

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2023**

**DOMINIK  
DVOŘÁK**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dvořák** Jméno: **Dominik** Osobní číslo: **492484**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Vysokokapacitní akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů**

Název bakalářské práce anglicky:

**High-capacity electricity storage from renewable energy sources**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Vypracování rešerše zpracovávající problematiku obnovitelných zdrojů elektrické energie a možností akumulace elektrické energie;
- 2) Vypracování bilance produkce elektrické energie z vybraného obnovitelného zdroje v korelaci s časovým průběhem spotřeby elektrické energie z rozvodné sítě a návrh vhodné akumulace elektrické energie;
- 3) Zhodnocení proveditelnosti a ekonomických aspektů navrženého řešení akumulace.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Matěj Vodička ústav energetiky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **17.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **02.06.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2024**

Ing. Matěj Vodička  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
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 na téma **Vysokokapacitní akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů** 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

.....

Dominik Dvořák

# Anotační list

|                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>Jméno autora:</b>         | Dominik Dvořák   |
| <b>Název BP:</b>             | Vysokokapacitní akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů  |
| <b>Anglický název:</b>       | High-capacity accumulation of electrical energy from renewable sources   |
| <b>Akademický rok:</b>       | 2022/2023  |
| <b>Ústav/Odbor:</b>          | Ústav energetiky   |
| <b>Vedoucí BP:</b>           | Ing. Matěj Vodička   |
| <b>Bibliografický údaje:</b> | Počet stran: 60<br>Počet obrázků: 27<br>Počet tabulek: 12<br>Počet příloh: 0   |
| <b>Klíčova slova:</b>        | akumulace energie, obnovitelné zdroje energie, fotovoltaická elektrárna, akumulátor, kapacita, porovnání systémů,  |
| <b>Keywords:</b>             | energy accumulation, renewable energy sources, photovoltaic power plant, accumulator, capacity, comparison of systems  |
| <b>Anotace:</b>              | Práce se zabývá problematikou akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů. První část práce je zaměřena na představení několika typů aktuálně využívaných systému pro akumulaci energie a jejich porovnání. Další část se věnuje návrhu bilance systému fotovoltaické elektrárny s vhodnými možnostmi akumulace energie v korelaci s časovým průběhem spotřeby elektrické energie. Poslední část práce se zaměřuje na ekonomické zhodnocení a posouzení proveditelnosti navrženého řešení.   |
| <b>Abstract:</b>             | The work addresses the issue of accumulating electrical energy from renewable sources. The first part of the work focuses on introducing several types of currently utilized energy storage systems and their comparison. The following section deals with designing the balance of a photovoltaic power plant system with suitable energy storage options in correlation with the temporal consumption of electrical energy. The final part of the work concentrates on the economic evaluation and assessment of the feasibility of the proposed solution. |

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce panu Ing. Matěji Vodičkovi za jeho odborné vedení, cenné rady, a především za vynaložený čas, který mi byl během vypracování práce ochoten věnovat. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu, které se mi během celého studia dostávalo.

# Obsah

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | Úvod .....  | 9  |
| 2.    | Obnovitelné zdroje energie využívané v ČR .....     | 10 |
| 2.1   | Energie slunečního záření.....                      | 11 |
| 2.1.1 | Fotovoltaické panely .....                          | 14 |
| 2.2   | Energie větru .....                                 | 15 |
| 2.2.1 | Větrná elektrárna .....                             | 15 |
| 2.2.2 | Větrné podmínky v České republice.....              | 17 |
| 3.    | Možnosti akumulace elektrické energie .....         | 19 |
| 3.1   | Přečerpávací vodní elektrárny.....                  | 19 |
| 3.2   | CAES .....  | 21 |
| 3.3   | Setrvačníky .....                                   | 22 |
| 3.4   | Olověné akumulátory .....                           | 23 |
| 3.5   | Alkalické akumulátory .....                         | 24 |
| 3.5.1 | Nikl – ocelové akumulátory .....                    | 24 |
| 3.5.2 | Nikl – kadmiové akumulátory.....                    | 24 |
| 3.5.3 | Lithium – iontové akumulátory .....                 | 25 |
| 3.6   | Průtokové baterie.....                              | 26 |
| 3.7   | Superkondenzátory .....                             | 27 |
| 3.8   | Akumulace pomocí vodíku .....                       | 28 |
| 3.8.1 | Polymer-elektrolytové palivové články (PEMFC).....  | 30 |
| 3.8.2 | Alkalické palivové články (AFC).....                | 30 |
| 3.8.3 | Palivové články s kyselinou fosforečnou (PAFC)..... | 30 |
| 3.8.4 | Palivové články s tavenými uhličitany (MCFC) .....  | 30 |
| 3.8.5 | Palivové články s tuhými oxidy (SOFC) .....         | 31 |
| 4.    | Porovnání parametrů akumulačních systémů.....       | 32 |
| 5.    | Návrh Akumulačního systému.....                     | 33 |
| 5.1   | Návrh fotovoltaické elektrárny.....                 | 34 |
| 5.2   | Porovnání zatížení a výroby .....                   | 38 |
| 5.3   | Návrh systému akumulace .....                       | 40 |
| 5.4   | Výpočet velikosti akumulace.....                    | 40 |
| 5.5   | Výběr akumulačního systému .....                    | 41 |
| 5.5.1 | Olověné akumulátory .....                           | 42 |
| 5.5.2 | Li-Ion Akumulátory .....                            | 43 |

|  |    |
|--|----|
| 5.5.3 Průtokové baterie.....                           | 44 |
| 6 Ekonomické zhodnocení akumulace .....                | 45 |
| 6.3 Variabilní analýza.....                            | 46 |
| 6.2 Závislost návratnosti na instalovaném výkonu ..... | 47 |
| 6.3 Ekonomické vyhodnocení.....                        | 49 |
| 7 Závěr .....  | 50 |
| Seznam použitých zdrojů.....                           | 52 |
| Seznam obrázků .....                                   | 59 |
| Seznam tabulek .....                                   | 60 |

# Seznam použitých zkratk a symbolů

|           |  |
|-----------|--|
| OZE       | obnovitelné zdroje energie   |
| FVE       | fotovoltaická elektrárna   |
| PVE       | přečerpávací vodní elektrárna                                      |
| CAES      | akumulace energie do stlačeného vzduchu                            |
| AACAES    | technologie pokročilého úložiště energie pomocí stlačeného vzduchu |
| EU        | Evropská unie  |
| PVC       | polyvinylchlorid   |
| PP        | polypropylen   |
| PE        | polyethylen  |
| NiCd      | nikl-kadmiové  |
| NiFe      | nikl-ocelové   |
| li-Ion    | lithium-iontové  |
| PTFE      | teflon   |
| VRB       | vanadium redoxní baterie   |
| ZnBr      | zinko-bromidová baterie  |
| PSB, Br/S | bromid sodná baterie   |
| EDLC      | electric Double Layer Capacitor                                    |
| PEMFC     | polymer-elektrolytové palivové články                              |
| AFC       | alkalické palivové články  |
| PAFC      | palivové články s kyselinou fosforečnou                            |
| MCFC      | palivové články s tavenými uhličitany                              |
| SOFC      | palivové články s tuhými oxidy                                     |
| PVGIS     | Photovoltaic Geographical Information Systém                       |
| ČNB       | Česká národní banka  |
| EUR       | euro   |



# 1. Úvod

V současné době, kdy se ve světě rozšiřuje povědomí o potřebě snížení závislosti na fosilních palivech a zároveň stoupá celková spotřeba elektrické energie se klade čím dál vyšší důraz na využití obnovitelných zdrojů energie, a proto se zvyšuje jejich celkový podíl v energetickém mixu. Obnovitelné zdroje energie, mezi něž se řadí solární, větrné, vodní a geotermální zdroje a biomasa, mají obrovský potenciál dodávat čistou energii do našich sítí s mnohem menším dopadem na životní prostředí v porovnání s fosilními palivy. Nicméně kvůli jejich závislosti na přírodních podmínkách je využití především sluneční a větrné energie složitější kvůli jejich proměnlivosti v produkci energie. Tato proměnlivost v produkci se dá nahradit odběrem energie z jiných zdrojů, nicméně kvůli zvyšujícímu se podílu těchto zdrojů na celkovém výkonu v rozvodné síti nabývá problém jejich proměnlivé produkce na významu. Jako řešení tohoto problému se nabízí možnost akumulace energie. Toto řešení počítá s tím, že energii, která se okamžitě nevyužije v době s menší poptávkou, uložíme v akumulačním systému a využijeme ji v době s nízkou produkcí. Tímto řešením můžeme vyrovnat fluktuace v produkci energie, které obnovitelné zdroje vytvářejí bez využití jiného zdroje.

Cílem práce je navrhnout systém akumulace elektrické energie, který by byl schopen pojmout přebytečnou energii, kterou v průběhu dne vyrobí fotovoltaická elektrárna. Řešení cílí na to, aby fotovoltaická elektrárna byla schopna během svého denního provozu v nejjasnějším dni v roce vyrobit dostatek energie k pokrytí celkového zatížení v tomto dni. Systém akumulace energie se postará o to, aby v hodinách, kdy je výkon z elektrárny vyšší než odběr ze sítě, byla přebytečná energie akumulována a následně využita v hodinách s nedostatečnou produkcí.

V řešení bude porovnáno několik systémů akumulace energie a zhodnocen jejich ekonomický aspekt a celková proveditelnost projektu.

## 2. Obnovitelné zdroje energie využívané v ČR

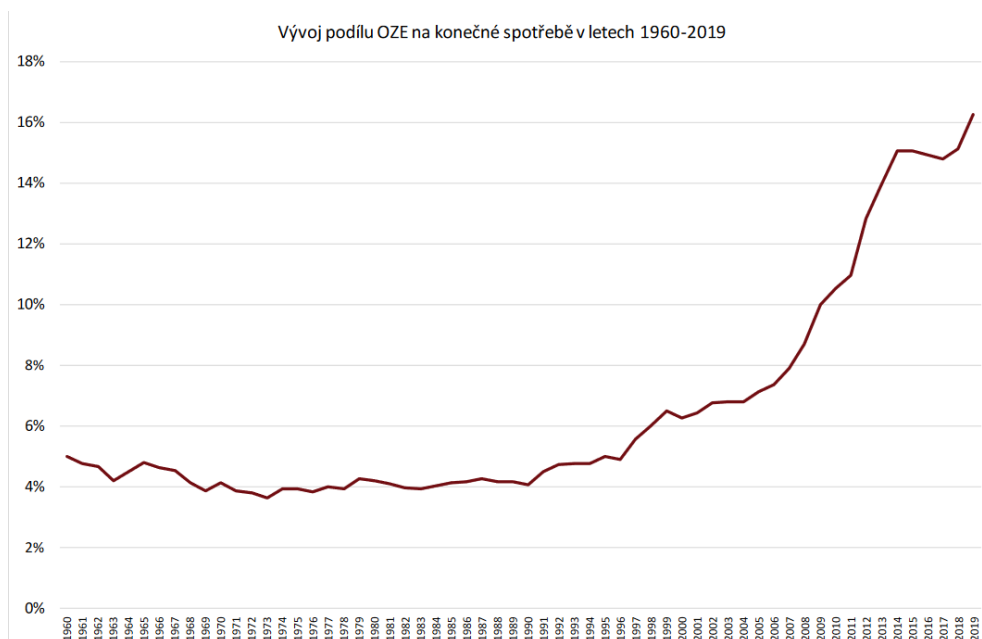
Definice obnovitelných zdrojů energie podle zákona o životním prostředí 17/1992 Sb: §7, odstavec (2), zní následovně:

Obnovitelné přírodní zdroje mají schopnost se při postupném spotřebování částečně nebo úplně obnovovat, a to samy nebo za přispění člověka. Neobnovitelné přírodní zdroje spotřebováváním zanikají. [1]

Mezi tyto zdroje energie zařazujeme energii slunečního záření, větru, biomasy, energii vody a také geotermální teplo.

Vzhledem k tomu, že při výstavbě elektrárny, která pracuje na principu obnovitelného zdroje energie je vyžadováno brát v úvahu mnoho faktorů a jedním z nich a asi tím nejdůležitějším je ekonomická bilance, se nedá s geotermální energií kvůli jejím vysokým nákladům v České republice v blízké době počítat. Podobně tomu je i u vodní energie, kdy doposud nevyužité potenciální lokality na vodních tocích jsou ekonomicky méně výhodné než jiné zdroje energie, a budoucí vývoj vodní energie se bude týkat spíše navyšování výkonu či efektivity na již postavených vodních elektrárnách. V případě využití biomasy pro energetické účely se nejčastěji používají suroviny, jako jsou dřevo, energetické plodiny nebo zemědělské odpady. Ty se vyznačují poměrně malou energetickou hustotou, a jsou proto potřeba k místu využití svážet z velkých vzdáleností. Díky tomu mají zdroje na biomasu oproti ostatním obnovitelným zdrojům větší dopad na životní prostředí a jejich výkony nelze zvyšovat neomezeně. Proto do budoucna musíme v podmínkách České republiky počítat spíše s energií solární a větrnou, a z toho důvodu se bude další část práce věnovat pouze těmto dvěma obnovitelným zdrojům energie.

Kvůli zhoršujícímu se stavu životního prostředí se v dnešní době na obnovitelné zdroje energie klade na mezinárodním poli čím dál větší důraz. V souvislosti s tímto problémem zaznamenáváme zvyšující se podíl obnovitelných zdrojů na celkové výrobě elektrické energie. Tento vývoj je patrný v porovnání podílu konečné spotřeby energie z obnovitelných zdrojů podle metodiky EUROSTAT-SHARES, který v roce 2010 činil 10,51 % v porovnání s 16,24 % v roce 2019. Tento zvyšující se trend bude i nadále pokračovat vzhledem k tomu, že Česká republika je na základě revidované směrnice o podpoře využívání OZE (2009/28/ES) a závazků z ní plynoucí povinna zvýšit svůj podíl obnovitelných zdrojů na hrubé konečné spotřebě energie pro rok 2020 na 13 %. Tohoto cíle Česká republika dosáhla už v roce 2019, kdy tento podíl činil již zmiňovaných 16,24 %. Do roku 2030 si Evropská unie stanovila cíl tento podíl zvýšit na 30 % pro koncovou spotřebu energie celé Evropské unie. [2]



Obrázek 1: Vývoj podílu OZE na konečné spotřebě energie v České republice v letech 1960-2019 [2]

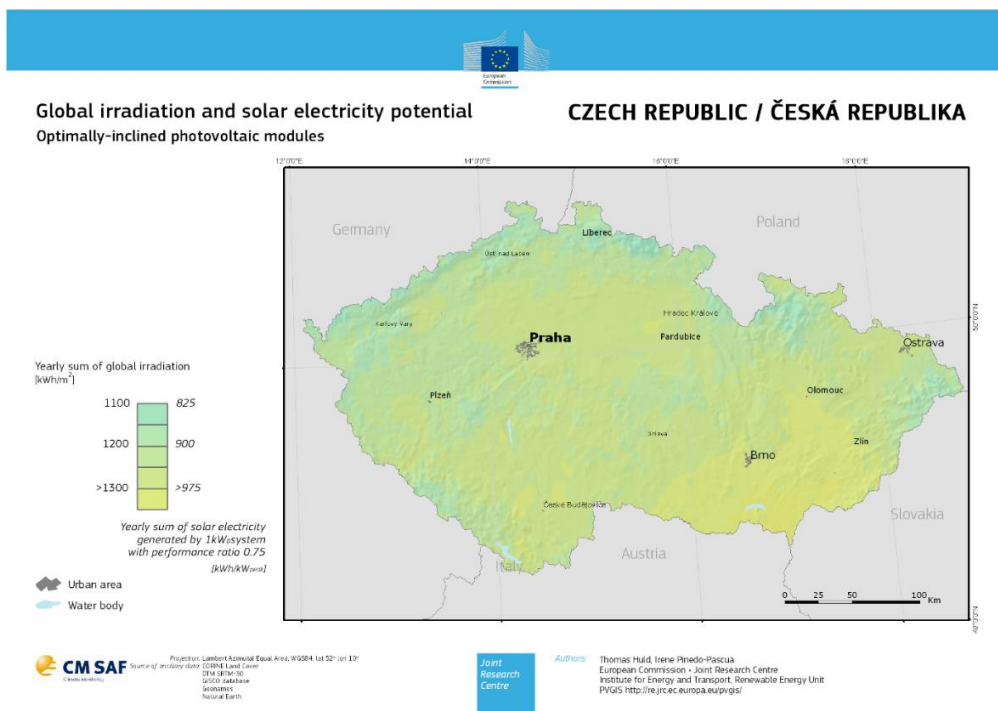
## 2.1 Energie slunečního záření

I když na naši planetu dopadá jen zlomek z celkového výkonu vyzařovaného Sluncem, je pro nás sluneční energie nejdůležitějším zdrojem energie. Vzniká jadernými přeměnami v jádru Slunce a v našem časovém rámci se jedná o nevyčerpatelný zdroj energie, proto se označuje za zdroj obnovitelný. Sluneční energie je využívána skrz různé procesy jako obnovitelný zdroj energie, avšak ve spojení s přírodními procesy a časem dala za vznik i fosilním palivům, které dnes pohánějí moderní civilizaci, ale proto, že k přirozenému obnovení těchto zdrojů dochází v řádů milionů let, se nedá z našeho pohledu mluvit o obnovitelných zdrojích energie. [3] [12]

Sluneční energie dopadající na povrch Země nedopadá všude se stejnou intenzitou. Míra jejího využití závisí i na klimatických podmínkách jednotlivých částí zemského povrchu. V neposlední řadě je samozřejmě ovlivněno i lokálním počasím, ročním obdobím a měnicím se cyklem dne a noci. Tuto energii poté využíváme pomocí solárních kolektorů na výrobu tepla, nebo pomocí fotovoltaických panelů k výrobě elektrické energie.

