
V podkapitole 8.1.2 zabývající se opětovným nákupem komponent na začátku šestnáctého roku je uvažováno, že nominální růst jejich ceny bude nulový z důvodu stále klesajících cen komponent HFVE a obecně také prvků výkonové elektroniky. V reálných hodnotách by to však znamenalo poměrně značný pokles cen, tudíž je vhodné znázornit, jak by výsledné NPV vypadalo v případě, že by ceny nominálně rostly, nebo pro představu dokonce klesaly. Je zřejmé, že při nominálním růstu cen o 4 % by již NPV bylo téměř nulové.



Graf 9.4 – Citlivostní analýza změny cen dokupovaných komponent

9.5. Výše diskontu

V následujícím grafu je uvedena závislost NPV na výši diskontu. Je patrné, že s klesajícím diskontem NPV narůstá, nicméně je nutné poznamenat, že je velmi nepravděpodobné, aby byl diskont v tuzemských podmínkách záporný, jelikož nominální úroková sazba dluhopisů ČR bude pravděpodobně po celou dobu životnosti projektu vyšší než nula. Z tohoto důvodu se dá předpokládat, že skutečná hodnota diskontu se bude blížit hodnotě, která byla uvažována v základním scénáři. Další hodnoty jsou tedy v grafu uvedeny spíše pro názornost a také aby byly respektovány možné nepředvídatelné výkyvy.



Graf 9.5 – Citlivostní analýza výše diskontu

10. Závěr

Hlavním předmětem této práce byl návrh a ekonomické zhodnocení malé fotovoltaické elektrárny. Za tímto účelem byl v úvodní části práce nejprve zmapován dosavadní i očekávaný budoucí vývoj elektroenergetiky, a především obnovitelných zdrojů, v České republice. Dle závěrů této části by měl význam fotovoltaických zdrojů do budoucna narůstat, přičemž vhodné se zdají zejména instalace na střechy objektů v kombinaci s akumulací prvků. Cílem práce tedy bylo zjistit, zda je investice do malé fotovoltaické elektrárny pro investora výhodná.

V souvislosti s tím byla v práci popsána dostupná technická řešení FVE, především pak hybridní fotovoltaické systémy, jejich klíčové komponenty (fotovoltaické panely, hybridní měnič napětí a bateriové úložiště) a princip jejich funkce.

V další části byly pro vybraný objekt, kterým je rodinný dům v Pardubicích, posouzeny konstrukční parametry, podmínky dané umístěním a další faktory, které významně ovlivňují funkci celé elektrárny. V této části jsem došel k závěru, že dům disponuje potenciálem pro výstavbu elektrárny. Má dostatečně velikou část střechy orientovanou k jihu s ideálním sklonem 35°, přičemž v okolí se nenachází žádný objekt výrazně bánící dopadu záření na panely. Pro vybraný objekt byla provedena také analýza potřeby energií. Uvedeny jsou informace o spotřebě a cenách elektřiny, plynu a TUV. V grafech jsou dále vyobrazeny denní a roční diagramy spotřeby elektrické energie, přičemž aktuální roční spotřeba je 2,83 MWh.

Následující část práce je věnována návrhu vhodné konfigurace HFVE. Nejprve byly stanoveny požadavky na výsledný systém. Při tom jsem vycházel především ze závěrů úvodní části, z kterých je patrné, že situace na trhu s elektřinou v budoucích letech může být značně nejistá a při naplnění některých scénářů by mohlo dojít nejen ke zdražování elektrické energie, ale v nejhorších případech také k možným výpadkům dodávek. Na základě toho jsem se rozhodl pro výběr většího systému, který by pokrýval alespoň 85 % aktuální spotřeby, a navíc splňoval podmínky programu Nová zelená úsporám v podoblasti C.3.7. V souvislosti s tím jsem stanovil odpovídající požadované parametry pole panelů, měniče a baterií. Klíčové v tomto směru bylo hlavně předejít nechtěnému, a z ekonomického hlediska nepříznivému, dokupování elektřiny ze sítě, který by byl zapříčiněn nedostatečným výkonem měniče či baterií.