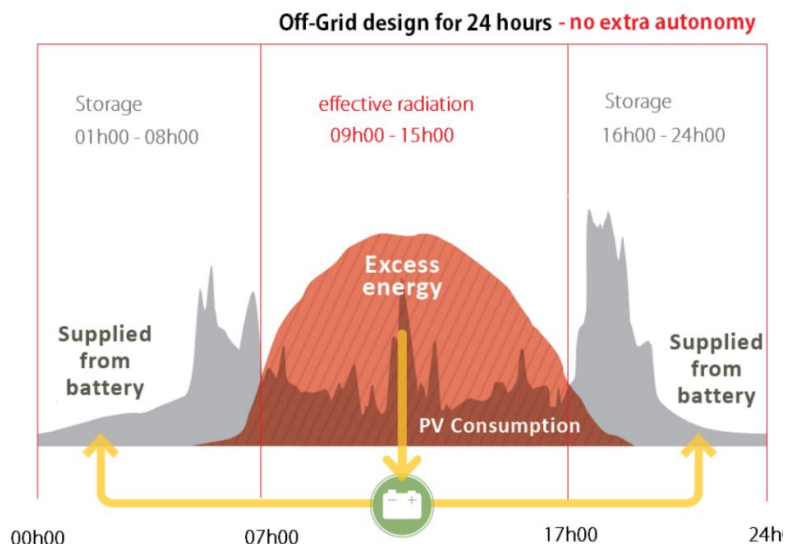
V České republice jsou dobré podmínky na využití slunečního záření i přesto, že během roku množství sluneční energie kolísá a největší množství energie na povrch dopadá v letním období, kdy je spotřeba tepla nejnižší. Během roku dopadne kolmo na 1 m<sup>2</sup> 800-

1300 kWh solární energie. Na Obrázku 2 je vidět průměrný dopad slunečního záření na našem území. [4]



Obrázek 2: Průměrný dopad slunečního záření na území České republiky [5]

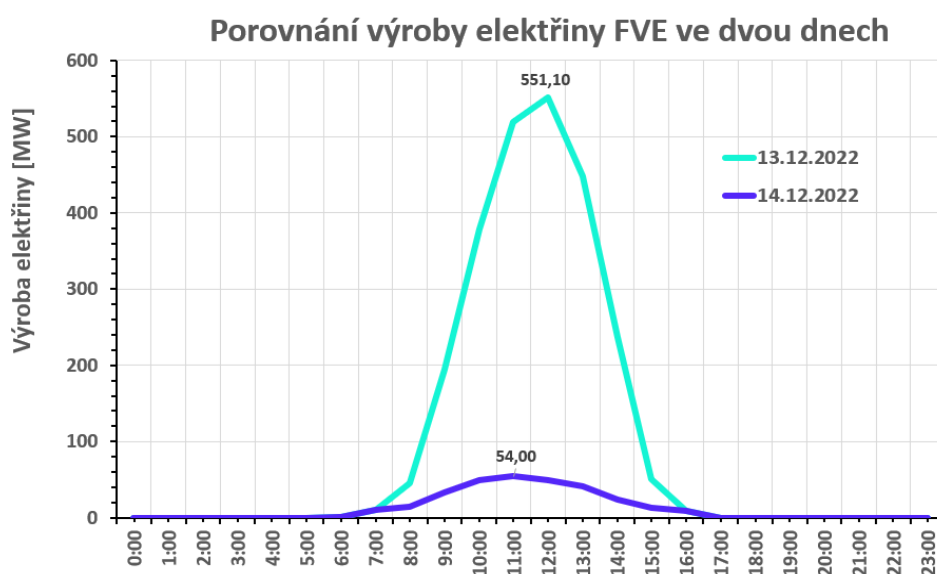
Bohužel toto kolísavé množství dopadající sluneční energie, které je úměrně spjato s výrobou elektrické energie, pociťujeme i během dne. Největší množství energie zachytáváme během poledne, naopak nejméně během rána a navečer, kdy je v elektrické rozvodné síti největší odběr elektrického proudu. Z tohoto důvodu je nutné pro efektivní využití fotovoltaické technologie počítat i s akumulací energie z doby, kdy produkce převyšuje spotřebu, a pomocí této akumulace tedy vyrovnávat čas, kdy je produkce nedostatek. Na ilustračním Obrázku 3 je vidět příklad přebytku vyrobené elektrické energie, který je potřeba akumulovat na hodiny s větší spotřebou, ale s nízkou produkcí.



Obrázek 3: Výroba elektrické energie z fotovoltaiky v průběhu dne [8]

Tato kolísavá produkce elektrické energie může být během dne ještě z velké části ovlivněna aktuálním počasím, které má na funkci fotovoltaických panelů zásadní vliv. Roční rozdíly ve výrobě způsobené proměnlivým počasím mohou dosahovat až k desítkám procent. Výrazný vliv poté může mít i nakupená vrstva sněhu nebo jiných nečistot, proto panely s nízkým sklonem musí být pravidelně udržovány.

Tento extrémní rozdíl ve výkonu fotovoltaických elektráren na našem území můžeme vidět na Obrázku 4, kde rozdíl maximálního naměřeného výkonu během dvou po sobě jdoucích dnů, kdy v jednom bylo slunečno a v druhém zataženo se sněžením, může dosahovat až desetinásobku.



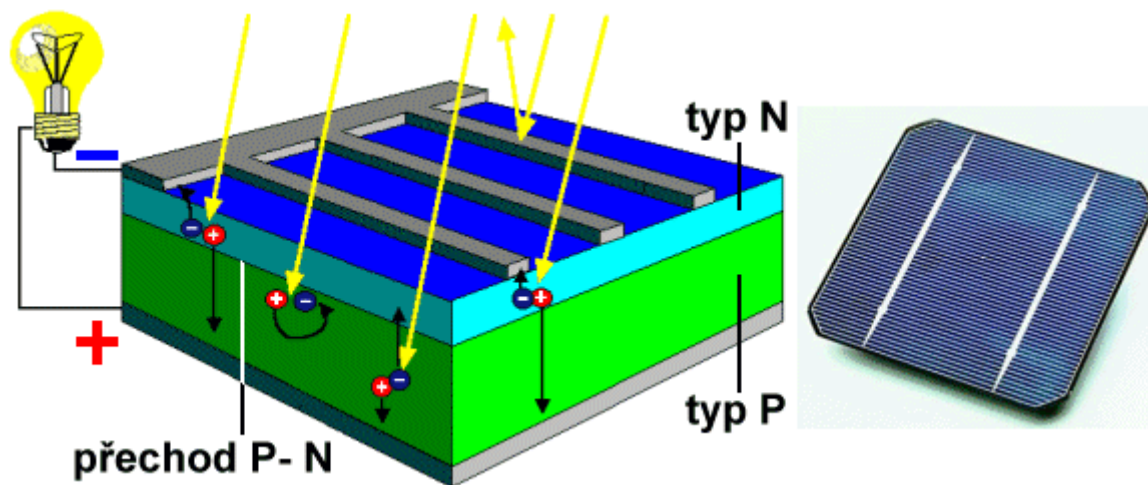
Obrázek 4: Porovnání výroby elektřiny z FVE ve dvou dnech vůči vlivu počasí, data převzata z [10]

## 2.1.1 Fotovoltaické panely

K využití solární energie na výrobu energie elektrické používáme fotovoltaické panely. Fotovoltaický článek je v podstatě polovodičová fotodioda s PN přechodem, nejlépe vyrobená z křemíku, jejímž úkolem je přeměnit dopadající energii ve formě slunečního záření na energii elektrickou pomocí fotovoltaického jevu.

Jeho základem je tenká křemíková vrstva s vodivostí typu P, na níž se poté vlivem dopadajícího slunečního záření uvolňují záporné elektrony. Tyto elektrony poté začnou přecházet do vrstvy N. Na přechodu těchto dvou vrstev začne díky rozdílu potenciálů vznikat elektrické napětí. Dále jsou u článku umístěny elektrody, na horní straně je anoda a na spodní je katoda.

Vzhledem k tomu, že samostatný fotovoltaický článek má napětí kolem 0,5V, což je relativně málo, v praktickém použití se využívá většího počtu fotovoltaických článků, které jsou sériově a paralelně spojeny do jednotlivých panelů. Díky tomuto uspořádání dosahuje napětí panelu hodnot v rozmezí 12 až 100 V. [13] [32]



Obrázek 5: Princip funkce solárního panelu [6]

## 2.2 Energie větru

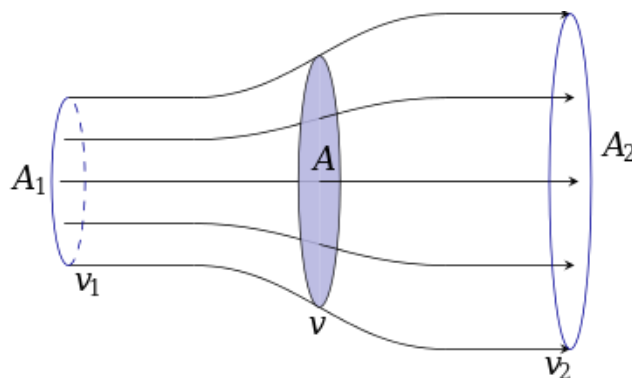
Větrná energie je další důsledek dopadající solární energie ze Slunce. Vzhledem k tomu, že Slunce ohřívá povrch Země, ohřívá i vzduch nad ním. Teplý vzduch s menší hustotou, než vzduch studený stoupá vzhůru a studený vzduch místo něj klesá dolů, tím vzniká rozdíl 2 tlaků, a tedy i vítr. Čím větší rozdíl tlaků vznikne, tím silnější vítr mezi nimi proudí. Výroba elektrické energie vysoce závisí na rychlosti proudícího vzduchu, a tedy i na topografii okolní krajiny.

Při realizaci větrné elektrárny se ale musí brát v úvahu i legislativní omezení chránící životní prostředí v chráněných krajinných oblastech či v blízkosti lidských osídlení, což množství potenciálně zajímavých lokalit na instalaci značně omezuje. I tak se ale na našem území najdou oblasti, které umožňují smysluplnou realizaci instalace větrných elektráren. Bohužel vývoj větrné energie se na našem území prakticky zastavil zhruba před deseti lety.

### 2.2.1 Větrná elektrárna

Větrná elektrárna se skládá ze základu, stožáru, gondoly a rotoru. Hlavním úkolem větrné elektrárny je přeměna větrné energie na energii elektrickou. Tuto činnost zajišťuje turbína, která je přes hřídel spojena s generátorem, který vyrábí elektrickou energii. Teoretické maximální množství energie, které lze z větru prostřednictvím turbíny získat, nám popisuje takzvaný Betzův zákon.

Odebraná kinetická energie větru se projeví ve snížení rychlosti větru po průchodu turbínou.



Obrázek 6: Změna rychlosti větru před a za turbínou

Výkon nerušeného toku větru popisuje rovnice 1.

$$P_v = A \cdot v_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^3 \quad (W) \quad (1)$$

Dále je nutné získat výkon, který se větru odebere při průchodu turbínou, tento výkon nám popisuje rovnice 2

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_2^2 - v_1^2) \cdot A \cdot \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (W) \quad (2)$$

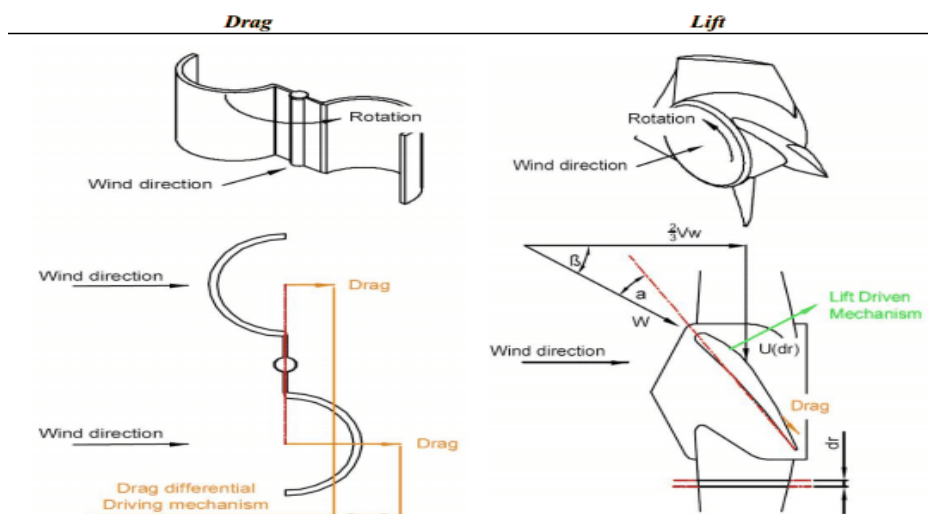
Vzeme-li poměr těchto dvou veličin, získáme takzvanou Betzovu konstantu značenou  $C_p$  a vyjádřenou vztahem 3.

$$C_p = \frac{P}{P_v} = \frac{1}{2} \cdot (1 + x) \cdot (1 - x^2) \quad (3)$$

$$x = \frac{v_2}{v_1}, x \in [0,1] \quad (4)$$

Za koeficient  $x$  dosadíme poměr rychlostí, jak je zobrazeno v rovnici 4, a zjistíme, že tato rovnice má své maximum při hodnotě  $x = 1/3$ . Tato hodnota nám říká, že ideální poměr rychlostí za a před turbínou je roven  $1/3$ . Při dosazení této hodnoty do rovnice 3 dostaneme výsledek 0,593, který nám říká, že maximální získatelný výkon větru činí 59,3 % z celkového výkonu větru procházejícího turbínou. Tohoto teoreticky maximálního výkonu ale v praxi nikdy nedosáhneme, můžeme se mu pouze přiblížit s tím, že v dnešní době se tato hodnota pohybuje okolo 20 až 35 %. [11]

Vzhledem k nestálosti rychlosti větru pohánějícího vrtuli nedosahuje větrná elektrárna po většinu své provozní doby nominálních hodnot generovaného výkonu. Větrné elektrárny můžeme rozlišovat podle profilového tvaru jejich listů na rotoru, které jsou speciálně uzpůsobeny pro práci na principu vztahové, nebo odporové síly, jak je ilustrativně znázorněno na Obrázku 7. [11]

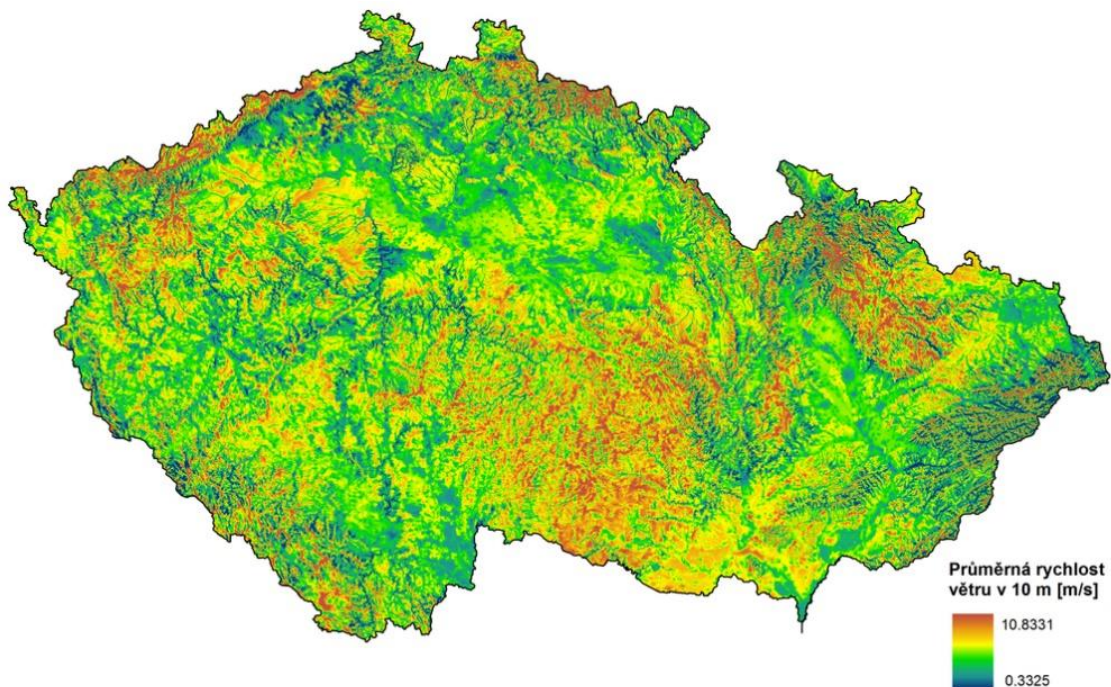


Obrázek 7: Princip fungování turbíny pomocí odporové, nebo vztahové síly. [15]



## 2.2.2 Větrné podmínky v České republice

Větrná mapa České republiky na Obrázku 8 zobrazuje potenciálně vhodné lokality s dostatečnou průměrnou rychlostí větru na instalaci větrných elektráren. Největší potenciál na výstavbu mají kraje Jihomoravský, Vysočina a Moravskoslezský, nicméně z tohoto seznamu musíme vynechat lokality omezené legislativami ochraňující životní prostředí chráněných krajinných oblastí nebo oblasti s hustším osídlením, kde většinou výstavba čelí většímu odporu místních obyvatel, na které by mohla mít vliv hluchost elektráren. Tato omezení nám eliminují značně velkou potenciální oblast na instalaci. Realisticky se tedy nejlépe jeví na instalaci kraj Ústecký, Liberecký a Karlovarský, v nichž už větší množství větrných elektráren stojí.



Obrázek 8: Mapa průměrné rychlosti větru v 10 m. [7]

Instalovaný výkon větrných elektráren pro rok 2019 činil 339 MW, což odpovídá 0,7 TWh elektrické energie. To odpovídalo zhruba 1 % z celkové spotřeby v České republice, která byla v roce 2019 66,9 TWh. Tento podíl se od té doby příliš nezměnil, protože na rozdíl od EU nebyly v posledních letech na našem území i přes existující potenciál vystavěny žádné nové větrné elektrárny. Nicméně v aktuální době, kdy energie z obnovitelných zdrojů nabývá v Evropské unii na významu, a tudíž i na podpoře, měl by se tento trend zvrátit. Aby Česká republika splnila podmínky budoucího Evropského energetického mixu, ke kterému se zavázala, bude se muset výstavba nových větrných elektráren opět řešit. [9]

Podobně jako u fotovoltaické elektrárny je i větrná elektrárna postižena problémem týkající se stálosti výroby elektrické energie vlivem přírodních podmínek, které nelze ovlivnit. I když při návrhu počítáme s průměrnou rychlostí větru v dané lokalitě, musíme brát v potaz i tento jev proměnlivé výroby, a tedy stejně jako u fotovoltaiky kompenzovat časové úseky s nedostatečným aktuálním výkonem v rozvodné síti pomocí jiných zdrojů energie nebo opět nějakou formou akumulace energie. Na Obrázku 9 je zobrazena celková výroba elektrické energie z větrných elektráren během jednoho dne a je zde názorně vidět příklad, kdy se v jednotlivých hodinách dne mohl lišit výkon až o 80MW. Tento nedostatek tedy musel být nahrazen výrobou z jiných zdrojů.



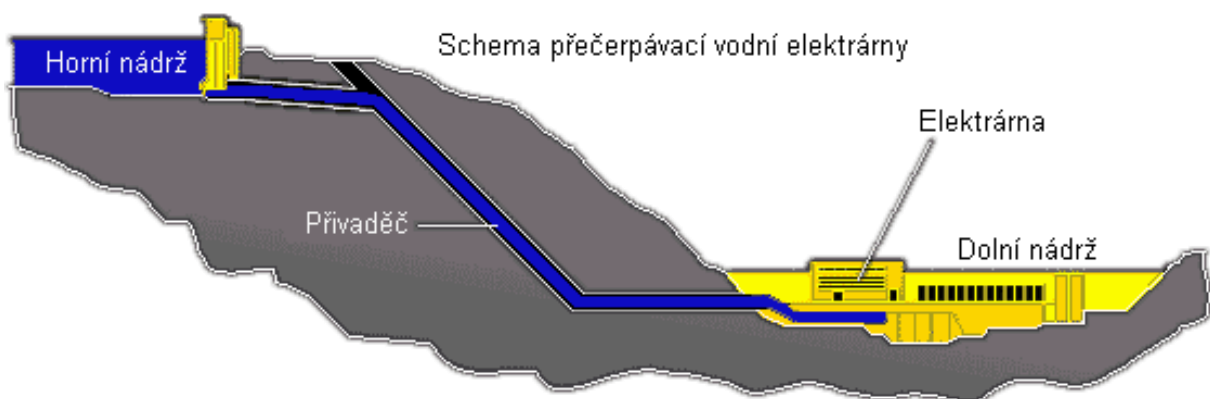
Obrázek 9: Celková výroba elektrické energie z větrných elektráren na území České republiky ke dni 1.11.2022 [10]

### 3. Možnosti akumulace elektrické energie

V dnešní době se využívá několik způsobů akumulace energie. Každý z nich je ideální pro využití v konkrétních podmínkách v závislosti na různých druzích aplikace. Tyto systémy se mezi sebou liší hlavně v tom, v jaké formě energii ukládají. Například klasické akumulátory ukládají energii v elektrochemické formě. Dále se provozují systémy, které energii ukládají v mechanické formě, jako jsou například přečerpávací elektrárny nebo setrvačnický. V neposlední řadě se provozují ještě superkapacitory, které využívají ukládání ve formě elektrické energie. V následující kapitole budou popsány jednotlivé možnosti akumulace a jejich celkové srovnání.

#### 3.1 Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárna (dále jen „PVE“) funguje na principu dvou vodních nádrží, které jsou umístěné ve dvou různých výškách. Rozdíl těchto dvou hladin nám poté vytváří spád, který je jednou z hlavních vlastností PVE. Tyto dvě nádrže jsou vzájemně propojeny potrubím, ve kterém je umístěno hnací soustrojí, jehož hlavním komponentem je reverzní turbína, která dokáže vykonávat jak funkci turbíny, tak i čerpadla. V době s přebytkem elektrické energie v rozvodné síti turbína funguje na principu čerpadla a čerpá vodu ze spodní nádrže do horní. V této nádrži je voda uskladněna a zůstává zde až do doby, kdy je zvýšená poptávka po elektrické energii. V tu chvíli se voda z horní nádrže vpustí zpátky do potrubí a díky spádu získává energii a pod vysokým tlakem roztáčí turbínu s alternátorem, který vyrábí požadovaný elektrický proud. Vzhledem ke ztrátám při čerpání vody a poté i samotné výrobě elektrické energie se účinnost PVE v dnešní době pohybuje kolem 75 %. Uspořádání přečerpávací vodní elektrárny je naznačeno na Obrázku 10. [39]



Obrázek 10: Schéma uspořádání PVE v terénu. Převzato z [16]

V dnešní době je PVE nejlepším prostředkem, jak ukládat a využívat přebytečnou energii jak za cílem řešení vyrovnaní výkyvů ve spotřebě elektrické energie, tak i v případě ukládání elektrické energie vyrobené v době, kdy je její výroba levnější. I z tohoto důvodu jsou na našem území PVE využívány hlavně ve spojení s jadernými elektrárnami. Ty jsou většinu své provozní doby díky svým nízkým nákladům na provoz a složité regulaci provozovány v režimu maximálního výkonu. Jejich nepřetržitý provoz trvá i v noci, kdy se vyrobená energie nespotřebuje, a tudíž je její cena na trhu s energiemi nízká. Díky následnému prodeji energie za vyšší ceny ve špičce se zvýšenou spotřebou se stávají PVE ekonomicky efektivními, i přes jejich ztráty při přečerpávání. Výkyvy spotřeby v elektrické síti lze pomocí PVE dobře regulovat i díky tomu, že plný výkon jsou některé systémy PVE schopny dodávat už za 100 sekund. [17] [16]

PVE má bohužel i několik zásadních nevýhod a tou největší je její samotná výstavba. Základní komponenty PVE, kterými jsou dvě velké nádrže s rozdílnou výškou umístění, vyžadují, aby byla PVE umístěna na dost specifickém místě, a to v kopcích nebo horách. Takové místo však mnohdy nemusí být dobře terénně přístupné a problém může dělat i napojení na rozvodnou síť. Stavba tudíž vyžaduje další zásah do krajiny, a to může být v rozporu s místními vyhláškami o ochraně životního prostředí. Ideálních míst na realizaci PVE v České republice tudíž není mnoho a samotná stavba se stává velmi nákladnou.

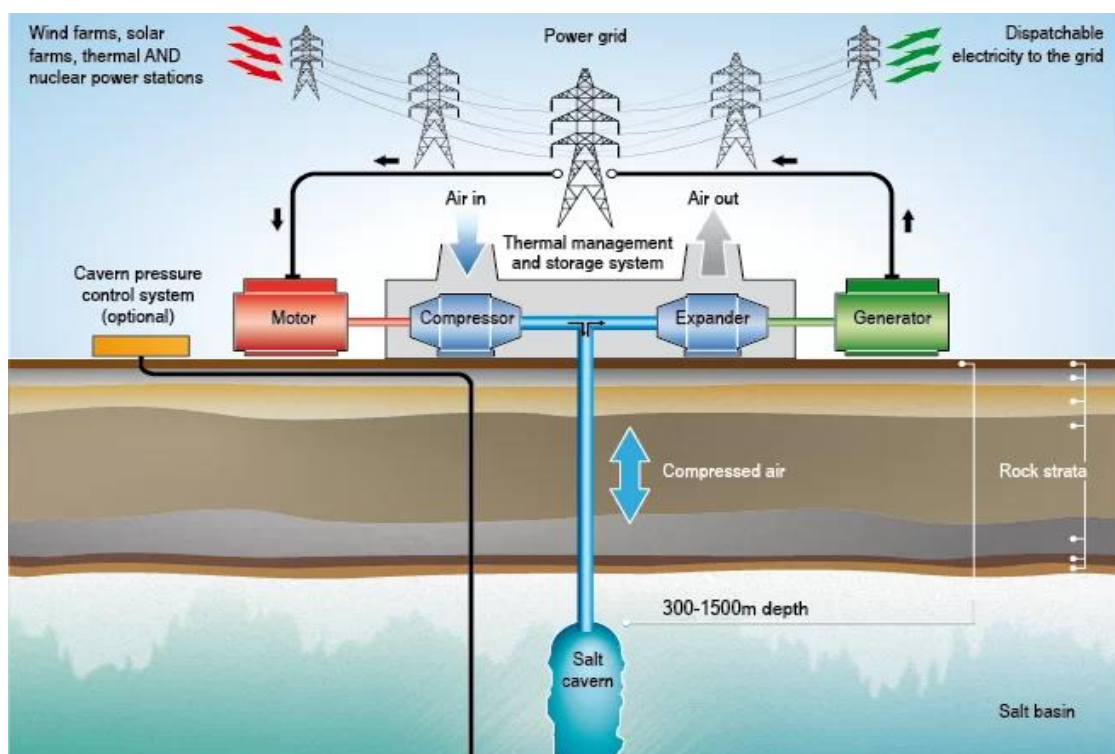
V České republice máme vystaveno několik PVE v čele s PVE Dlouhá stráně s největším výkonem 650 MW. Tato PVE je vlastněna skupinou ČEZ a nachází se u obce Loučná nad Desnou v okrese Šumperk. PVE disponuje nádržemi s výškovým rozdílem 510,7m. Horní nádrž se nachází v nadmořské výšce 1350 m a má provozní objem 2 580 000 m<sup>3</sup>. Hnací turbosoustrojí jsou uložena v podzemí a skládají se ze dvou reverzních Francisových turbín, každé o výkonu 325 MW. Celková účinnost přečerpávacího cyklu činí 76 %. [16] [19]



Obrázek 11: Ilustrační obrázek horní nádrže PVE Dlouhé stráně [19]

## 3.2 CAES

Systém CAES (Compressed air energy storage) pracuje na principu stlačování vzduchu pomocí kompresoru a jeho princip je podobný jako u přečerpávací vodní elektrárny. Systém využívá přebytečnou energii, která pohání kompresor, který stlačuje vzduch do objemných a dobře utěsněných prostor. Využívají se umělé zásobníky, ale i přírodní jeskyně nebo dutiny a doly vzniklé po těžbě. Díky těmto velkým prostorům se dá uložit relativně velké množství energie. Jakmile je potřeba elektrická energie, stlačený vzduch je vpuštěn na turbínu, která prostřednictvím generátoru začne vyrábět elektrický proud. [17] [20]



Obrázek 12: Princip fungování akumulární elektrárny CAES bez spalování přídavného paliva [23]

První zařízení na principu CAES bylo uvedené do provozu v německém Huntorfu roku 1974. Využívá jeskynní komplex bývalého solného dolu o kapacitě 310 000 m<sup>3</sup> s hloubkou dosahující až 600 m, kde je stlačený plyn skladován při tlaku 50 až 70 barů. Zařízení běží v denních 8hodinových cyklech a pomocí turbíny dokáže vyrábět elektrický proud při výkonu až 290MW po dobu 2 hodin. [21]

Systém CAES může být provozován ve dvou variantách, kdy v prvním případě pracuje na principu výroby elektrické energie pomocí spalovací plynové turbíny, která využívá spalování směsi naakumulovaného vzduchu a malého množství paliva. Nevýhodou této koncepce je ztráta naakumulované energie, kdy je stlačený vzduch využíván k pohonu

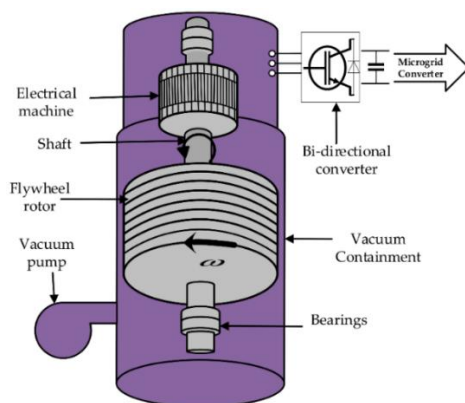
kompresoru, a nikoli k zpětné výrobě eklektické energie. Z tohoto důvodu se dnes využívá moderní koncepce, kdy se odděluje provoz turbíny a kompresoru, které pracují nezávisle. Pro pohon kompresoru je využíván uložený stlačený vzduch nebo elektromotor, který odebírá silovou elektřinu v době nižší obchodní ceny, převážně v noci. Díky této separaci je možné při výrobě elektrické energie expanzí stlačeného vzduchu využívat plný výkon plynové turbíny bez zátěže kompresorem. Dalším problémem pak může být vznikající teplo při stlačování vzduchu, které snižuje efektivitu a může vést k poškození zařízení. Tento problém se snaží vyřešit vylepšení stlačovacího procesu nazývané AACAES. Toto řešení extrahuje teplo, které se vytváří ve fázi stlačování, následně ho ukládá a během procesu expanze se nahromaděné teplo používá k ohřevu stačeného plynu, který poté pohání turbíny. Toto řešení je ale zatím stále ve vývoji a má za cíl zlepšit efektivitu celého procesu až na 70 %. [17] [22]

### 3.3 Setrvačníky

Setrvačnick se řadí mezi mechanické akumulátory energie s vysokou účinností a je historicky jeden z nejstarších akumulátorů vůbec. Funguje na principu uchování kinetické energie. Hlavní součástí setrvačnicku je elektromotor, který je připojený na zdroj elektrické energie a roztáčí setrvačnick s velkou hmotností. Při potřebě odběru energie se elektromotor začne chovat jako generátor a uchovaná energie v otáčejícím se setrvačnicku začne prostřednictvím generátoru vyrábět elektrický proud. [17] [20]

Díky jejich jednoduché konstrukci, spolehlivosti a rychlosti přepnutí do fáze výroby energie se setrvačnick často využívají k překonání krátkodobých výpadků v elektrické síti, které mohou způsobit velké škody v řídicích a počítačových systémech v zařízeních, jako jsou například nemocnice nebo datová centra. Další zásadní výhodou setrvačnicků je, že díky své jednoduché konstrukci a nízkým nárokům na údržbu mají dlouhou životnost mnoha pracovních cyklů, při kterých dokážou vyrobit relativně velký výkon, avšak po kratší dobu. [17] [20]

Moderní setrvačnick jsou vyrobeny z lehkých materiálů, jako jsou například uhlíkové kompozity nebo vyztužené plasty. Aby setrvačnick mohl dosáhnout vysokých otáček v řádech tisíců otáček za sekundu, jsou setrvačnick uloženy ve speciálních magnetických ložiskách a obklopené vakuem nebo heliem, aby se odpor vzduchu snížil na minimum. Díky této konstrukci dosahují setrvačnick účinnosti až 90 %. [17] [20]

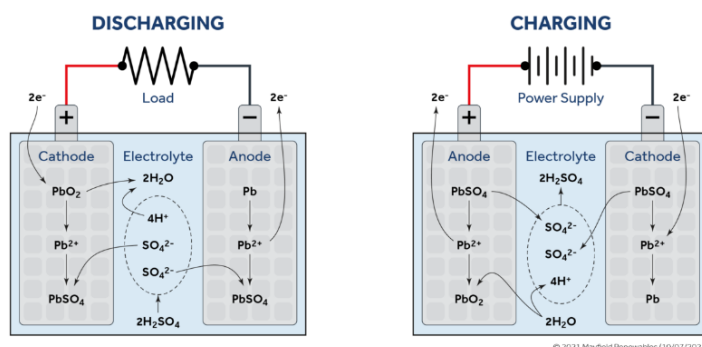


Obrázek 13: Konstrukce setrvačnickového akumulátoru [24]

### 3.4 Olověné akumulátory

Olověné akumulátory se v dnešní době řadí mezi nejrozšířenější způsoby akumulace energie. Své uplatnění najdou v mnoha aplikacích, například při startování spalovacích motorů u automobilů.

Pracují na principu uchování energie ve formě chemické energie. Olověný akumulátor je tvořen párem olověných desek, nazývaných elektrody, které jsou rozděleny separátorem, který zabraňuje kontaktu mezi elektrodami a následnému zkratu. Elektrody jsou ponořeny do elektrolytu tvořeným roztokem kyseliny sírové a vody. Na deskách nenabitého akumulátoru se usadí účinkem kyseliny síran olovnatý ( $\text{PbSO}_4$ ). Při nabíjení se po připojení jiného zdroje elektrického napětí na kladné elektrodě vytváří oxid olovičitý ( $\text{PbO}_2$ ), na záporné elektrodě se z usazené vrstvy síranu olovnatého ( $\text{PbSO}_4$ ) stává opět olovo a koncentrace kyseliny sírové v elektrolytu se zvyšuje. Při vybití probíhá reakce opačná a materiál elektrod reaguje s elektrolytem a na obou elektrodách vzniká síran olovnatý. V důsledku se koncentrace kyseliny sírové snižuje a v elektrolytu se zvyšuje podíl vody. [25] [17]



Obrázek 14: Princip vybití a nabíjení olověného akumulátoru [26]

Olověný akumulátor obsahuje jednotlivé články, které jsou tvořené párem elektrod s oddělenými separátory. Po ponoření do elektrolytu je každý článek schopen dodávat napětí 2,1 V. Pro širší použití je ovšem zapotřebí vyšší napětí, a proto jsou tyto články sériově zapojeny v nádobě. Nádoba akumulátoru musí být vyrobena z materiálu, který dokáže dlouhodobě odolat kyselině v elektrolytu, a proto se používají materiály, jako je PVC, PP nebo PE. Díky sériovému zapojení článků je akumulátor schopný dodávat napětí o velikosti 6, 12, 24 nebo 48 V a stále dosahovat vysoké účinnosti okolo 80 %. [17] [27]

Za hlavní výhody olověných akumulátorů lze považovat nízkou pořizovací cenu, možnost mnohonásobného opětovného nabíjení a spolehlivost s vysokou účinností. Mezi nevýhody se řadí citlivost na hluboké vybíjení, následkem kterého dochází ke snížení kapacity akumulátoru, dále samovybíjení a největší nevýhodou je nízká hustota uložené energie, kdy pro uložení vyššího množství energie je zapotřebí akumulátor s relativně vysokou hmotností. [20]

## **3.5 Alkalické akumulátory**

Vzhledem k nízké hustotě energie uložené v olověných akumulátorech se dnes vyvíjí alkalické akumulátory, které také využívají elektrolyt, ale v tomto případě na bázi hydroxidu draselného (KOH). Díky tomu, že dokážou ukládat až 3krát více energie na stejnou hmotnost co akumulátory olověné, využívají se alkalické akumulátory často v přenosné elektronice nebo v dnešní době rychle se rozvíjející elektromobilitě. [17]

### **3.5.1 Nikl – ocelové akumulátory**

Mezi alkalické akumulátory se řadí například nikl-ocelové akumulátory (NiFe), které se díky jejich snadné údržbě využívají v železniční dopravě. Fungují na stejném principu jako olověné akumulátory s tím rozdílem, že elektrody jsou vyrobeny z oceli a niklu a ponořeny jsou do elektrolytu na bázi hydroxidu draselného. Nikl-ocelové články dosahují napětí 1,4 V. [17]

### **3.5.2 Nikl – kadmiové akumulátory**

Dalším zástupcem alkalických akumulátorů je akumulátor nikl-kadmiový, označovaný NiCd. Stejně jako u nikl-ocelových akumulátorů je elektrolyt u nikl-kadmiových akumulátorů tvořen roztokem hydroxidu draselného, avšak kladná elektroda je na bázi niklu a záporná je tvořena



kadmiem. Díky své robustnosti, spolehlivosti a širokému rozsahu pracovních teplot při vybíjení jsou využívány například v elektrickém nářadí nebo drážní technice. [34]

Zásadní nevýhodou tohoto článku je takzvaný paměťový efekt, který je způsoben opakovaným neúplným vybíjením a má za následek snížení kapacity akumulátoru. Další výraznou nevýhodou je samotné využití kadmia, které je toxické, a je tedy nutné brát ohled na jeho recyklaci. I z tohoto důvodu se v dnešní době od použití tohoto druhu akumulátoru upouští. [34]

### 3.5.3 Lithium – iontové akumulátory

Do popředí se v dnešní době dostávají lithium-iontové akumulátory (Li-Ion), které díky využití lithia, jakožto nejtěžšího kovu v periodické soustavě prvků, dosahují vysoké energetické hustoty oproti ostatním alkalickým akumulátorům. Díky své nízké váze a relativně malým rozměrům nacházejí přední postavení při využití v přenosných zařízeních, jako jsou například mobilní telefony nebo notebooky, ale i v elektromobilitě nebo vysokokapacitním ukládání energie, kdy jejich sériovým a paralelním zapojením dosáhneme vyšších napětí a výkonů. [28] [29]