Následně jsem provedl výběr nejvhodnějších komponent. Hlavní důraz při jejich výběru byl kladen především na splnění požadovaných parametrů a kompatibilitu.

Výsledný systém splňující všechny stanovené požadavky má instalovaný výkon 5 850 Wp, disponuje mimo jiné třífázovým asymetrickým hybridním měničem o výstupním výkonu 8 kW a bateriovým úložištěm o velikosti 9 kWh. Dále také kombinovaným ohřívacem TUV o objemu 120 l, jehož zařazení nezbytné pro splnění podmínek programu Nová zelená úsporám v podoblasti C.3.7, a navíc vhodné i pro využití případných přebytků vyrobené elektřiny. V části práce věnované výslednému systému jsou uvedeny jeho technické parametry, informace o množství vyrobené elektřiny a také formy jejího využívání. V prvním roce například elektrárna vyrobí přibližně 6,3 MWh elektrické energie. Ta bude v první řadě využívána pro pokrytí spotřeby v domácnosti, případně přebytky budou primárně využívány pro ohřev TUV a sekundárně prodávány do distribuční sítě. Z výsledných hodnot vyplývá, že v prvním roce by měla být aktuální spotřeba objektu pokryta z 95 %. Je tedy patrné,

že systém této dimenze by výrazně zvýšil samostatnost a zajišťoval tak určitou nezávislost domu na dodávkách z distribuční sítě, což bylo jedním z výchozích požadavků.

V poslední části je provedeno ekonomické vyhodnocení projektu. Jsou zde uvedeny jak výdaje (vstupní investice, opětovný nákup komponent s kratší životností a výdaje na údržbu a pojištění), tak i úspory za energie a příjem za prodej elektřiny do distribuční sítě. Z těchto hodnot byly spočteny peněžní toky v jednotlivých letech potřebné pro výpočet NPV, přičemž výsledná hodnota NPV pro základní scénář je 2 926 Kč.

Tato hodnota je tedy kladná a to znamená, že je projekt teoreticky ekonomicky výhodný. I přesto bych investorům, kterým jde čistě o ekonomickou výnosnost, investici do tohoto projektu při uvažování vstupních proměnných základního scénáře nedoporučil. K tomu mě vedlo hned několik skutečností. Výsledná čistá současná hodnota není v porovnání s výší investice nikterak vysoká a je zřejmé, že i malé nepřesnosti při stanovení vstupních proměnných by mohly znamenat záporný výsledek, a tím pádem ekonomicky nevýhodný projekt. Tato skutečnost je znázorněna i v citlivostních analýzách, přičemž bych poukázal například na skutečnost, že při nominálním růstu cen dokupovaných komponent o 4 % by již NPV bylo téměř nulové. Dalším příkladem je skutečnost, že v případě nominálního růstu cen elektřiny pouze o stanovenou inflaci 2 % by již NPV bylo záporné. Z analýz je tedy jasně patrné, že i při mírném odchýlení od předpokladů by projekt nebyl z ekonomického hlediska výhodný. Celý výpočet a výsledek je navíc závislý na dodržení stanovených životností komponent. kdy především u bateriového úložiště je obtížné říct, jaký bude po tak dlouhé době jejich reálný stav. Z výše uvedeného je jasné, že investice má celou řadu rizik, které převáží její potenciální výnos.

Je však nutné podotknout, že v některých případech, především pokud by výchozí cena elektrické energie byla vyšší, by již projekt mohl znamenat zajímavou možnost. Například při výchozí ceně elektrické energie 4,5 Kč by NPV bylo přibližně 134 000 Kč. Z toho důvodu lze investici doporučit například pro objekty disponujícími stejnými podmínkami pro výstavbu, které využívají méně výhodné tarifové sazby.

Zajímavý by tento projekt mohl být i pro lidi, kterým jde kromě finančního zisku i o další benefity. Hybridní fotovoltaická elektrárna této dimenze zajišťuje pokrytí spotřeby elektřiny v domě v prvním roce z 95 %. Je tedy zřejmé, že systém by výrazně zvýšil nezávislost domu na dodávkách z distribuční sítě, což například v souvislosti se závěry úvodní části může být pro určitou část lidí zajímavé. Jedná se navíc o ekologicky šetrný zdroj elektrické energie. Investorům, pro které jsou tyto výhody důležité, bych tak investici do tohoto projektu doporučil.