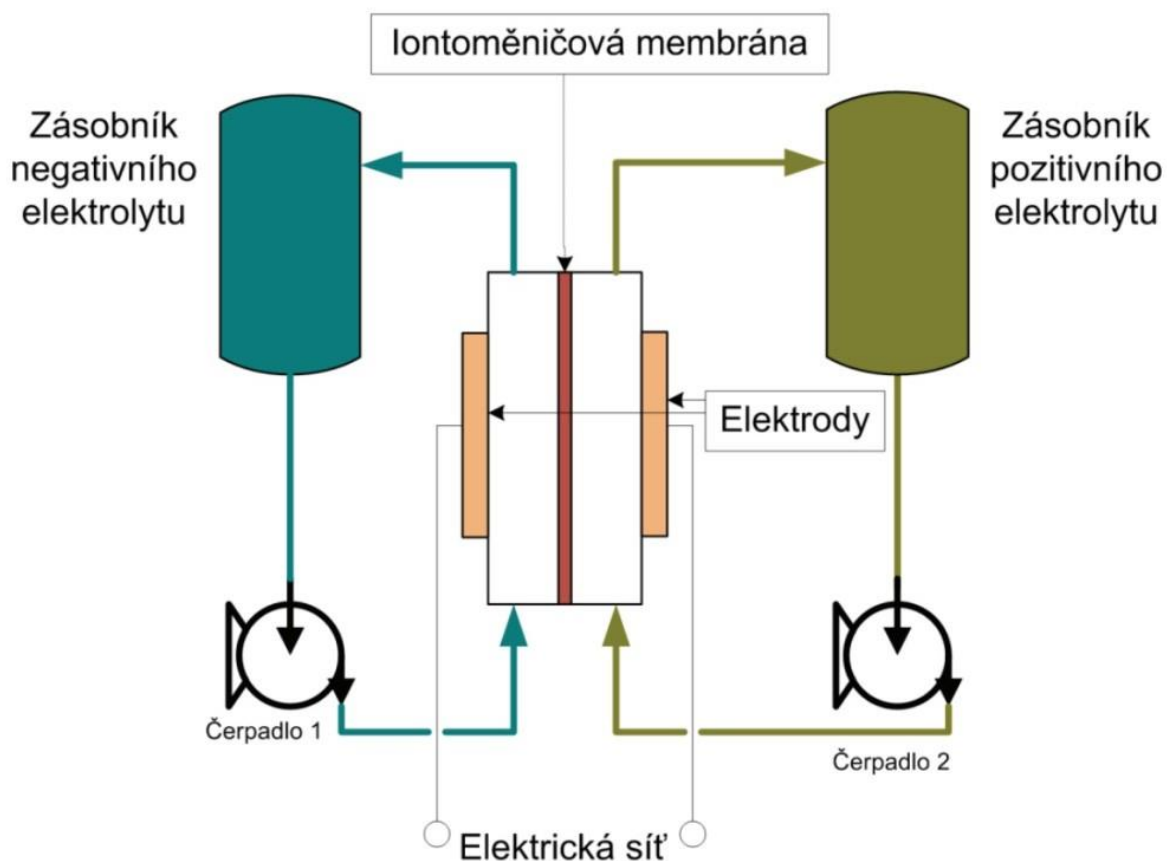
Akumulátor se jako ostatní alkalické akumulátory skládá ze dvou elektrod, separátoru a elektrolytu. Katoda, jakožto zdroj lithiových iontů, je tvořena sloučeninami lithia, jako je například  $\text{LiCoO}_2$  nebo  $\text{LiFe(PO}_4\text{)}$ . Jako materiál pro anodu je využíván grafit, který je výhodný díky své nízké ceně a také tomu, že vydrží mnoho nabíjecích cyklů. Další součástí akumulátoru je separátor, který jako membrána zabraňuje kontaktu mezi elektrodami, ale umožňuje pohyb iontů mezi katodou a anodou. Ten bývá většinou vyrobený z materiálů, jako je polyethylen (PE), polypropylen (PP) nebo teflon (PTFE). Jako u všech alkalických akumulátorů jsou katoda a anoda uloženy v elektrolytu, který umožňuje přenos lithiových iontů při nabíjení z katody na anodu a v opačném směru při vybíjení. Elektrolyt je většinou tvořen rozpuštěnou lithiovou solí (například  $\text{LiPF}_6$ ) a organickým rozpouštědlem. [28] [29]

Mezi výhody lithium-iontových akumulátorů se předně řadí jejich velmi vysoká energetická hustota, která otevírá velkou škálu využití. Dále také vyšší jmenovité napětí, které dosahuje až 3,6 V, malé samovybíjení, dlouhá životnost či nízká hmotnost. Jejich největší nevýhodou je náchylnost na vnější poškození, kdy po výraznějším poškození vnějšího pláště akumulátoru, zejména pak při propíchnutí článku, hrozí riziko zkratu, což může vyústit v požár. Tyto požáry pak mohou působit velké problémy zejména u elektromobilů, kde se využívá velké množství akumulátorů v sérioparalelně řazených článcích. Mezi další nevýhody se řadí například postupná časová degradace článku, která

má za následek snížení celkové kapacity akumulátoru, nebo náchylnost na nízké teploty, která vyústí ve snížení výkonu. [28] [29]

### 3.6 Průtokové baterie

Průtokové baterie jsou druh akumulátoru, který využívá k akumulaci energie tekutého elektrolytu uloženého ve dvou separovaných nádržích, kdy jedna obsahuje pozitivní a druhá negativní elektrolyt. Na rozdíl od ostatních druhů baterií je zde energie uložena v elektrolytu, ale nikoli v elektrodách. Každá nádrž má své čerpadlo, které při provozu vhání elektrolyt do reaktoru, kde jsou oba elektrolyty odděleny iontoměničovou membránou, skrz kterou probíhá chemická reakce. Známé typy průtokových baterií jsou Vanadium redoxní baterie (VRB), Zinko-bromidová baterie (Br-ZnBR) a Bromid sodná baterie (PSB, Br/S). Princip fungování průtokové baterie je vyobrazen na Obrázku 15. [44]



Obrázek 15: Princip fungování průtokové baterie [44]

Mezi největší výhody průtokových baterií se řadí jejich zanedbatelné samovybíjení a dlouhá životnost v řádů jednotek až desítek tisíců cyklů, kdy největší omezení představuje oddělovací membrána, která má životnost kolem 15 000 cyklů. Velkou výhodou je i možnost navýšení jejich kapacity, kdy celkovou akumulační kapacitu určuje pouze velikost

uskladňovací nádrže na elektrolyt a velikost reaktoru zase určuje, jakým výkonem systém disponuje. Při použití s větrnými či fotovoltaickými elektrárnami je velkou výhodou schopnost okamžitého přechodu z režimu nabíjení do režimu produkce. Tato vlastnost je dobře využitelná při vyrovnávání krátkodobých výkyvů výkonů. Nevýhodou průtokových baterií je jejich nízká hustota energie, která se pohybuje v rozsahu 15 až 25 kWh/m<sup>3</sup>, v porovnání s Lithium-ion akumulátory, které dosahují 300 kWh/m<sup>3</sup>. Jednou z dalších nevýhod je složitost čerpacích mechanismů a samotného skladování elektrolytu, a s tím i spjatá vyšší pořizovací cena. [44]

### 3.7 Superkondenzátory

Superkondenzátory jsou zařízení, která ukládají energii v elektrickém poli. Jsou schopny ukládat velké množství energie a využívají se především v aplikacích, kde je nutné pracovat s velkým množstvím elektrické energie v krátkém čase, kdy mohou sloužit například jako napájení pro záložní zdroj energie a nouzové napájení. [33]

Superkondenzátory rozdělujeme podle jejich principu ukládání energie na dva základní typy. Prvním typem jsou pseudokondenzátory, které využívají pro ukládání energie vratných chemických oxidačně-redukčních reakcí na povrchu elektrody. Podobně jako u alkalických akumulátorů je zde energie uložena pomocí chemické vazby. [30]

Druhým typem jsou tzv. EDLC (Electric Double Layer Capacitor), které na rozdíl od pseudokapacitorů nevyužívají k ukládání energie chemickou reakci, ale pracují na principu elektrochemické dvojvrstvy. Jsou složeny ze dvou elektrod a elektrolytu, který obsahuje ionty. Po přivedení napětí jsou ionty přitahovány k opačně nabitým elektrodám. Důsledkem toho se na každé elektrodě vytvoří dvojvrstva, skládající se ze dvou opačně nabitých vrstev. Elektrolyt je zde ve formě rozpouštědla a rozpustné soli. Maximální napětí článku závisí na druhu použitého kondenzátoru a může dosahovat až 2,7 V. Pro získání vyššího napětí je nutné sériového zapojení více článků. [30] [31]

Mezi hlavní výhody superkondenzátorů se řadí jejich dlouhá životnost, kdy nepodléhají paměťovému efektu, a tudíž neztrácejí během své životnosti kapacitu. Dále také jejich schopnost ukládat velké množství energie s velice dobrou hustotou výkonu, avšak v této oblasti se klasickým alkalickým akumulátorům nevyrovnají. V neposlední řadě disponují schopností opakovaného rychlého nabíjení a vybíjení vysokými proudy, což může být využito při pokrytí energetických špiček či náhlých výkyvů. [33]

Mezi hlavní negativa patří především nižší celková kapacita uložené energie v porovnání s například alkalickými bateriemi, což může omezit jejich uplatnění v některých aplikacích, jako je například dlouhodobé ukládání energie. Proto se jejich praktické použití dá

dobře kombinovat ve spolupráci s klasickými bateriemi, kdy se tyto dva zdroje v systému dobře doplňují a jsou schopny využít velké kapacity alkalických akumulátorů a schopnosti superkondenzátorů pracovat s velkým množstvím energie v krátké čase. [33]



Obrázek 16: Ilustrační příklady superkondenzátorů. Převzato od firmy Maxwell z [34].

### 3.8 Akumulace pomocí vodíku

Využití vodíku jakožto nosiče energie spočívá v jeho výrobě z přebytečné energie. Vodík se na Zemi vyskytuje především vázaný v molekulách vody ( $H_2O$ ) nebo methanu ( $CH_4$ ). Na jeho výrobu existuje několik procesů. Jedním z nich je výroba vodíku prostřednictvím elektrolýzy vody. Přestože je tento způsob výroby energeticky náročnější, jeho hlavní výhoda spočívá v tom, že k výrobě vodíku je potřeba pouze zdroj vody a elektrické energie. Tento proces probíhá prostřednictvím elektrolyzátoru, který je tvořen elektrolytem a dvěma opačně nabitými elektrodami. Po přivedení elektrického proudu se molekuly vody rozloží na kyslík a vodík. Kladné ionty se pohybují ke katodě a získávají elektrony, čímž se redukují na vodík. Záporné ionty se pohybují k anodě a ztrácejí elektrony, čímž se oxidují na kyslík. Výsledek toho procesu je čistý vodík a kyslík. Tento princip výroby se dá využít při akumulaci energie pomocí výroby vodíku využívající přebytečnou elektrickou energii z obnovitelných zdrojů.

[36] [20] [38] [40]

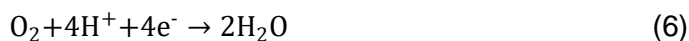
Uložení vyrobeného vodíku je možné v plynné nebo kapalně formě, nejčastěji uložením stlačeného vodíku v tlakových lahvích. Následná zpětná výroba elektrické energie probíhá prostřednictvím elektrochemických procesů v palivových článcích. Palivový článek je zařízení, které využívá chemickou energii uloženou v palivu k výrobě elektřiny a tepla. Palivové články využívají jako palivo uskladněný vodík a kyslík jako oxidant. Vodíkové

palivové články se skládají ze tří hlavních částí: anody, katody a elektrolytu. Při elektrochemické reakci se vodík, který je přiváděn na anodu, rozkládá na protony (H<sup>+</sup>) a elektrony (e<sup>-</sup>), mezitímco kyslík reaguje s protony a elektrony na katodě, čímž v konečném důsledku vzniká voda a elektrická energie. Elektrolyt slouží k oddělení anody a katody a zajišťuje vodivost protonů mezi nimi. V současné době existuje několik druhů palivových článků s různě řešenými elektrolyty. Proces je graficky vyobrazen na Obrázku 17 a reakce jsou zapsány v následujících rovnicích. [36] [20] [38]

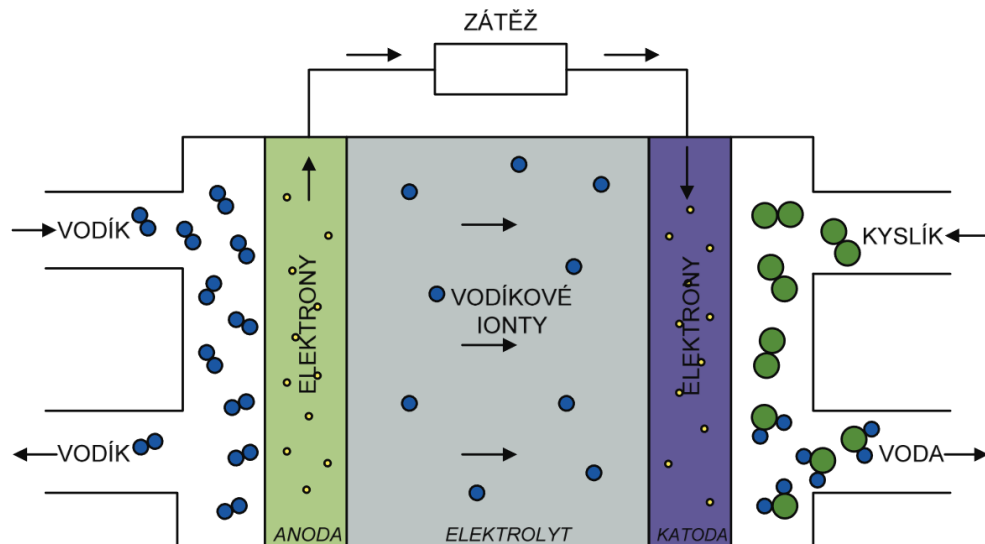
Reakce probíhající na anodě:



Reakce probíhající na katodě:



Výsledná rovnice celé reakce



Obrázek 17: Princip fungování palivového článku. Převzato z [38]

### 3.8.1 Polymer-elektrolytové palivové články (PEMFC)

Tento druh palivových článků využívá jako elektrolyt k oddělení paliva a oxidantu polymerní membránu, která se vyznačuje vysokou proudovou hustotou, což má za výsledek konstrukci s malými rozměry a nízkou hmotností. PEMFC článek má nízkou pracovní teplotu, což umožňuje rychlou startovací odezvu, avšak v důsledku nízké provozní teploty se jako katalyzátor využívá platina. Díky svým kompaktním rozměrům jsou články vhodné pro mobilní aplikace, jako jsou elektromobily, nebo pro malé energetické zdroje. [41] [42]

### 3.8.2 Alkalické palivové články (AFC)

Tento druh palivového článku využívá alkalický elektrolyt, nejčastěji koncentrovaný hydroxid draselný (KOH), a vodík jako palivo. Jako okysličovadlo zde slouží čistý kyslík nebo se může využít vzduch, ze kterého je ovšem nutné odstranit nežádoucí oxid uhličitý, který by reagoval s KOH a znehodnocoval elektrolyt. Alkalické palivové články pracují s vysokou účinností, která může dosahovat až 60 %, a umožňují využití většího množství katalyzátorů. Nicméně AFC mají i své nevýhody, jako například svou vyšší provozní teplotu. [41] [42]

### 3.8.3 Palivové články s kyselinou fosforečnou (PAFC)

Tyto palivové články využívají jako elektrolyt kyselinu fosforečnou ( $H_3PO_4$ ), která je obsažena v matrici z karbidů křemíku. Je to jeden z nejvíce komerčně využívaných palivových článků. Mezi hlavní výhody těchto článků se řadí jejich jednoduchá konstrukce, vysoká tepelná, chemická a elektrochemická stabilita. Tyto palivové články pracují za největší účinnosti při pracovních teplotách dosahujících 200 °C. V důsledku využití kyseliny fosforečné jako elektrolytu dochází u těchto článků k problémům s korozí. [41] [42] [43]

### 3.8.4 Palivové články s tavenými uhličitany (MCFC)

Palivové články s tavenými uhličitany (MCFC) jsou elektrochemické zařízení, které využívá jako elektrolyt nejčastěji směs uhličitany litného ( $Li_2CO_3$ ) a uhličitany draselného ( $K_2CO_3$ ). Jejich provozní teplota se pohybuje kolem 650°C. Díky této vysoké provozní teplotě je možné využití levnějších kovů jako katalyzátoru. Články jsou schopny dosahovat velkých výkonů s efektivitou dosahující až 50 %. Hlavní nevýhody MCFC jsou spojeny s jejich vysokou pracovní teplotou, která má za následek korozi elektrod a s tím spojenou omezenou životnost. [41] [42] [43]

### 3.8.5 Palivové články s tuhými oxidy (SOFC)

Palivové články s tuhými oxidy využívají jako elektrolyt tuhý oxid, například na bázi yttrium oxidu ( $Y_2O_3$ ) stabilizovaného pomocí oxidu zirkoničitého ( $ZrO_2$ ). Jsou provozovány za vysokých provozních teplot, které se mohou pohybovat mezi 700-1000°C. SOFC dosahují vysoké účinnosti, která může dosahovat až 60 %. Mezi výhody se řadí fakt, že díky využití pevného elektrolytu zde nedochází k problémům s korozí. Podobně jako u MCFC není u palivových článků s tuhými oxidy díky vysoké provozní teplotě potřeba katalyzátorů z drahých kovů. SOFC mají ale i své nevýhody, které jsou hlavně spojené se samotnou vysokou provozní teplotou, kdy její dosažení při startu vyžaduje více času a energie. [41] [42] [43]

Využívání vodíku jakožto zdroje energie je v současnosti využíváno především v průmyslu a dopravě. V budoucnu má ale velký potenciál jako alternativa k fosilním palivům, kdy v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie a svému bezemisnímu spalování představuje atraktivní způsob ukládání energie, který najde své místo v široké škále využití. Využití vodíku má ale i své nevýhody, kdy už samotná výroba a skladování jsou energeticky velmi náročné a v dnešní době v porovnání s fosilními palivy finančně nevýhodné. V neposlední řadě je nutné brát zřetel i na bezpečnost, a to vzhledem k tomu, že vodík je hořlavý a výbušný plyn, je nutná správná manipulace a skladování. [36] [20] [38]

## 4. Porovnání parametrů akumulčních systémů

|                 | Typ               | Výkon [MW] | Kapacita [MWh] | Efektivita [%] | Reakční doba | Hutota energie [kWh/m <sup>3</sup> ] | Životnost [rok] |
|-----------------|-------------------|------------|----------------|----------------|--------------|--------------------------------------|-----------------|
| Mechanické      | PVE               | 10-5000    | 10-1000        | 70-85          | minuty       | 0.5-1.5                              | 40-60           |
|                 | CAES              | 5-300      | 100-1000       | 40-70          | minuty       | 3-6                                  | 20-40           |
|                 | Setrvačníky       | 0.1-20     | 0.01-10        | 90-95          | <sekundy     | 20-80                                | 15              |
| Elektrochemické | Olověný           | 10-100 W*  | 0.001-40*      | 70-80          | <sekundy     | 50-80                                | 5-15            |
|                 | NiCd              | 10-100 W*  | <0.01*         | 85-90          | <sekundy     | 60-150                               | 10-20           |
|                 | li-ion            | 1-10 W*    | <0.001*        | 80-90          | <sekundy     | 200-500                              | 5-15            |
|                 | Průtokové         | 0.3-3      | 10-100         | 75-82          | sekundy      | 15-25                                | 5-10            |
|                 | Vodík             | <50        | 1-100          | 20-60          | minuty       | 500-3000                             | 5-20            |
| Elektrické      | Superkondenzátory | <0.3       | 0.1-10         | 90-98          | milisekundy  | 2.5-15                               | 20+             |

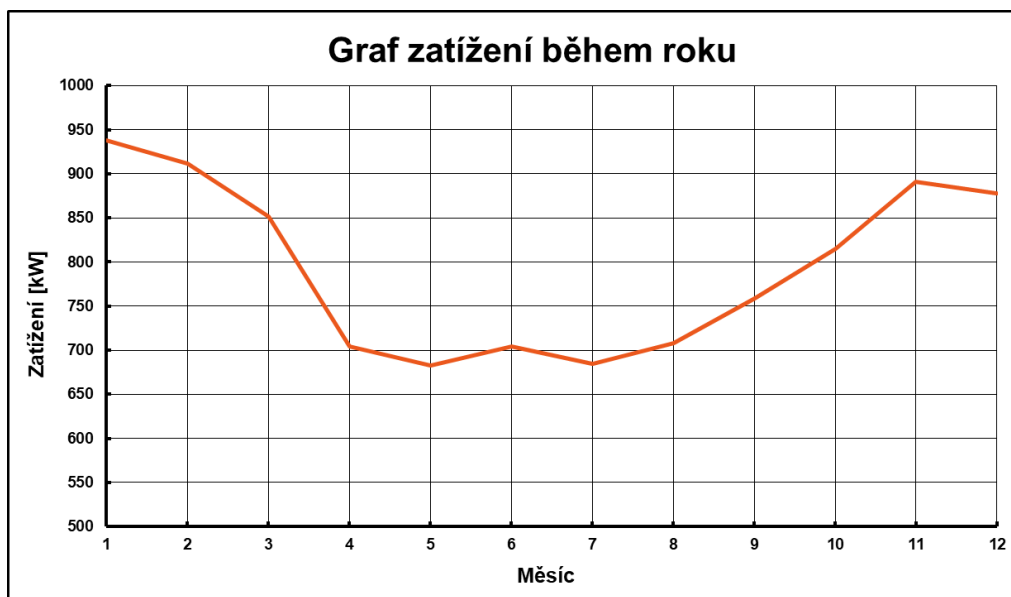
Tabulka 1: Porovnání parametrů akumulčních technologií [45] [46] [47] [56]. \* Hodnoty kapacit a výkonů u alkalických akumulátorů byly vyjádřeny pro jeden článek akumulátoru, pro vyšší hodnoty lze články spojovat do větších systémů

Z tabulky je patrné, že nejvyšších výkonů a kapacit dosahují systémy CAES a PVE, které jsou vhodnější na akumulaci elektrické energie ve větším měřítku, avšak oproti ostatním systémům akumulace mají delší reakční dobu a srovnatelně nižší efektivitu. Nejnižší reakční dobu a nejvyšší efektivitu mají klasické baterie, superkondenzátory a setrvačníky, ačkoliv za cenu nižší kapacity, která se u baterií dá i s výkonem navýšit při zapojení více článků do jednoho systému. V porovnání s ostatními systémy mají ale klasické baterie značně nižší životnost, což se může negativně projevit při jejich dlouhodobém využití poklesem využitelné kapacity. Vodík jakožto nosič energie může v závislosti na rozsahu uskladnění poskytovat nejdelší dobu vybití.



## 5. Návrh Akumulačního systému

Cílem praktické části práce je navrhnout systém s vybraným zdrojem obnovitelné energie společně s akumulací v bilanci s teoretickými hodnotami odběru elektrické energie. V tomto případě jsem jako obnovitelný zdroj energie zvolil fotovoltaickou elektrárnu a řešení bude cílit na výrobu a akumulaci elektrické energie k pokrytí odběru modelové vesnice. Pro teoretická data o odběru elektrické energie jsem využil záznamy o zatížení z roku 2019 ze stránek České elektroenergetické přenosové soustavy [10]. Vzhledem k tomu, že dohledatelná data zobrazovala celkové zatížení na území České republiky, hodnoty zatížení jsem přizpůsobil typickému zatížení vesnice, a to v poměru 1:10 000. Hodnoty zatížení tedy zhruba odpovídají typickému odběru pro 1050 obyvatel ( $10\,500\,000 / 10\,000 = 1050$ ). Tato úměra je využita pouze pro odhad hodnoty zatížení a reálné hodnoty mohou být značně ovlivněny, pokud by například v obci byl provozován nějaký průmyslový nebo zemědělský podnik. Nicméně pro naši modelovou vesnici by průběh zatížení mohl zhruba odpovídat reálnému odběru obce s podobným počtem obyvatel. Konečný odhad typického odběru vesnice o 1050 obyvatelích je zobrazen na Obrázku 18.



Obrázek 18: Graf zatížení během roku

Z grafu je patrné, že k největšímu odběru elektrické energie dochází v zimních měsících, a to konkrétně v lednu. Naopak v létě, kdy jsou díky delšímu času osvitů obecně lepší podmínky pro provozování FVE, je odběr elektrické energie výrazně nižší. Celková spotřeba elektrické energie v průběhu roku činí 6,95 GWh.

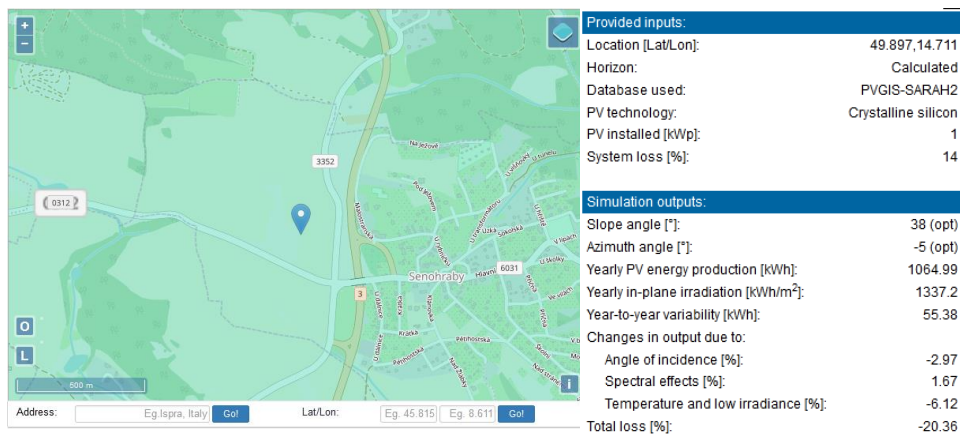
Pokud bychom chtěli navrhnout systém FVE a akumulace, který by byl schopný plně pokrýt požadavek na takto velkou hodnotu energie, museli bychom navrhnout dostatečně

velký systém akumulace energie, abychom byli schopni část přebytečné energie, která se vyrobí v letních měsících, akumulovat a využít v zimních měsících, kdy bude produkce z FVE značně snížena. Také bychom museli počítat s proměnlivostí počasí a dalšími meteorologickými faktory, což by ve výsledku ještě zvýšilo požadovaný výkon FVE a kapacitu akumulace. Vzhledem k tomu, že všechny tyto faktory se výrazně promítnou do celkové pořizovací ceny systému, bude koncepce realizována pouze ve formě denní akumulace a rozdíl elektrické energie, který systém během roku nebude moci poskytnout, bude vyrovnán pomocí odběru z rozvodné sítě z jiných zdrojů energie. To znamená, že FVE s akumulací bude schopna uložit a současně distribuovat všechnu vyrobenou energii v průběhu dne. Protože je systém navrhován na zásobování vesnice pouze s 1050 obyvateli, bude ekonomická stránka projektu v potenciální realizaci projektu hrát klíčovou roli, a proto jsem se rozhodl systém realizovat v denních vybíjecích cyklech.

## 5.1 Návrh fotovoltaické elektrárny

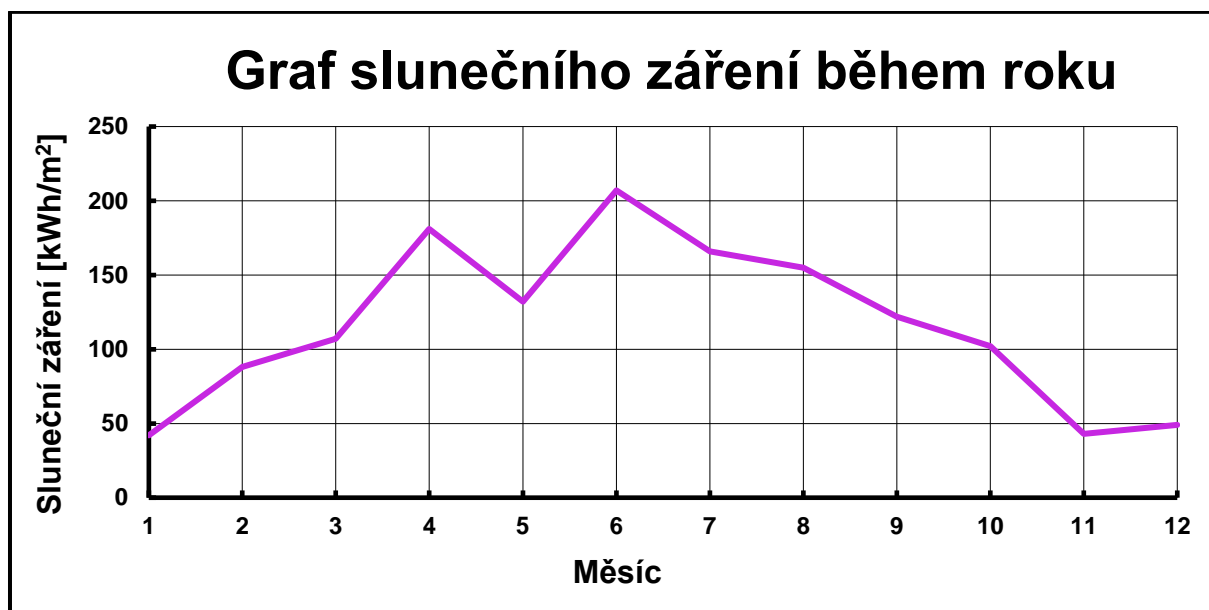
Pro návrh FVE je základní parametr dostupnost slunečního záření ve vybrané lokalitě. Sluneční záření se definuje jako množství energie dopadající na jednotku plochy za jednotku času. Tuto veličinu označujeme jako solární konstantu. Ve vrchní části atmosféry hodnota solární konstanty dosahuje  $1\,373\text{ W/m}^2$  [49]. Při průchodu zemskou atmosférou je část záření absorbována či odražena, tudíž reálná hodnota slunečního záření na zemském povrchu je nižší a dosahuje hodnoty okolo  $1000\text{ W/m}^2$ . [50]

Pro získání hodnot průměrného záření jsem využil nástroje PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), což je informační systém vyvinutý Evropskou komisí, který poskytuje přístup k údajům o slunečním záření a klimatických podmínkách. [51] Zde jsem zvolil lokalitu umístění fotovoltaické elektrárny ve Středočeském kraji poblíž vesnice Senohraby. Jedná se o rovinnou plochu, která je aktuálně využívána jako orná půda. Umístění je zobrazeno na Obrázku 19.



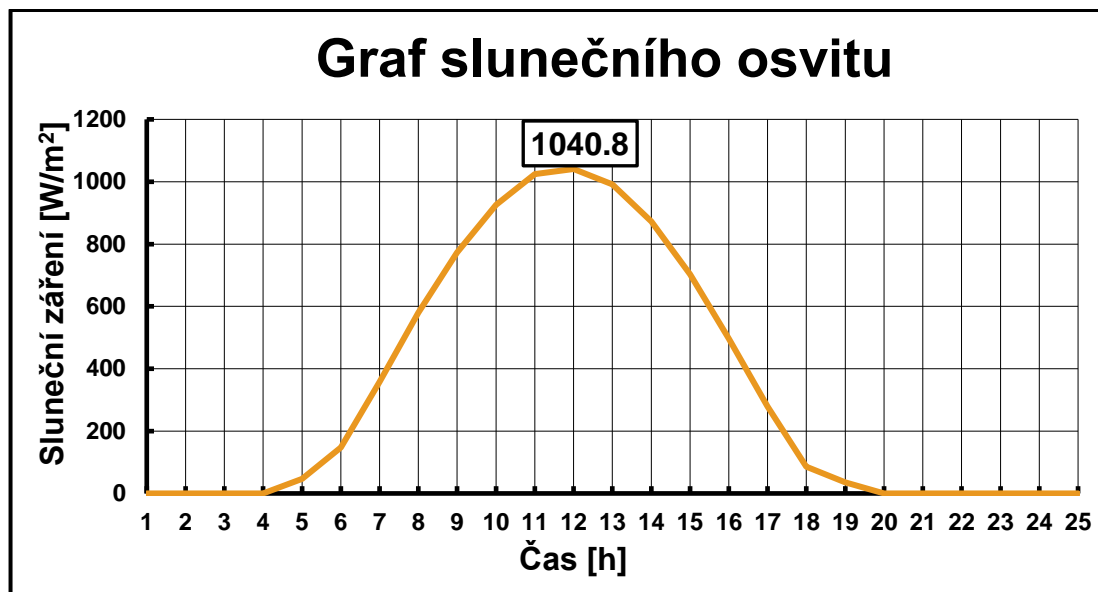
Obrázek 19: Umístění FVE poblíž obce Senohraby [51]

Výsledná data získaná ze serveru PVGIS obsahující údaje o slunečním záření v dané lokalitě v průběhu roku 2019 jsou graficky vyobrazena na Obrázku 20.



Obrázek 20: Graf slunečního záření během roku 2019 [51]

Z Obrázku 20 je patrné, že největšího slunečního osvitu bylo dosaženo v červnu a nejmenších hodnot bylo dosaženo v listopadu a prosinci. Protože bude systém provozován v denních cyklech, budeme výkon FVE dimenzovat na nejvyšší sluneční záření v roce, konkrétně během června. Ze systému PVGIS jsem zjistil, že nejlepší hodnota slunečního záření bylo dosaženo 29. června. Průběh měnící se intenzity slunečního záření je zobrazen na Obrázku 21. Zde je patrné, že největšího slunečního osvitu bylo dosaženo ve 12:00, kdy hodnota slunečního záření činila 1040,8 W/m<sup>2</sup>. Je nutné brát v úvahu, že hodnoty slunečního záření jsou uváděny během ideálních meteorologických podmínek. Vliv počasí na výkon FVE byl již předveden na Obrázku 4 v teoretické části práce.



Obrázek 21: Průběh slunečního záření během 29. června 2019 [51]

Ze stránek České elektroenergetické přenosové soustavy jsem zjistil hodnoty hodinového zatížení v průběhu 29. června 2019 [10]. Pomocí obdélníkové metody jsem určil celkovou zátěž v tento den na 16 281 kWh. Průměrná hodinová hodnota zatížení činí 678 kW. Vzhledem k tomu, že z teoretického modelu zatížení vesnice na Obrázku 18 jsme zjistili, že během června je průměrné zatížení 704 kW, budeme potřebný výkon FVE dimenzovat na tuto vyšší hodnotu. Z této hodnoty určíme, že během průměrného červnového dne byla celková spotřeba elektrické energie za 24 hodin 16 896 kWh ( $704 \cdot 24 = 16\,896$ ). Pro jistotu tuto kapacitu navýšíme na 17 000 kWh, protože je lepší kapacitu spíše předimenzovat nežli naopak. Toto je hodnota elektrické energie, kterou chceme z naší FVE získat v průběhu jednoho dne. K dosažení tohoto cíle jsem zvolil fotovoltaické panely od firmy WINACO s jmenovitým výkonem 410 Wp (viz. Tabulka 2). [52]

| Parametry              |                 |
|------------------------|-----------------|
| Jmenovitý výkon        | 410 Wp          |
| Účinnost modulu        | 21.93%          |
| Rozměry                | 1724x1135x35 mm |
| Hmotnost               | 21.5 kg         |
| Napětí při max. výkonu | 31.3 V          |
| Proud při max. výkonu  | 13.1 A          |

Tabulka 2: Parametry fotovoltaického panelu WINACO WST-MGX-P3 410Wp [52]

Při výpočtu požadované plochy k pokrytí solárními panely k vyrobení 17 000 kWh elektrické energie započítáme celkovou sumu slunečního záření v průběhu 24 hodin z Obrázku 21, která činí 8358,85 W/m<sup>2</sup>. Dále je nutné vzít v úvahu účinnosti dalších nezbytných zařízení k vyvedení výkonu, jako jsou střídače (účinnost ~ 94 %), transformátory (účinnost ~ 97 %) a rozvody (účinnost ~ 99 %). Celkovou plochu k pokrytí vypočítáme z následujícího vztahu:

[53] [54]

$$S_{\text{panelů}} = \frac{\text{vyrobená elektrická energie}}{\text{celk. účinnost} \cdot \text{suma slunečního záření}} = \frac{17\,000\,000}{(0,94 \cdot 0,98 \cdot 0,99 \cdot 0,2193) \cdot 8358,85} = 10\,169 \text{ m}^2 \quad (8)$$

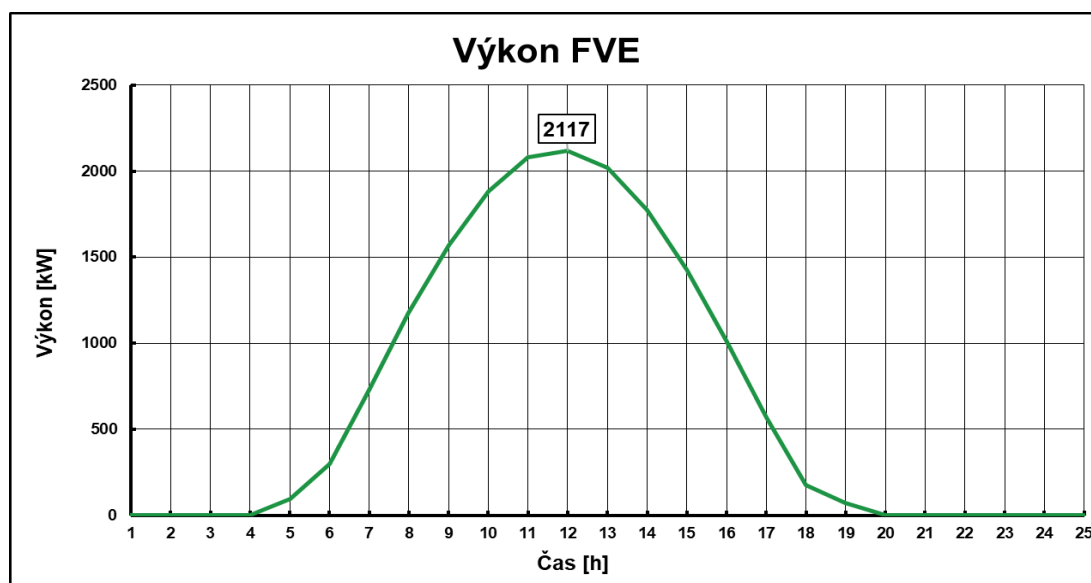
S rozměry námi zvoleného panelu určíme celkový nutný počet panelů.

$$\text{Počet panelů} = \frac{\text{Plocha k pokrytí}}{\text{Plocha jednoho panelu}} = \frac{10\,169}{1,724 \cdot 1,135} \cong 5\,197 \text{ panelů} \quad (9)$$

S touto hodnotou určíme celkový jmenovitý výkon FVE.

$$\text{Jmenovitý výkon FVE} = 5197 \cdot 0,410 \cong 2130 \text{ kWp} \quad (10)$$

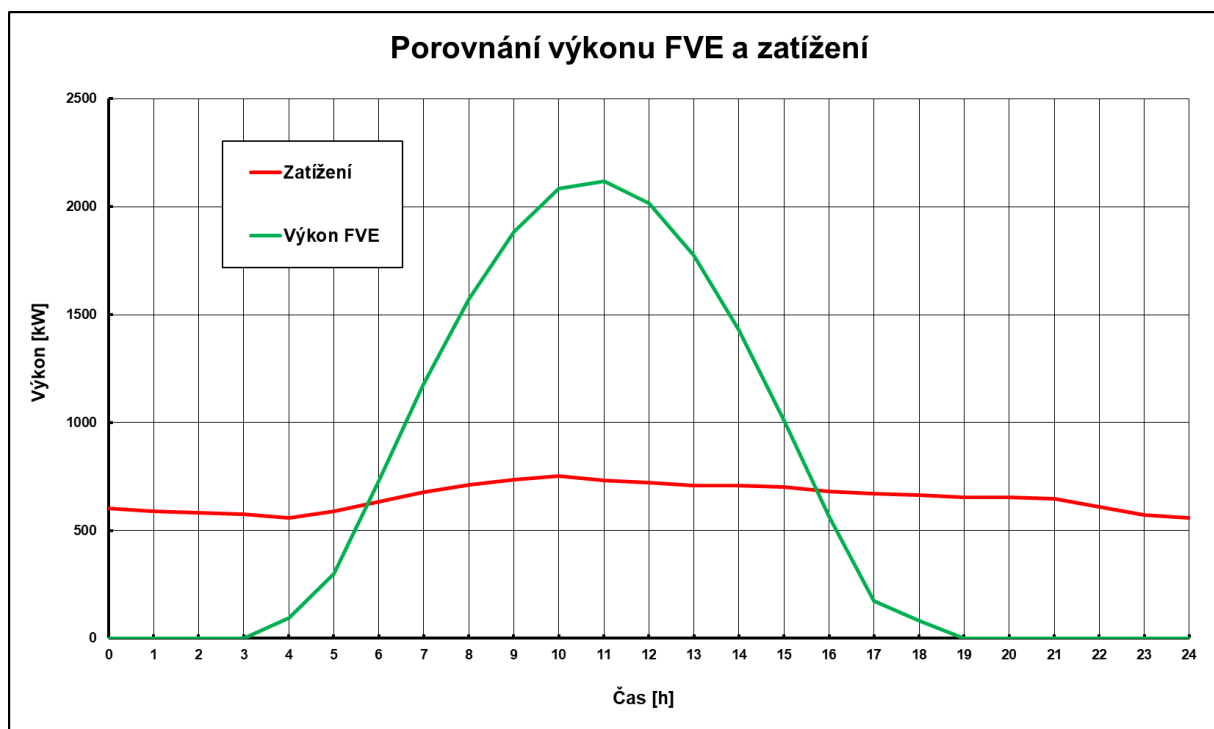
Vzhledem k tomu, že intenzita slunečního záření se během dne mění, mění se v čase i výkon fotovoltaické elektrárny. Průběh proměnlivého výkonu závislého na intenzitě slunečního ozáření během dne je vyobrazen na Obrázku 22.