Seznam použité literatury

- 1] OENERGETICE.CZ, . *Infografika: Česká energetika slaví 100 let. Jak se za tu dobu změnila?* [online]. [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/energetika-v-cr/ceska-energetika-slavi-100-let-se-za-tu-dobu-zmenila/>
- 2] MPO, . *STÁTNÍ ENERGETICKÁ KONCEPCE ČESKÉ REPUBLIKY* [online]. Praha [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statni-energeticka-politika/2016/12/Statni-energeticka-koncepce-_2015_.pdf
- 3] OTE, a.s.,. *ZPRÁVA O OČEKÁVANÉ DLOUHODOBÉ ROVNOVÁZE MEZI NABÍDKOU A POPTÁVKOU ELEKTRINY A PLYNU* [online]. 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: https://www.ote-cr.cz/cs/o-spolecnosti/soubory-vyrocnizprava-ote/zoor_2018.pdf
- 4] ERÚ, . *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR 2018* [online]. , 4-48 [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf/1420388b-8eb6-4424-9ad9-c06a57b5326c
- 5] ČEPS, a.s.,. *ROČNÍ PŘÍPRAVA PROVOZU na rok 2019* [online]. Praha [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/priprava-provozu>
- 6] SOUČEK, Přemysl. *Úspory přinesou zvýšení spotřeby* [online]. [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://ihli.cz/uspory-prinesou-zvyseni-spotreby/>
- 7] ČEPS, a.s.,. *Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040* [online]. [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/tiskove-zpravy/novinka/maf-cz-prinasi-hodnoceni-zdrojove-primerenosti-cr-do-roku-2040>
- 8] CHALUPA, Štěpán. *Polemika: Potřebuje Česko další jaderný blok? NE* [online]. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://archiv.ihned.cz/c1-66681080-polemika-potrebuje-cesko-dalsi-jaderny-blok-ne>
- 9] KUBÁTOVÁ, Zuzana. *Dukovany 2036? Jízdnímu řádu pro novou elektrárnu raději nevěřte* [online]. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/komentar-jizdnimu-radu-pro-novou-elektrarnu-v-dukovanech-radeji-neverte-82686>
- 10] SRDEČNÝ, Karel. *Obnovitelné zdroje energie*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2009. ISBN 9788072125180.
- 11] VOBOŘIL, David. *Příčiny solárního boomu v České republice* [online]. [cit. 2019-10-18]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/priciny-solarniho-boomu/>