Obrázek 22: Výkon FVE v závislosti na čase dne 29.6.2019 [51]

## 5.2 Porovnání zatížení a výroby

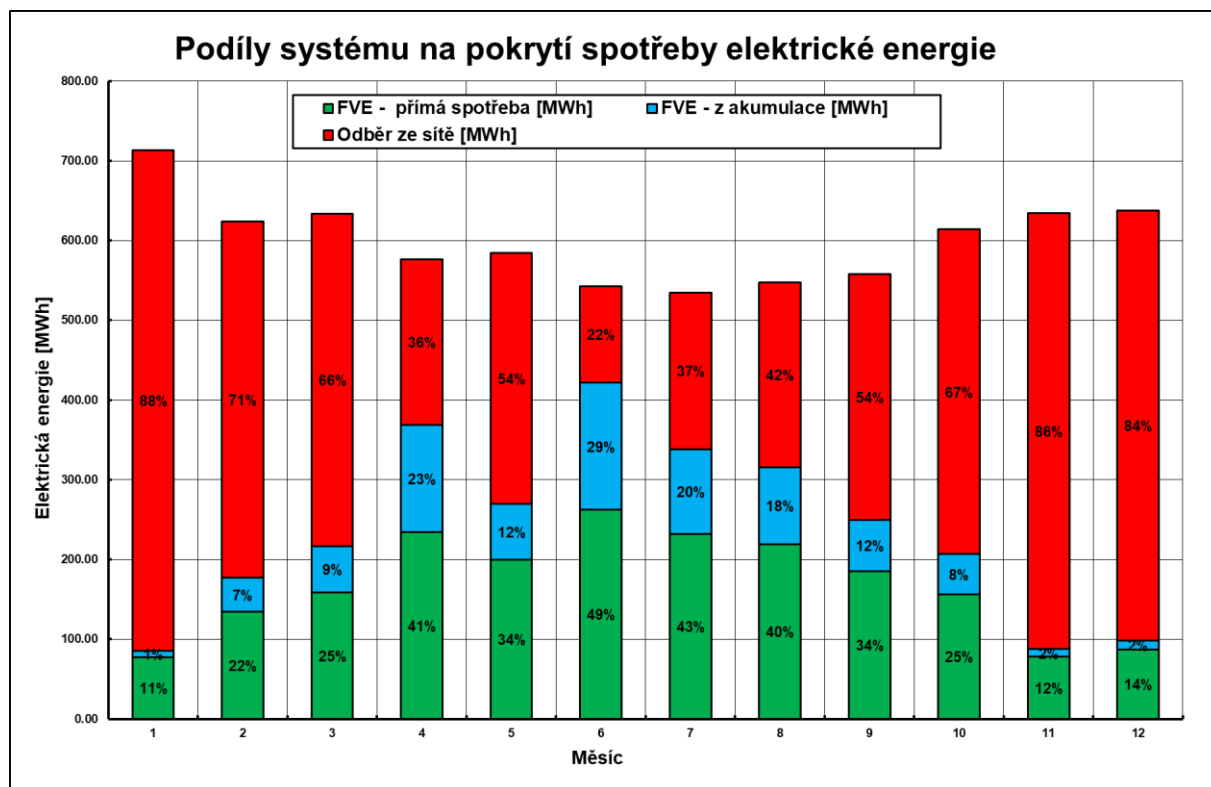
Z kombinace grafů zatížení a výroby na Obrázku 23 je patrné, že mezi 6. a 16. hodinou, kdy je výroba FVE nejvyšší, vyrábí elektrárna více elektrické energie, než jaká je spotřeba modelové vesnice. Tento nevyužitý výkon by se v případě řešení bez akumulace musel prodávat do rozvodné sítě za fixní výkupní cenu. V případě našeho modelového dne s nejlepšími slunečními podmínkami činí celkový podíl nevyužitého výkonu na denní výrobě elektrické energie 51 %. Tato přebytečná elektrická energie by se ale namísto odprodeje dala pomocí systému akumulace využít v hodinách, kdy je naopak výkon FVE nedostatečný.



Obrázek 23: Porovnání výkonu FVE s vytížením v průběhu dne 29.6.2019 [51] [10]

Hodnota tohoto nevyužitého výkonu se bude v průběhu roku měnit, protože v letních měsících je typicky výroba pomocí FVE vyšší a zatížení nižší, ale v zimních měsících je tomu naopak a snížená výroba FVE nebude zdaleka stačit na zvýšené požadavky odběru elektrické energie v průběhu dne. Z tohoto důvodu se akumulační systém reálně využije především v letních měsících. Z Obrázku 24 je patrné, že nejlepšími výsledky dosahuje akumulační systém díky větší výrobě elektrické energie z FVE zejména v letních měsících, kdy zaujme okolo 20 % z celkové spotřebované energie. Nicméně akumulační systém je využit v průběhu celého roku. V Tabulce 3 je vyčísleno, že se systém akumulace v průběhu roku využije v 1424 hodinách. Celkem by za rok bylo možné pomocí akumulace vrátit do

systemu 809 MWh elektrické energie. Návrh systému akumulace tedy bude cílit na to, aby byl schopný akumulovat tento přebytečný výkon a následně ho rovnoměrně rozložit v průběhu dne.



Obrázek 24: Porovnání podílu vyrobené elektrické energie na spotřebě během roku 2019

| Měsíc                | Výroba FVE [MWh] | Zatížení [MWh] | FVE - přímá spotřeba [MWh] | FVE - do akumulace [MWh] | Hodiny Akumulace |
|----------------------|------------------|----------------|----------------------------|--------------------------|------------------|
| Leden                | 85.56            | 713.06         | 77.44                      | 8.12                     | 27.00            |
| Únor                 | 177.45           | 623.74         | 134.48                     | 42.97                    | 73.00            |
| Březen               | 216.34           | 633.82         | 158.77                     | 57.57                    | 88.00            |
| Duben                | 368.86           | 576.59         | 234.44                     | 134.42                   | 195.00           |
| Květen               | 269.36           | 584.51         | 199.85                     | 69.51                    | 131.00           |
| Červen               | 421.48           | 543.02         | 262.60                     | 158.88                   | 239.00           |
| Červenec             | 337.82           | 534.84         | 232.02                     | 105.80                   | 193.00           |
| Srpen                | 315.38           | 547.74         | 219.16                     | 96.22                    | 181.00           |
| Září                 | 249.86           | 557.71         | 185.27                     | 64.59                    | 129.00           |
| Říjen                | 207.00           | 613.96         | 156.43                     | 50.57                    | 102.00           |
| Listopad             | 87.62            | 634.18         | 77.99                      | 9.63                     | 29.00            |
| Prosinec             | 98.02            | 637.86         | 87.16                      | 10.86                    | 37.00            |
| <b>Průměr za rok</b> | <b>236.23</b>    | <b>600.09</b>  | <b>168.80</b>              | <b>67.43</b>             | <b>118.67</b>    |
| <b>Celkem za rok</b> | <b>2834.76</b>   | <b>7201.04</b> | <b>2025.60</b>             | <b>809.14</b>            | <b>1424.00</b>   |

Tabulka 3: Porovnání podílu vyrobené elektrické energie na spotřebě během roku 2019

## 5.3 Návrh systému akumulace

Celkový roční teoretický energetický potenciál v dané lokalitě s navrženým výkonem 2 130 kWp lze spočítat v nástroji PVGIS. Na navržený systém s orientací na jih vychází optimální sklon fotovoltaických panelů 38°. Při těchto parametrech lze očekávat roční produkce 2 835 MWh. V této kapitole se budeme zabývat návrhem akumulačního systému, který by byl schopen uskladnit přebytečný výkon, který se během dne nespoteřebuje okamžitě, a byl by ho schopen rovnoměrně distribuovat v denních cyklech. Z výsledků podílu systému na pokrytí spotřeby elektrické energie na Obrázku 24 je vidět, že pomocí kombinace FVE s akumulací můžeme během letních měsíců dosáhnout pokrytí celkového odběru vesnice dokonce až ze 78 %. To je hlavně způsobeno lepšími slunečními podmínkami pro provozování FVE a nižším zatížením v těchto měsících. Naopak v zimě, kdy FVE dosahuje nejnižších výkonů, je systém schopný poskytnout pouze okolo 15% potřebné energie s tím, že se bude akumulovat jen minimum vyrobené elektrické energie. Z celkových 7,2 GWh spotřebované elektrické energie během roku připadá na přebytečný výkon, který se stane předmětem akumulace, 809 MWh. V modelovém případě je tedy systém FVE s akumulací schopný pokrýt 2,835 GWh, což činí 39 % z celkové spotřeby. Pokrytí celého odběru by se dalo vyřešit navýšením výkonu FVE a následným prodejem nevyužité energie vyrobené v letních měsících nebo akumulací energie z letních měsíců na zimu. Nicméně tato řešení by byla ekonomicky mnohem náročnější. Proto v našem modelovém případě počítáme s tím, že nedostatek energie bude kompenzován nákupem energie z elektrické rozvodné sítě z jiných zdrojů. Případně by se dalo uvažovat i o zakomponování jiného zdroje obnovitelné energie do systému, který by byl schopný lépe pracovat v zimních měsících, jako je například větrná turbína nebo malá vodní elektrárna, jejíž instalace by byla možná na nedalekém toku řeky Sázavy. Tímto způsobem by se dalo v zimě vypomoci s vyšším odběrem elektrické energie.

## 5.4 Výpočet velikosti akumulace

Pro určení maximální hodnoty energie, kterou bude akumulátor muset uložit, je nutné si určit celkové množství vyrobené energie během jednoho dne a porovnat ho s celkovou spotřebou. Stanovili jsme si, že systém akumulace bude fungovat v denních cyklech a z toho důvodu využijeme největší hodnoty slunečního záření, kterých bylo dosaženo 29. června. Celkem v tento den bylo vyrobeno 17 000 kWh elektrické energie a celková zátěž činila 16 281 kWh. Průběh těchto hodnot byl zobrazen na Obrázku 23, kde jsme zjistili, že v období s největším výkonem FVE vyrobíme více elektrické energie, než je průběžná zátěž v oněch hodinách a tuto energii budeme chtít akumulovat. Přesnou hodnotu kapacity akumulace jsme



díky znalosti hodnot výkonů a zátěže v každé hodině stanovili pomocí obdélníkové metody na 8709 kWh.

## 5.5 Výběr akumulačního systému

Na Obrázku 25 je vidět porovnání jednotlivých typů akumulačních systémů podle jejich pořizovací ceny. Z hodnot je jasné, že setrvačníky a superkondenzátory kvůli jejich pořizovací ceně za kWh není možné zvažovat. Perspektivní možností se jeví PVE a CAES systémy, avšak jejich realizace je možná pouze při splnění určitých geografických požadavků, a proto není jejich realizace příliš reálná. Další zajímavou možností je akumulace pomocí vodíku, ale tato technologie se v současné době příliš nevyužívá a je spíše ve fázi vývoje. Nakonec nám zbývají elektrochemické akumulátory, mezi které se řadí i olověné nebo Li-ion akumulátory. Ty se v dnešní době využívají k akumulaci energie nejvíce a jejich realizace je díky velké nabídce na trhu nejvíce reálná. Zajímavým způsobem akumulace jsou i průtokové baterie. Tyto systémy se dají v dnešní době pořídit v kompletních kontejnerových jednotkách a jejich instalace je tím jednodušší.

|                 | Typ               | Cena výkonu<br>[\$ /kW] | Cena energie<br>[\$ /kWh] |
|-----------------|-------------------|-------------------------|---------------------------|
| Mechanické      | PVE               | 750-4300                | 5-85                      |
|                 | CAES              | 400-880                 | 2-120                     |
|                 | Setrvačníky       | 250-350                 | 1 000-10 000              |
| Elektrochemické | Olověný           | 300-700                 | 200-400                   |
|                 | NiCd              | 500-1500                | 400-1500                  |
|                 | li-ion            | 200-900                 | 300-1300                  |
|                 | Průtokové         | 600-1500                | 150-1000                  |
| Elektrické      | Superkondenzátory | 25-450                  | 3000-14000                |
| Chemické        | Vodík             | 2000-5500               | 2-35                      |

Obrázek 25: Investiční náklady u různých typů akumulačních systémů [45] [46]

## 5.5.1 Olověné akumulátory

První způsob akumulace elektrické energie bude navrhnout skrze využití olověných akumulátorů. Pro tento typ akumulace jsem vybral olověné akumulátory od firmy Jensys s jmenovitým napětím 2V a kapacitou 1000 Ah. Na stránkách výrobce je tento akumulátor vyloženě určen pro použití s fotovoltaickými elektrárnami. Specifikace vybraného akumulátoru jsou popsány v Tabulce 4.

| Jensys 2V 1000Ah            |                |
|-----------------------------|----------------|
| Jmenovité napětí            | 2 V            |
| Kapacita                    | 1000 Ah        |
| Rozměry (d x š x v)         | 475x175x330 mm |
| Hmotnost                    | 60 kg          |
| Ovlivnění kapacity teplotou | 40 °C - 102 %  |
|                             | 25 °C - 100 %  |
|                             | 0 °C - 85 %    |
|                             | -15 °C - 65 %  |
| Cena                        | 300 \$ / kWh   |

Tabulka 4: Parametry olověného akumulátoru od firmy Jensys Power dostupné z [55]

Vzhledem k tomu, že se jedná o olověný akumulátor, je potřeba na doporučení výrobce kvůli zachování životnosti akumulátoru omezit hloubku vybití na přibližně 20 %. V námi navrženém systému akumulace to činí navýšení kapacity z původních 8 709 kWh na 11 000 kWh. K dosažení této kapacity je nutné sérioparalelní zapojení 5 520 akumulátorů s celkovou kapacitou 230 000 Ah při jmenovitém napětí 48 V. Pro připojení fotovoltaických panelů k akumulátorům a rozvodné síti bude zapotřebí ještě investice do měničů napětí, regulátorů nabíjení, transformátorů a samotného zázemí pro uskladnění akumulátorů.

Následná realizace tohoto systému při uvažování pořizovacích nákladů 300 \$/kWh vychází s naší kapacitou 11 000kWh na 3 300 000 \$. Při aktuálním kurzu České národní banky jsou celkové investiční náklady vyčísleny na **72 474 600 Kč** (kurz ČNB k 23.5.2023 - 1\$ = 21,962 Kč [58]).

Je nutné ještě započítat provozní náklady, které jsou kolem 0,001\$/kWh/rok [45]. Při uvažování životnosti systému 10let činí celkové provozní náklady **2416 Kč** ( $0,001 \cdot 10 \cdot 11000 \cdot 21,962 \cong 2416$ ).

Celkem nás tedy provoz 11 000 kWh olověných akumulátorů vyjde v průběhu 10 let na **72 477 016 Kč**.

## 5.5.2 Li-Ion Akumulátory

Další dnes ve spojení s fotovoltaickými systémy velmi využívaný způsob akumulace je pomocí Li-ion akumulátorů. Pro náš účel jsem vybral akumulátor od firmy GSO POWER. Konkrétně se jedná o takzvaný battery pack, což je označení pro sadu akumulátorů zapojeným do jednoho většího celku. Tímto způsobem můžeme pořídit rovnou větší akumulární jednotku složenou s jednotlivých článků. V tomto případě se jedná o akumulátor s označením GBP48V-200R, který disponuje kapacitou 200ah při nominálním napětí 48 V. Parametry vybraného akumulátoru jsou vypsány v Tabulce 5. [48]

| GSO POWER - GBP48V-200R |                    |
|-------------------------|--------------------|
| Jmenovité napětí        | 48 V               |
| Kapacita                | 200 Ah / 9.6 kWh   |
| Pracovní teplota        | 30 °C ~ + 60 °C    |
| Rozměry                 | 410 x 640 x 195 mm |
| Váha                    | 90 kg              |
| Cena                    | 800 \$ / kWh       |

Tabulka 5: Parametry Li-Ion akumulátoru od firmy GSO POWER dostupné z [48]

Stejně jako u olověných baterií omezíme kvůli dlouhodobému zachování živostnosti akumulátoru hloubku vybití na 20 %, a tudíž navýšíme celkovou kapacitu z původních 8 709 kWh na 11 000 kWh. Díky tomu, že akumulátor již funguje na napětí 48 V, stačí nám pouze navýšit paralelní zapojení, abychom dosáhli požadované kapacity. V našem případě, kdy jeden akumulátor disponuje kapacitou 9,6 kWh, budeme potřebovat zapojit alespoň 1 146 akumulátorů.

Celkové pořizovací náklady při ceně 800 \$/kWh vychází s naší kapacitou 11 000kWh na 8 800 000 \$. Při aktuálním kurzu České národní banky jsou celkové investiční náklady vyčísleny na **193 265 600 Kč** (kurz ČNB k 23.5.2023 - 1\$ = 21,962 Kč [58]).

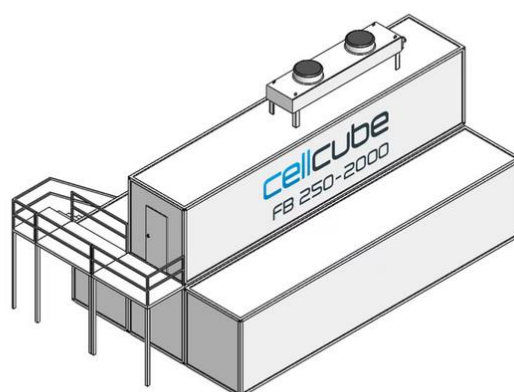
Provozní náklady při uvažování stejné životnosti 10 let, které jsou kolem 0,003\$/kWh/rok nás celkem vyjdou na **7247 Kč** ( $0,003 \cdot 10 \cdot 11000 \cdot 21,962 \cong 7247$ ). [45]

Celkem nás tedy provoz 11 000 kWh olověných akumulátorů vyjde v průběhu 10 let na **193 272 848 Kč**.