- 12] BUZRLA, Tomáš. *Potenciál a budoucnost solární energetiky* [online]. In: . [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: http://energosummit.cz/web_files/esummit/prednasky_pdf/prednasky_2018/t_buzrla.pdf
- 13] DELOITTE, . *Rozvoj obnovitelných zdrojů do roku 2030* [online]. [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cz/Documents/energy-resources/rozvoj_obnovitelných_zdrojů_do_roku_2030_3.pdf
- 14] WAGNER, Vladimír. *Potenciál využití fotovoltaických zdrojů v ČR a ve světě (díl 2.)* [online]. [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/potencial-vyuziti-fotovoltaických-zdroju-cr-ve-svete-dil-2>
- 15] BOXWELL, Michael. *Solar electricity handbook: A simple practical guide to solar energy - how to design and install photovoltaic solar electric systems*. 2017 Edition. 2017. ISBN 978-1907670657.
- 16] DOLEŽEL, Michal. *Fotovoltaická elektrárna s akumulací energie – v budoucnosti se bez ní neobejde žádný dům* [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/fotovoltaicka-elektrarna-s-akumulaci-energie-%E2%80%93-v-budoucnosti-se-bez-ni-neobejde-zadny-dum/>
- 17] VČELÁK, Jan a Petr WOLF. *Využití obnovitelné energie z fotovoltaického zdroje v rodinných domech* [online]. [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/19060-vyuziti-obnovitelne-energie-z-fotovoltaického-zdroje-v-rodinných-domech>
- 18] VOBŔIL, David. *Fotovoltaické elektrárny - princip funkce a součásti, elektrárny v ČR* [online]. [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/fotovoltaicka-elektrarna-princip-funkce-a-soucasti>
- 19] KUSALA, Jaroslav. *SOLÁRNÍ ENERGIE* [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/kap3.htm>
- 20] DOLEŽAL, Martin. *Solární energie* [online]. Tábor, 2013 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: http://zelenymost.cz/files/solarni_energie.pdf
- 21] ENERGYSAGE, . *Types of solar panels* [online]. [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.energysage.com/solar/101/types-solar-panels/>
- 22] SVARC, Jason. *Solar Battery System Types - AC Vs DC Coupled* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/ac-coupling-vs-dc-coupling-solar-battery-storage>
- 23] BŘÍZA, Martin. *Fotovoltaika: Jak vybrat hybridní měnič pro rodinný dům* [online]. [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.prumyslovaekologie.cz/info/fotovoltaika-jak-vybrat-hybridni-menic-pro-rodinny-dum>
- 24] ENERGYSAGE, . *How to choose the best battery for a solar energy system* [online]. [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://www.energysage.com/solar/solar-energy-storage/what-are-the-best-batteries-for-solar-panels/>
- 25] ENERGYSAGE, . *Should you install a solar battery for home use?* [online]. [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://www.energysage.com/solar/solar-energy-storage/benefits-of-solar-batteries/>
- 26] BERANOVSKÝ, Jiří a Jan TRUXA. *Alternativní energie pro váš dům. 2., aktualiz. vyd.* Brno: EkoWATT, 2004. Edice 21. století. ISBN 9788086517896.
- 27] PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM, . *PV Performance Tool* [online]. [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#MR

- 28] OTE, a.s., *Normalizované TDD - 2020* [online]. [cit. 2020-02-13]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/typove-diagramy-dodavek-elektřiny/normalizovane-tdd?date=2020-02-13>
- 29] PRAŽSKÉ VODOVODY A KANALIZACE, a.s., *Spotřeba vody* [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.pvk.cz/vse-o-vode/pitna-voda/spotreba-vody/>
- 30] STÁTNÍ FOND ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČR, . *Závazné pokyny pro žadatele a příjemce podpory z podprogramu Nová zelená úsporám* [online]. [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://www.novazelenausporam.cz/dokumenty/detail/?id=591>
- 31] THE WORLD BANK GROUP, . *GLOBAL SOLAR ATLAS* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://globalsolaratlas.info/map>
- 32] AGORA ENERGIEWENDE, . *Current and Future Cost of Photovoltaics* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/AgoraEnergie_wende_Current_and_Future_Cost_of_PV_Feb2015_web.pdf
- 33] MALLON, Kevin, Francis ASSADIAN a Bo FU. *Analysis of On-Board Photovoltaics for a Battery Electric Bus and Their Impact on Battery Lifespan* [online]. [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/318292540_Analysis_of_On-Board_Photovoltaics_for_a_Battery_Electric_Bus_and_Their_Impact_on_Battery_Lifespan
- 34] TERMS A.S., . *Kompletní servisní činnost pro FVE* [online]. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <http://www.fve-servis.cz/>
- 35] MINISTERSTVO FINANCÍ ČR, . *Dluhopis Republiky* [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.sporicidluhopisy.cz/cs/o-dluhopisech/typy-dluhopisu/dluhopis-republiky>
- 36] TZB-INFO, . *Ceny energií a paliv: Historický přehled vývoje cen* [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energi>

Seznam použitých zkratk

ERÚ	Energetický regulační úřad
ČR	Česká republika
OZE	obnovitelné zdroje energie
ES	elektrizační soustava
FV	fotovoltaický
FVE	fotovoltaická elektrárna
HFVE	hybridní fotovoltaická elektrárna
MPP	maximum power point
DOD	depth of discharge
NEKP	Národní energeticko-klimatický plán
EPS	Emergency power supply
BMS	Battery management systém
DS	distribuční síť
CF	cash flow
DCF	diskontované cash flow
KDFC	kumulativní diskontované cash flow
ČSÚ	Český statistický úřad
ČNB	Česká národní banka