### 5.5.3 Průtokové baterie

Posledním typem akumulace, který by se dal v našem případě reálně zvážit jsou průtokové baterie. Pro tento případ jsem našel modulární systém uložení průtokových baterií v kontejnerech od společnosti Cell Cube. Konkrétně se jedná o produkt s označením CELLCUBE FB 250-2000. Tato samostatná jednotka dosahuje kapacity 2 400 kWh při jmenovitém napětí 400 V a její životnost dosahuje až 25 let. Díky své uzavřené modulární konstrukci se dá kapacita systému poměrně snadno navýšit. Parametry tohoto řešení jsou vypsány v Tabulce 6. [37]

| CELL CUBE - FB 250-2000 |                 |
|-------------------------|-----------------|
| Jmenovité napětí        | 400 V           |
| Kapacita                | 2 400 kWh       |
| Pracovní teplota        | 15 °C ~ + 45 °C |
| Rozměry                 | 12.2 m x 7.4 m  |
| Váha                    | 245 t           |
| Cena                    | 575 \$ / kWh    |



Tabulka 6: Parametry Průtokové baterie [37]

Obrázek 27: Jednotka CELL CUBE-FB 250-2000 [37]

Vzhledem k tomu, že v tomto případě nemusíme brát v úvahu hloubku vybití, stačí nám akumulátory dimenzovat na původních 8 792 kWh. Prodejce námi vybraného produktu nabízí akumulátory pouze s minimální kapacitou 1200 kWh, proto budeme muset zvýšit celkovou hodnotu akumulace na 9600 kWh, což vychází na 4 jednotky o nominální kapacitě 2 400 kWh. [37]

Protože jsem od výrobce nebyl schopný zjistit pořizovací cenu vybraného produktu, budeme jako v ostatních případech uvažovat průměrnou pořizovací cenu, a to v tomto případě 575 \$/kWh. S námi navrhovanou kapacitou 9 600kWh nám pořizovací náklady vychází na 5 520 000 \$. Při aktuálním kurzu České národní banky jsou celkové investiční náklady vyčísleny na **121 230 240 Kč** (kurz ČNB k 23.5.2023 - 1\$ = 21,962 Kč [58]).

Provozní náklady při uvažování stejné životnosti 10 let, které jsou kolem 0,001\$/kWh/rok, nás celkem vyjdou na **2108 Kč** ( $0,001 \cdot 10 \cdot 9600 \cdot 21,962 \cong 2108$ ). Při udávané životnosti 25 let vychází provozní náklady na **5 271 Kč** ( $0,001 \cdot 25 \cdot 9600 \cdot 21,962 \cong 5271$ ). Celková pořizovací cena během 25leté životnosti vychází na **121 235 511 Kč**. [45]

## 6 Ekonomické zhodnocení akumulace

Během svého ročního provozu je systém akumulace energie schopný vrátit do systému celkem 809 MWh elektrické energie. Tato energie by v řešení pouze FVE bez akumulace musela být nahrazena nákupem elektrické energie z rozvodné sítě z jiných zdrojů. Ekonomické zhodnocení se tedy zaměří na to, jestli se výstavba systému na akumulaci energie během své životnosti vyplatí oproti nákupu elektrické energie za aktuální tržní ceny a jestli je realizace celého projektu reálná. Celkové ekonomické zhodnocení výnosů je v Tabulce 7. Zde je zobrazen teoretický výnos, kterého bychom dosáhli, kdybychom v každém roce provozu akumulovali 809 MWh elektrické energie namísto nakoupení za tržní cenu. Ta byla stanovena podle aktuální ceny elektrické energie na trhu (cena elektrické energie ke dni 24.5.2023 – 3,2328 Kč za kWh [35]). Následně byla cena elektřiny každý rok upravena oproti inflaci, která byla stanovena na 2.4 %.

| Rok | Cena za kWh [Kč] | Výnos [Kč] | Rok | Cena za kWh [Kč] | Výnos [Kč] | Rok                                   | Cena za kWh [Kč] | Výnos [Kč] |
|-----|------------------|------------|-----|------------------|------------|---------------------------------------|------------------|------------|
| 1   | 3.2328           | 2,615,335  | 11  | 4.10             | 3,315,331  | 21                                    | 5.19             | 4,202,682  |
| 2   | 3.31             | 2,678,103  | 12  | 4.20             | 3,394,899  | 22                                    | 5.32             | 4,303,546  |
| 3   | 3.39             | 2,742,378  | 13  | 4.30             | 3,476,377  | 23                                    | 5.45             | 4,406,831  |
| 4   | 3.47             | 2,808,195  | 14  | 4.40             | 3,559,810  | 24                                    | 5.58             | 4,512,595  |
| 5   | 3.55             | 2,875,591  | 15  | 4.51             | 3,645,245  | 25                                    | 5.71             | 4,620,897  |
| 6   | 3.64             | 2,944,606  | 16  | 4.61             | 3,732,731  | <b>Celkový výnos</b>                  |                  |            |
| 7   | 3.73             | 3,015,276  | 17  | 4.72             | 3,822,317  | <b>10 let provozu - 29 166 502 Kč</b> |                  |            |
| 8   | 3.82             | 3,087,643  | 18  | 4.84             | 3,914,052  | <b>25 let provozu - 88 185 986 Kč</b> |                  |            |
| 9   | 3.91             | 3,161,746  | 19  | 4.95             | 4,007,990  |                                       |                  |            |
| 10  | 4.00             | 3,237,628  | 20  | 5.07             | 4,104,181  |                                       |                  |            |

Tabulka 7: Vyhodnocení teoretické úspory pomocí akumulačního systému

Dalším výdajem, který musíme zohlednit, je možnost, kdybychom systém akumulace nevyužili a veškerý přebytečný výkon prodávali. V tomto případě je důležitá výkupní cena, za kterou dodavatel vykupuje přebytečnou energii. Na FVE postavené v roce 2023 není provozována žádná statní podpora a výkupní cena tedy bude stanovena dodavatelem, kterému budeme energii prodávat. Skupina ČEZ nabízí výkup elektřiny z obnovitelných zdrojů s instalovaným výkonem pod 100 kW za cenu OKO-500 Kč/MWh (OKO je cena denního trhu organizovaným OTE v EUR/MWh). V našem případě by byl ale dodávaný výkon vyšší než 100 kW, nicméně pro zdroje vyšší jak 100 kW má ČEZ individuální nabídku výkupu v podobě roční nebo hodinové ceny. Bohužel tuto nabídku jsem nedohledal, a proto budeme v našem případě uvažovat výkupní cenu pro zdroj pod 100 kW. Vzhledem k tomu, že přebytky ve výrobě elektrické energie jsou mezi 7. a 17. hodinou, stanovil jsem průměrnou cenu denního trhu pro tyto hodiny na 93,3 EUR/MWh (ceny na denním trhu byly

stanoveny ke dni 24.5.2023 [18]). Tuto hodnotu jsem podle aktuálního kurzu ČNB stanovil na 2 208,9 Kč/MWh (kurz ČNB k 24.5.2023 – 1EUR = 23,675 Kč [58]).

Finální výkupní cenu elektřiny jsem tedy stanovil na **1,7 Kč/kWh** ((2 208,9-500)/1000 $\cong$ 1,7). S tímto údajem jsme stanovili každoroční ztrátu, kterou bychom získali při prodeji přebytků dodavatel. Ztráty za 10 a 25 let provozu se započtenou inflací jsou vypočteny v Tabulce 8.

| Rok | Cena za kWh [Kč] | Ztráta [Kč] | Rok | Cena za kWh [Kč] | Ztráta [Kč] | Rok                                   | Cena za kWh [Kč] | Ztráta [Kč] |
|-----|------------------|-------------|-----|------------------|-------------|---------------------------------------|------------------|-------------|
| 1   | 1.7              | 1,375,300   | 11  | 2.10             | 1,702,539   | 21                                    | 2.61             | 2,107,641   |
| 2   | 1.74             | 1,408,307   | 12  | 2.16             | 1,743,400   | 22                                    | 2.67             | 2,158,225   |
| 3   | 1.78             | 1,442,107   | 13  | 2.21             | 1,785,241   | 23                                    | 2.73             | 2,210,022   |
| 4   | 1.83             | 1,476,717   | 14  | 2.26             | 1,828,087   | 24                                    | 2.80             | 2,263,062   |
| 5   | 1.87             | 1,512,158   | 15  | 2.31             | 1,871,961   | 25                                    | 2.86             | 2,317,376   |
| 6   | 1.91             | 1,548,450   | 16  | 2.37             | 1,916,888   | <b>Celková ztráta</b>                 |                  |             |
| 7   | 1.96             | 1,585,613   | 17  | 2.43             | 1,962,894   | <b>10 let provozu - 15 337 495 Kč</b> |                  |             |
| 8   | 2.01             | 1,623,668   | 18  | 2.48             | 2,010,003   | <b>25 let provozu - 45 380 719 Kč</b> |                  |             |
| 9   | 2.06             | 1,662,636   | 19  | 2.54             | 2,058,243   |                                       |                  |             |
| 10  | 2.10             | 1,702,539   | 20  | 2.61             | 2,107,641   |                                       |                  |             |

Tabulka 8: Vyhodnocení teoretických ztrát, které vznikly akumulací energie namísto prodeje dodavatel

Nyní nám stačí porovnat pořizovací náklady a ztráty akumulčního systému s teoretickými úsporami na koupi elektrické energie. Návratnosti jednotlivých systémů jsou zobrazeny v Tabulce 9. K vyhodnocení návratnosti jsem použil jednoduchý vzorec a reálná ekonomická bilance podobného projektu by byla komplexnější.

$$\text{Návratnost} = \text{Roční výnos} - \text{Pořizovací cena} - \text{Provozní náklady} - \text{Ztráty na prodeji} \quad (8)$$

|                            | Pořizovací cena [Kč] | Provozní náklady [Kč] | Životnost [rok] | Návratnost [Kč]     |
|----------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|
| <b>Olověné akumulátory</b> | 72,474,600           | 2416                  | 10              | <b>-58,648,009</b>  |
| <b>Li-ion akumulátory</b>  | 193,265,600          | 7247                  | 10              | <b>-179,443,840</b> |
| <b>Průtokové baterie</b>   | 121,230,240          | 2108                  | 10              | <b>-107,403,341</b> |
|                            |                      | 5271                  | 25              | <b>-78,430,244</b>  |

Tabulka 9: Výpočet návratnosti jedlových systémů akumulace energie

### 6.3 Variabilní analýza

Cena elektrické energie na celosvětovém trhu je velmi variabilní parametr. Tato změna v ceně je velmi patrná zejména v dnešní době, kdy se cena elektrické energie byla schopna změnit v průběhu jednoho roku až desetinásobně. Z toho důvodu se tyto fluktuace v ceně pokusíme zohlednit citlivostní analýzou na tyto ceny a zjistíme, jaký mohou mít dopad

na celkovou návratnost projektu. V současné době je cena elektrické energie 2x vyšší, než tomu bylo před dvěma lety. Pokusíme se tedy porovnat několik scénářů vývoje ceny elektrické energie, a to při navýšení výkupní a nákupní ceny o 50 % a při jejím poklesu o 50 % na přibližné hodnoty před dvěma lety. V Tabulce 10 je vypočtena návratnost jednotlivých systémů během jejich životnosti při změnách tržní ceny.

| Typ akumulátoru     | Nákupní cena +50% | Výkupní cena +50% | Nákupní cena -50% | Výkupní cena -50% |                   |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Olověné akumulátory | -36,396,011.30    | -66,316,756.50    | -73,231,260.00    | -50,979,261.50    | Návratnost 10 let |
| Li-ion akumulátory  | -164,860,590.00   | -187,112,587.50   | -194,027,091.00   | -171,775,092.50   | Návratnost 10 let |
| Průtokové baterie   | -92,820,091.00    | -115,072,088      | -121,986,592.00   | -99,734,593.50    | Návratnost 10 let |
|                     | -34,337,251.00    | -101,120,604.28   | -122,523,237.00   | -55,739,885.28    | Návratnost 25 let |

Tabulka 10: Porovnání návratnosti při změně výkupní a nákupní ceny elektrické energie

Z výsledků je patrné, že i v příznivých podmínkách při navýšení nákupní ceny nebo snížení výkupní ceny se žádný ze systémů stále nevyplatí provozovat.

## 6.2 Závislost návratnosti na instalovaném výkonu

Dalším způsobem, jak by se dalo docílit lepší návratnosti, by bylo navýšení instalovaného výkonu, a tím pádem zlepšení využití akumulčního systému. Kapacitu akumulčního systému bychom zachovali na původních 8792 kWh. V případě průtokových baterií jsme nemuseli počítat s hloubkou vybití a celkovou kapacitu jsme tedy podle nabídky na trhu stanovili na 9600 kWh. Toto navýšení instalovaného výkonu při zachování původní kapacity bude mít za následek to, že v některých dnech v roce s vysokým výkonem nebude původní kapacita stačit na uložení veškeré denní vyrobené energie. Tento přebytečný výkon budeme prodávat do přenosové soustavy za výkupní cenu. V tomto případě navýšíme instalovaný výkon podobně jako v předchozí analýze také o 50 %. Celkově se tedy dostaneme z původních 2130 kWp na 3195 kWp. Následně provedeme stejný výpočtový postup, jako jsme udělali v předchozí části práce, s tím rozdílem, že zde ještě započítáme výnos za prodej přebytků do přenosové soustavy. Výsledky produkce elektrické energie jsou opět zobrazeny v Tabulce 11.

| Měsíc                | Výroba FVE [MWh] | Zatížení [MWh] | FVE - přímá spotřeba [MWh] | FVE - do akumulace [MWh] | Hodiny Akumulace |
|----------------------|------------------|----------------|----------------------------|--------------------------|------------------|
| Leden                | 128.34           | 713.06         | 98.17                      | 30.17                    | 43.00            |
| Únor                 | 266.17           | 623.74         | 161.54                     | 104.63                   | 101.00           |
| Březen               | 324.51           | 633.82         | 191.67                     | 132.84                   | 122.00           |
| Duben                | 553.29           | 576.59         | 258.94                     | 294.35                   | 237.00           |
| Květen               | 404.03           | 584.51         | 235.82                     | 168.21                   | 183.00           |
| Červen               | 632.22           | 543.02         | 285.62                     | 346.60                   | 284.00           |
| Červenec             | 506.72           | 534.84         | 262.12                     | 244.60                   | 252.00           |
| Srpen                | 473.07           | 547.74         | 245.51                     | 227.56                   | 233.00           |
| Září                 | 374.79           | 557.71         | 214.89                     | 159.90                   | 180.00           |
| Říjen                | 310.50           | 613.96         | 183.15                     | 127.35                   | 135.00           |
| Listopad             | 131.43           | 634.18         | 98.83                      | 32.60                    | 53.00            |
| Prosinec             | 147.03           | 637.86         | 107.65                     | 39.38                    | 63.00            |
| <b>Průměr za rok</b> | 354.34           | 600.09         | 195.33                     | 159.02                   | 157.17           |
| <b>Celkem za rok</b> | 4252.11          | 7201.04        | 2343.92                    | 1908.19                  | 1886.00          |

Tabulka 11: Porovnání podílu vyrobené elektrické energie na spotřebě při navýšení instalovaného výkonu o 50 %

Ve výsledcích si můžeme povšimnout, že celkový počet hodin využití akumulačního systému v průběhu roku se oproti původnímu řešení zlepšil až o 32 % na 1886 dní v roce. Zajímavá situace nastává během června, kdy systém FVE s akumulací vyrobil více energie, než bylo měsíční zatížení. V tomto měsíci se tedy bude muset počítat s tím, že část naakumulované energie budeme muset prodávat do rozvodné sítě a reálná hodnota, kterou budeme schopni využít k pokrytí spotřeby, bude nižší než udávaných 1,9 GWh.

Provedl jsem denní analýzu porovnání produkce s kapacitou systému a celkově byly systémy využívající olověné a Li-Ion baterie s kapacitou 8792 kWh schopny akumulovat v průběhu roku **1,533 GWh**. K tomu denní nadprodukce, kterou budeme prodávat za výkupní cenu, činí za celý rok **375 MWh**. Takto se dostaneme na 1,9 GWh udávaných v Tabulce 11.

U akumulačního systému využívajícího průtokové baterie počítáme s akumulační kapacitou 9600 kWh. Celkově bude tento systém akumulace schopen během roku uložit **1,613 GWh**. Zbýlých **295 MWh** nadprodukce bude opět prodáno za výkupní cenu.

Následně provedeme stejnou ekonomickou analýzu jako v případě bez navýšení. Z výsledků v Tabulce 12 je patrné, že navýšení výkonu FVE, a tím pádem i zlepšením využití akumulačního systému je v porovnání s původním řešením ekonomicky mnohem výhodnější. Největší zlepšení je viditelné při využití průtokových baterií v průběhu jejich 25leté životnosti. V tomto případě, i když stále v záporných hodnotách, jsme zaznamenali 75% zlepšení v návratnosti oproti původnímu řešení.



|                              | Celkový výnos úspory            | Celkový výnos prodej           | Celková ztráta                 |                 |
|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| Olověné + Li-ion akumulátory | 10 let provozu - 55 249 430 Kč  | 10 let provozu - 7 123 148 Kč  | 10 let provozu - 29 053 462 Kč |                 |
|                              | 25 let provozu - 167 048 674 Kč | 25 let provozu - 21 076 034 Kč | 25 let provozu - 85 963 647 Kč |                 |
| Průtokové baterie            | 10 let provozu - 58 148 666 Kč  | 10 let provozu - 5 598 565 Kč  | 10 let provozu - 30 578 054 Kč |                 |
|                              | 25 let provozu - 175 814 623 Kč | 25 let provozu - 16 565 084 Kč | 25 let provozu - 90 474 625 Kč |                 |
|                              | Typ akumulátoru                 | Celkové náklady [Kč]           | Životnost [rok]                | Návratnost [Kč] |
|                              | Olověné akumulátory             | 72,477,016                     | 10                             | -39,157,900     |
|                              | Li-ion akumulátory              | 193,272,847                    | 10                             | -159,953,731    |
|                              | Průtokové baterie               | 121,232,348                    | 10                             | -88,063,171     |
|                              |                                 | 121,235,511                    | 25                             | -19,330,429     |

Tabulka 12: Ekonomické zhodnocení při navýšení instalovaného výkonu o 50%

### 6.3 Ekonomické vyhodnocení

Z Tabulky 9 je vidět, že během své životnosti se žádný ze systémů akumulace energie nevyplatí provozovat. Pro realizaci projektu by bylo zapotřebí získat nějaký druh dotace nebo jiné finanční podpory. Mezi námi porovnávanými akumulacími systémy v původním řešení nejlépe, i když stále záporně, vycházejí olověné akumulátory. To je hlavně díky jejich nízké pořizovací ceně. O trochu hůře vycházejí průtokové baterie, které mají výhodu ve své delší životnosti. Nejhůře v porovnání vycházejí Li-ion akumulátory, a to hlavně díky své vyšší pořizovací ceně, která je více než 2,5 násobná oproti olověným bateriím. U bateriových systémů musíme ovšem počítat s tím, že během několika dní v roce se pravděpodobně překročí jejich maximální nabíjecí výkon, nicméně tyto ztráty jsou zanedbatelné. Dalším faktorem při určování návratnosti je efektivita akumulacího systému, nicméně vzhledem k tomu, že vybrané akumulací systémy pracují s podobně vysokou efektivitou, byl ztrátový úbytek energie, který vzniká při navracení energie zpět z akumulace, zanedbán. V realitě by tedy výsledek návratnosti byl ještě o něco horší.

Dále jsme do porovnání započítali variabilní analýzu trhu a možnost navýšení instalovaného výkonu. Při kalkulaci návratnosti s variabilní cenou na trhu s energiemi jsme nezaznamenali nijak zásadní zlepšení. V situaci s navýšením instalovaného výkonu při stejné kapacitě jsme díky lepšímu využití systému akumulace dosáhli v návratnosti značného zlepšení. Nejlépe z porovnávaných systémů akumulace vyšly průtokové baterie, kde jsme zaznamenali 75% zlepšení v návratnosti oproti původnímu řešení. Bohužel i v tomto případě jsme se nedostali do pozitivních hodnot návratnosti.