Seznam obrázků

OBRÁZEK 2.1 – VÝVOJ TUZEMSKÉ NETTO SPOTŘEBY (3).....	10
OBRÁZEK 2.2 – VÝVOJ VÝROBY ELEKTŘINY BRUTTO V ČR (GWH) (4)	11
OBRÁZEK 2.3 – VÝVOJ INSTALOVANÉHO VÝKONU ES ČR PRO STÁVAJÍCÍ ZDROJE NAD 10 MWE, VYJMA OZE (7).....	12
OBRÁZEK 2.4 – OČEKÁVANÝ VÝVOJ A PARAMETRY AKUMULACE (7)	12
OBRÁZEK 2.5 – VÝVOJ VÝROBY ELEKTŘINY BRUTTO Z OZE A JEJÍ PODÍL NA TUZEMSKÉ BRUTTO SPOTŘEBĚ (TWh) (4)...	13
OBRÁZEK 2.6 – VÝVOJ VÝROBY ELEKTŘINY Z FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN (4).....	14
OBRÁZEK 2.7 – GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VÝVOJE PREDIKCE FVE A VTE DO ROKU 2040 (7).....	15
OBRÁZEK 3.1 – PŘÍKLAD DENNÍHO PROFILU VÝROBY FVE A SPOTŘEBY DOMÁCNOSTI (17).....	16
OBRÁZEK 4.1 – SCHÉMATICKÉ ZOBRAZENÍ HFVE (22).....	19
OBRÁZEK 5.1 – SNÍMEK STRANY DOMU ORIENTOVANÉ NA JIHOZÁPAD	22
OBRÁZEK 6.1 – FOTOVOLTAICKÝ PANEL JINKO SOLAR 325WP MONO	30
OBRÁZEK 6.2 – HYBRIDNÍ MĚNIČ X3-HYBRID-8.0T	31
OBRÁZEK 6.3 – SOLAX TRIPLE POWER	32
OBRÁZEK 6.4 – PRINCIP UCHYCENÍ PANELŮ KE STŘEŠE	33
OBRÁZEK 8.1 - ZÁVISLOST ŽIVOTNOSTI LITHIOVÝCH BATERIÍ NA DOD	40

Seznam grafů

GRAF 5.1 – MNOŽSTVÍ DOPADAJÍCÍHO SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ V ZÁVISLOSTI NA SKLONU STŘECHY	23
GRAF 5.2 – MNOŽSTVÍ DOPADAJÍCÍHO SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ V ZÁVISLOSTI NA ORIENTACI STŘECHY (27).....	24
GRAF 5.3 – GRAF DENNÍCH DIAGRAMŮ SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE (VŠEDNÍ DNY).....	25
GRAF 5.4 – GRAF DENNÍCH DIAGRAMŮ SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE (VÍKENDY)	26
GRAF 5.5 – ROČNÍ DIAGRAM SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE	26
GRAF 7.1 – VYROBENÁ ELEKTRICKÁ ENERGIE V JEDNOTLIVÝCH LETECH	35
GRAF 7.2 – VYROBENÁ A SPOTŘEBOVANÁ ENERGIE V JEDNOTLIVÝCH MĚSÍCÍCH	36
GRAF 7.3 – VÝROBA A SPOTŘEBA ENERGIE V LETNÍ DEN	37
GRAF 9.1 – CITLIVOSTNÍ ANALÝZA POČTU PANELŮ	43
GRAF 9.2 – CITLIVOSTNÍ ANALÝZA VÝCHOZÍ CENY ELEKTRICKÉ ENERGIE	44
GRAF 9.3 – CITLIVOSTNÍ ANALÝZA RŮSTU CENY ELEKTRICKÉ ENERGIE	45
GRAF 9.4 – CITLIVOSTNÍ ANALÝZA ZMĚNY CEN DOKUPOVANÝCH KOMPONENT	45
GRAF 9.5 – CITLIVOSTNÍ ANALÝZA VÝŠE DISKONTU.....	46