Investice do akumulčního systému tedy není v našem případě výhodná. Výhodnějším provedením by byla pouze samotná instalace FVE s následným odprodejem přebytečné elektrické energie.

## 7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo představit problematiku akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů a následně navržení akumulčního systému v korelaci s časovým průběhem spotřeby elektrické energie z rozvodné sítě.

V rešeršní části jsem se nejdříve zabýval energetickým potenciálem pro obnovitelné zdroje energie na našem území. Následně jsem představil jednotlivé druhy akumulčních systémů, které se v dnešní době využívají. Každý systém jsem stručně popsal a všechny následně porovnal v závislosti na jejich parametrech, jako jsou například typické kapacity nebo efektivita.

V praktické části práce jsem se zabýval návrhem akumulčního systému v kombinaci s fotovoltaickou elektrárnou. Nejdříve jsem si stanovil modelovou spotřebu energie, na jejíž pokrytí jsem svůj návrh cílil. Bilance výroby a spotřeby energie byla dimenzovaná na nejjasnější den v roce, kdy bude fotovoltaická elektrárna dosahovat nejlepších výsledků. Následně jsem porovnáním denní bilance stanovil potřebnou kapacitu akumulace, abychom byly schopni naakumulovat veškeré nevyužité energetický přebytky. S těmito daty jsem byl schopen stanovit celkovou hodnotu elektrické energie, kterou díky akumulčnímu systému budeme moci během roku vrátit do systému. Dalším krokem bylo vybrání konkrétního typu akumulace. Zde jsem kladl největší důraz na pořizovací náklady a celkovou proveditelnost projektu. Z těchto důvodů jsem se rozhodl pro olověné akumulátory, Li-ion akumulátory a průtokové baterie. Nakonec následovalo ekonomické zhodnocení celého řešení. Pomocí informací o průměrných pořizovacích cenách akumulčních systémů, aktuální ceně elektrické energie na mezinárodním trhu a výkupní ceně přebytků od společnosti ČEZ jsem byl schopen vypočítat zjednodušenou ekonomickou analýzu návratnosti. Z výsledků jsem zjistil, že systém akumulace energie v současné době ekonomicky nevyplatí a jeho realizace tedy není výhodná. Jako nejlepší možnost pro akumulaci vyšly olověné baterie, které měly výhodu hlavně ve své pořizovací ceně. Nakonec jsem se ještě snažil zahrnout do zhodnocení variabilitu ceny energií na trhu, kdy jsem nákupní a výkupní cenu zkusil navýšit a následně snížit o 50 %. V poslední řadě jsem ještě zkusil, jestli nedosáhneme lepší návratnosti při navýšení instalovaného výkonu fotovoltaické elektrárny. Toto řešení dosáhlo výrazně lepších výsledků nežli původní koncepce, především při využití průtokových baterií. Bohužel i zde je celková návratnost stále negativní. Z těchto důvodů tedy hodnotím aktuální

proveditelnost tohoto řešení akumulace energie jako ekonomicky nevýhodnou a jedná se tedy spíše o koncept vhodný do blízké budoucnosti, jakmile dojde k navýšení instalovaného výkonu obnovitelných zdrojů energie.

# Seznam použitých zdrojů

- [1] Ministerstvo životního prostředí. *Zákon č. 17/1992 Sb., o životním prostředí, ve znění pozdějších předpisů*. In *Zákon č. 17/1992 Sb., o životním prostředí, ve znění pozdějších předpisů*. Praha 10 : [s.n.], 1992. [online] [Cit. 28.5.2023]. Dostupné z : <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/%24%24OpenDominoDocument.xsp?documentId=5B17DD457274213EC12572F3002827DE&action=openDocument>
- [2] VEVERKOVÁ, Jana, BUFKA, Aleš. *Podíl obnovitelných zdrojů energie na hrubé konečné spotřebě energie 2010–2019 metodika Eurostat – SHARES. 12/2020*. 110 15 Praha, 2020. [online] [Cit. 28.5.2023]. Dostupné z : <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2020/12/Podil-OZE-na-hrube-konecne-spotrebe-energie-2010-2019.pdf>
- [3] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: *Sluneční energie* [online]. c2023 [citováno 28. 05. 2023]. Dostupný z WWW: <[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Slune%C4%8Dn%C3%AD\\_energie&oldid=22780280](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Slune%C4%8Dn%C3%AD_energie&oldid=22780280)>
- [4] DOMONKOŠOVÁ, Lucie. *Sluneční energie – pro a proti*. In: *ekolist.cz*. PRAHA: EkoList, 2000, 2000(-), 1. ISSN 1802-9019.
- [5] *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM* [online]. -: European Comission, 2019 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_download/map\\_index.html](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html)
- [6] *FOTOVOLTAIKA: Solární (fotovoltaické) články*. In: *cez.cz* [online]. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [7] HANSLIAN, David, HOŠEK, Jiří, CHLÁDKOVÁ, Zuzana, POP, Lukáš. *Větrné podmínky v České republice ve výšce 10 m nad povrchem I*. In: *Tzbinfo.cz* [online]. 15.4.2013 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/9770-vetrne-podminky-v-ceske-republice-ve-vysce-10-m-nad-povrchem-i>
- [8] *Off-Grid design for 24 hours - no extra autonomy*. In: *Ecotrades* [online]. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.ecotrades.co.za/solar-info/>

- [9] *Potenciál větrné energie v ČR*. In: *faktaoklimatu.cz*. [online]. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/potencial-vetrne-energie-cr>
- [10] ČEPS – Česká elektroenergetická přenosová soustava [online]. Praha 10 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/data#GenerationRES>
- [11] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: *Větrná energie* [online]. c2023 [citováno 28. 05. 2023]. Dostupný z WWW:  
<[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=V%C4%9Btrn%C3%A1\\_energie&oldid=22475421](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=V%C4%9Btrn%C3%A1_energie&oldid=22475421)>
- [12] VRTEK, Mojmír. *Sluneční energie*. Ostrava, 2012. Odborná práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní. Katedra energetiky.
- [13] ČERVINKA, Pavel. *Porovnání výkonnosti fotovoltaických panelů v podmínkách ČR*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně
- [14] JOHJAK2. Betz's law. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 24.11.2006 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Betz%27s\\_law&action=info](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Betz%27s_law&action=info)
- [15] VOBOŘIL, David. *Větrné elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR*. In: *oenergetice.cz* [online]. Třebíč, 28.2015 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni>
- [16] Zápis z 16. schůze Podvýboru pro energetiku: *Návštěva přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé Stráně (PVE)*. In: Senát Parlamentu České republiky [online]. 22.11.2012 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.senat.cz/doc2html/897604188/index.html>
- [17] [CESTY K AKUMULACI ELEKTRICKÉ ENERGIE](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html). In: *cez.cz*. [online] [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty\\_1.html](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html)
- [18] Operátor trhu s elektřinou. In: *ote.cz*. [online]. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/kratkodobe-trhy/elektrina/denni-trh?date=2023-05-24>

- [19] SKUPINA ČEZ: *Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně*. In: *cez.cz* [online]. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/dlouhe-strane-58155>
- [20] MAREŠ, Jan, LIBRA, Martin, POULEK, Vladislav, Solar, s. r. o. *Akumulace elektrické energie*. In: *ELEKTRO: Časopis pro elektrotechniku* [online]. 2011 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/akumulace-elektricke-energie--9696>
- [21] BARBOUR, Edward. *Compressed Air Energy Storage*. In: *eseslab.com* [online]. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <http://www.eseslab.com/ESsensePages/CAES-page>
- [22] LI, Yaowang, MIAO, Shihong, ZHANG, Shixu, YIN, Binxin, LUO, Xing, DOONER, Mark, WANG, Jihong. *A reserve capacity model of AA-CAES for power system optimal joint energy and reserve scheduling*. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 279-290. ISSN 0142-0615.
- [23] *Compressed air energy storage (CAES)*. In: *Oilfree-air.eu: RTC Group BV* [online]. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.oilfree-air.eu/compressed-air-energy-storage-caes/>
- [24] SOOMRO, Abid, Keith R. PULLEN a Mustafa E. AMIRYAR. *Hybrid PV System with High Speed Flywheel Energy Storage for Remote Residential Loads*. *Clean Technologies* [online]. 2021, 3(2), 351–376. ISSN 2571-8797.
- [25] KRČKA, Pavel. *Fotovoltaické dobíjecí regulátory v ostrovních systémech*. České Budějovice. 2013. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích – Pedagogická fakulta.
- [26] ROBERTSON, Matt. *Lead-Acid vs. Lithium-Ion Batteries*. In: *Mayfield Renewables* [online]. 1.11.2022 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.mayfield.energy/technical-articles/lead-acid-vs-lithium-ion-batteries/>
- [27] ZBOŽÍNEK, Štěpán. *Vliv pulzního nabíjení na vlastnosti olověných akumulátorů*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně

- [28] TICHÝ, Jiří. *Lithiové akumulátory Přehled základních typů a jejich vlastností*. In: *Tzbinfo.cz* [online]. UETE FEKT VUT v Brně, 15.7.2019 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elekriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [29] PAVLOVEC, L., ŽITKA, J., & PIENKA, Z. (2018). *Chemický pohled na lithium-iontové baterie*. In: *Chemické Listy*, 112(8), 508–516 [online]. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3150>
- [30] LIBICH, Jiří. *Superkondenzátor vs. baterie: parametry a použití*. In: *Tzbinfo.cz* [online]. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 18.11.2020 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elekriny/21462-superkondenzator-vs-baterie-parametry-a-pouziti>
- [31] DVOŘÁK, Petr. *Superkondenzátory: (Elektrochemické kondenzátory)*. In: *Tzbinfo.cz* [online]. Ústav Elektrotechnologie, FEKT VUT v Brně, 14.9.2017 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/6710-superkondenzatory>
- [32] BECHNÍK, Bronislav. *Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaice*. In: *Tzbinfo.cz* [online]. 29.9.2014 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaice>
- [33] LIBICH, Jiří. *Superkondenzátor vs. baterie: parametry a použití*. In: *Tzbinfo.cz* [online]. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 18.11.2020 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elekriny/21462-superkondenzator-vs-baterie-parametry-a-pouziti>
- [34] ŠPINA Martin. *Technicky historické okénko: Ni-Cd baterie*. In: *Oenergetice.cz* [online]. 23.7.2021 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/technicky-historicke-okenko-ni-cd-baterie>
- [35] KURZY.CZ. *Elektřina – ceny a grafy elektřiny, vývoj ceny elektřiny 1 kWh – 1 rok – měna EUR*. In: *kurzy.cz* [online]. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: [Elektřina - ceny a grafy elektřiny, vývoj ceny elektřiny 1 kWh - 1 rok - měna EUR | Kurzy.cz](https://kurzy.cz/elektřina-ceny-a-grafy-elektřiny-vývoj-ceny-elektřiny-1-kwh-1-rok-měna-eur)

- [36] *Výroba a použití vodíku* [online]. In: chemistry.ujep.cz. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://chemistry.ujep.cz/13-chemie>
- [37] *The Cell Cube system* [online]. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.cellcube.com/the-cellcube-system/>
- [38] MASTNÝ, P. a spol.: *Obnovitelné zdroje elektrické energie*  
Praha, Vydavatelství ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2
- [39] *PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY U NÁS*. In: cez.cz [online]. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/precerpel\\_1.html](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/precerpel_1.html)
- [40] BAČA, Petr. *Akumulace energie z OZE – vodíkové hospodářství*. In: Tzbinfo.cz [online]. 7.2.2011 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/7134-akumulace-energie-z-oze-vodikove-hospodarstvi>
- [41] PORŠ, Zdeněk. *Palivové články*. In: cez.cz [online]. Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s. Divize jaderné bezpečnosti a energetiky. 2002. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [42] ŠRUBAŘOVÁ, Petra. *Jak fungují palivové články?* In: Tzbinfo.cz [online]. 22.2.2018 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/elektromotory-pohony-a-stroje/16987-jak-funguji-palivove-clanky>
- [43] HORÁK, Stanislav. *Palivové články a jejich použití* [online]. Brno, 2012 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/4625>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav.
- [44] REICHL, Tomáš. *Průtoková baterie*. In: oenergetice.cz [online]. 14.3.2015 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/prutokova-baterie>
- [45] *A Review of Energy Storage Technologies' Application Potentials in Renewable Energy Sources Grid Integration*. Mdpi.com [online]. Poslední změna 15.12.2020 [cit. 2021-3-13]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/24/10511/pdf>



- [46] CHMIELEWSKI, A., KUPECKI, J., SZABLOWSKI, Ł., FIJALOWSKI, K.J., ZAWIESKA, J., BOGDZINSKI, K., KULIK, O. and ADAMCZEWSKI, T., *Currently available and future methods of energy storage*, WWF Poland, ISBN: 978-83-60757-56-7, 2020
- [47] WAGNER, Vladimír. *Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie*. In: *Oenergetice.cz* [online]. 11.9.2018 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/velky-prehled-vyuzivane-i-perspektivni-technologie-akumulace-energie>
- [48] *GSO power: Jiangsu GSO New Energy Technology Co* [online]. Yangzhou [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.gsopower.com/ProDetail/24V48VRackTypeLithiumIonBatterywithLCDDisplay>
- [49] *SOLÁRNÍ KONSTANTA* [online]. In: *cez.cz* [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/solar\\_konst.html](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/solar_konst.html)
- [50] BRONDOS, Otaka. *Sluneční konstanta (solární konstanta) W/m<sup>2</sup>: Konstanta, která je proměnná - hodnota solární (sluneční) konstanty*. In: *Treking.cz* [online]. 21.10.2012 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.treking.cz/astronomie/solarni-konstanta.htm>
- [51] PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. *European Commission* [online]. EU: [ec.europa.eu/](http://ec.europa.eu/), 2001 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/#PVP](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#PVP)
- [52] Elftex. *WINAICO Panel WST-MGX-P3 410 Wp solární černý rám 35 mm* [online]. Plzeň [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.elfetex.cz/winaico-panel-wst-mgx-p3-410wp-solarni-cerny-ram-35-mm-3203328>
- [53] Czech RE Agency o.p.s. *Fotovoltaický střídač – účinnost není vše: Důležitější je maximální výnos energie*. In: *Tzbinfo.cz* [online]. 20.4.2009 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5571-fotovoltaicky-stridac-ucinnost-neni-vse>

- [54] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Transformátor [online]. c2023 [citováno 28. 05. 2023]. Dostupný z WWW: <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Transform%C3%A1tor&oldid=22393102>>
- [55] *JENSYS-2V 1000Ah Baterie s hlubokým cyklem pro solární elektrárnu*. In: *jensysolar.com* [online]. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <http://cz.jensysolar.com/battery/deep-cycle-battery/2v-1000ah-deep-cycle-battery-for-solar-power.html>
- [56] HRZINA, Pavel. *Napětí akumulátorů – od článků k napěťovým systémům bateriových úložišť*. In: *Tzbinfo.cz* [online]. Ing. Pavel Hrzina, Ph.D., 26.3.2020 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/20416-napeti-akumulatoru-od-clanku-k-napetovym-systemum-bateriovych-ulozist>
- [58] Česká národní banka [online]. Praha [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/>

## Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 1: Vývoj podílu OZE na konečné spotřebě energie v České republice v letech 1960-2019 [2] .....                 | 11 |
| Obrázek 2: Průměrný dopad slunečního záření na území České republiky [5] .....   | 12 |
| Obrázek 3: Výroba elektrické energie z fotovoltaiky v průběhu dne [8] .....  | 13 |
| Obrázek 4: Porovnání výroby elektřiny z FVE ve dvou dnech vůči vlivu počasí, data převzata z [10] .....                | 13 |
| Obrázek 5: Princip funkce solárního panelu [6] .....   | 14 |
| Obrázek 6: Změna rychlosti větru před a za turbínou .....  | 15 |
| Obrázek 7: Princip fungování turbíny pomocí odporové, nebo vztakové síly. [15].....                                    | 16 |
| Obrázek 8: Mapa průměrné rychlosti větru v 10 m. [7].....  | 17 |
| Obrázek 9: Celková výroba elektrické energie z větrných elektráren na území České republiky ke dni 1.11.2022 [10]..... | 18 |
| Obrázek 10: Schéma uspořádání PVE v terénu. Převzato z [16].....   | 19 |
| Obrázek 11: Ilustrační obrázek horní nádrže PVE Dlouhé stráně [19] .....   | 20 |
| Obrázek 12: Princip fungování akumulační elektrárny CAES bez spalování přídavného paliva [23].....                     | 21 |
| Obrázek 13: Konstrukce setrvačnickového akumulátoru [24] .....   | 23 |
| Obrázek 14: Princip vybíjení a nabíjení olověného akumulátoru [26].....  | 23 |
| Obrázek 15: Princip fungování průtokové baterie [44] .....   | 26 |
| Obrázek 16: Ilustrační příklady superkondenzátorů. Převzato od firmy Maxwell z [34]. .....                             | 28 |
| Obrázek 17: Princip fungování palivového článku. Převzato z [38].....  | 29 |
| Obrázek 18: Graf zatížení během roku.....  | 33 |
| Obrázek 19: Umístění FVE poblíž obce Senohraby [51].....   | 34 |
| Obrázek 20: Graf slunečního záření během roku 2019 [51].....   | 35 |
| Obrázek 21: Průběh slunečního záření během 29. června 2019 [51].....   | 36 |
| Obrázek 22: Výkon FVE v závislosti na čase dne 29.6.2019 [51] .....  | 37 |
| Obrázek 23: Porovnání výkonu FVE s vytížením v průběhu dne 29.6.2019 [51] [10].....                                    | 38 |
| Obrázek 24: Porovnání podílu vyrobené elektrické energie na spotřebě během roku 2019..                                 | 39 |
| Obrázek 26: Investiční náklady u různých typů akumulačních systémů [45] [46] .....                                     | 41 |
| Obrázek 27: Jednotka CELL CUBE-FB 250-2000 [37] .....  | 44 |

# Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1: Porovnání parametrů akumulčních technologií [45] [46] [47] [56]. * Hodnoty kapacit a výkonů u alkalických akumulátorů byly vyjádřeny pro jeden článek akumulátoru, pro vyšší hodnoty lze články spojovat do větších systémů..... | 32 |
| Tabulka 2: Parametry fotovoltaického panelu WINACO WST-MGX-P3 410Wp [52] .....  | 36 |
| Tabulka 3: Porovnání podílu vyrobené elektrické energie na spotřebě během roku 2019.....  | 39 |
| Tabulka 4: Parametry olověného akumulátoru od firmy Jensys Power dostupné z [55] .....  | 42 |
| Tabulka 5: Parametry Li-Ion akumulátoru od firmy GSO POWER dostupné z [48] .....  | 43 |
| Tabulka 6: Parametry Průtokové baterie [37].....  | 44 |
| Tabulka 7: Vyhodnocení teoretické úspory pomocí akumulčního systému .....   | 45 |
| Tabulka 8: Vyhodnocení teoretických ztrát, které vznikli akumulací energie namísto prodeje dodavateli.....  | 46 |
| Tabulka 9: Výpočet návratnosti jedlových systémů akumulace energie .....  | 46 |
| Tabulka 10: Porovnání návratnosti při změně výkupní a nákupní ceny elektrické energie ....  | 47 |
| Tabulka 11: Porovnání podílu vyrobené elektrické energie na spotřebě při navýšení instalovaného výkonu o 50 % .....   | 48 |
| Tabulka 12: Ekonomické zhodnocení při navýšení instalovaného výkonu o 50% .....   | 49 |