Seznam tabulek

TABULKA 5.1 – TABULKA PRŮMĚRNÝCH DOB SLUNEČNÍHO SVITU V PARDUBICÍCH (26).....	23
TABULKA 5.2 – TABULKA ENERGETICKÝCH VSTUPŮ.....	24
TABULKA 5.3 – TABULKA JEDNOTKOVÝCH CEN ENERGIÍ.....	25
TABULKA 5.4 – SPOTŘEBA TEPLÉ VODY V OBJEKTU.....	27
TABULKA 6.1 – POŽADOVANÉ PARAMETRY A VÝŠE DOTACE V PODOBLASTI PODPORY C.3.7 (30)	28
TABULKA 6.2 – POŽADOVANÝ INSTALOVANÝ VÝKON ELEKTRÁRNY	29
TABULKA 6.3 – POŽADOVANÉ PARAMETRY HYBRIDNÍHO MĚNIČE	29
TABULKA 6.4 – POŽADOVANÉ PARAMETRY BATERIOVÉHO ÚLOŽIŠTĚ.....	30
TABULKA 6.5 – PARAMETRY FOTOVOLTAICKÉHO PANELU JINKO SOLAR 325WP MONO	30
TABULKA 6.6 – PARAMETRY HYBRIDNÍHO MĚNIČE X3-HYBRID-8.0T	31

TABULKA 6.7 – PARAMETRY BATERIOVÉHO MODULU T45.....	32
TABULKA 6.8 – CENY SETŮ PRO MONTÁŽ NA TAŠKOVÉ STŘECHY	33
TABULKA 6.9 – PARAMETRY KOMBINOVANÉHO OHŘÍVAČE DRAŽICE OKC 125.....	33
TABULKA 7.1 – TECHNICKÉ PARAMETRY NAVRŽENÉ HFVE.....	34
TABULKA 7.2 – MNOŽSTVÍ VYROBENÉ ENERGIE	35
TABULKA 7.3 – MNOŽSTVÍ DOKUPOVANÉ ELEKTRICKÉ ENERGIE, MÍRA POKRYTÍ AKTUÁLNÍ SPOTŘEBY	36
TABULKA 7.4 – MÍRA VYUŽÍVÁNÍ BATERIOVÉHO ÚLOŽIŠTĚ	37
TABULKA 7.5 – SPOTŘEBA ELEKTRINY NA OHŘEV TUV	37
TABULKA 7.6 – VYUŽITÍ ENERGIE NA OHŘEV TUV	38
TABULKA 7.7 – MNOŽSTVÍ PRODÁVANÉ ELEKTRINY	38
TABULKA 7.8 – PRODEJ ELEKTRINY DO SÍTĚ.....	38
TABULKA 8.1 – TABULKA KOMPONENTŮ NAVRŽENÉ HFVE.....	39
TABULKA 8.2 – VÝŠE OPĚTOVNÉ INVESTICE V ŠESTNÁCTÉM ROCE PROVOZU	40
TABULKA 8.3 – CENA SERVISNÍ PROHLÍDKY	40
TABULKA 8.4 – ÚSPORY ZA ELEKTRICKOU ENERGII PRVNÍ ROK PO INSTALACI.....	41
TABULKA 8.5 – ÚSPORY PLYN PRVNÍ ROK PO INSTALACI	41
TABULKA 8.6 – ODMĚNA ZA PRODEJ ELEKTRINY DO SÍTĚ PRVNÍ ROK PO INSTALACI	41
TABULKA 9.1 – VSTUPNÍ PROMĚNNÉ PRO ZÁKLADNÍ SCÉNÁŘ	43

Příloha 1 – Internetové obchody s komponenty

- 1) KREL CENTRAL, Dostupné z: <https://www.elektrocentraly.cz/>
- 2) IFTECH S.R.O., Dostupné z: <https://shop.iftech.cz/>
- 3) MALL.CZ, Dostupné z: <https://www.mall.cz/>
- 4) Solax Power, Dostupné z: <https://www.solaxpower.com/>

