



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

OPTIMALIZACE VELIKOSTI BATERIOVÉHO ÚLOŽIŠTĚ V PRŮMYSLOVÝCH OBJEKTECH S OBNOVITELNÝMI ZDROJI

BATTERY ENERGY STORAGE SIZING OPTIMIZATION IN INDUSTRIAL BUILDINGS WITH RENEWABLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Prečuch

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Vojtek, Ph.D.

BRNO 2024



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Martin Prečuch

ID: 211578

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Optimalizace velikosti bateriového úložiště v průmyslových objektech s obnovitelnými zdroji

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše použitelných typů bateriových úložišť v průmyslových objektech a možnosti jejich využití
2. Volba způsobu využití, algoritmicke řízení
3. Přínosy navrženého řídicího systému verifikovat na typovém objektu prostřednictvím simulace ve vybraném softvérovém prostředí
4. Velikostní optimalizace bateriového úložiště s obnovitelným zdrojem i bez
5. Zhodnocení přínosu navrženého řešení z ekonomického pohledu

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 20.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Martin Vojtek, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cieľom tejto práce bolo vytvoriť aplikáciu, softvérový nástroj, ktorý umožní optimálne zvoliť veľkosť batériového úložiska, z ekonomického a technického hľadiska, pomocou výpočtu energetických a výkonových bilancií. Tieto výpočty sú uskutočnené na základe vstupných dát pre definovaný časový úsek, spotreby objektu, parametrov batériového úložiska a fotovoltaickej elektrárne. V teoretickej časti práce bola vykonaná rešerš zameraná na nájdenie vhodných akumuláčnych systémov v priemyselných objektoch a možnosti ich využitia. V tretej kapitole bola popísaná algoritmizácia a vývoj aplikácie zameranej na orezávanie špičiek a znižovanie rezervovanej kapacity priemyselného objektu prostredníctvom batériového úložiska. Kapitola detailne popisuje potrebné vstupné údaje pre simuláciu, tvorbu aplikácie a jednotlivé časti programu sú popísané pomocou vývojových diagramov. Ďalej je popísaná tvorba grafického užívateľského rozhrania aplikácie a ekonomická analýza. Štvrtá kapitola sa zameriava na prípadovú štúdiu s dvoma scenármi. Na základe prípadovej štúdie bola overená, potvrdená a prezentovaná funkčnosť aplikácie.

Kľúčové slová

Batériové úložisko, Orezávanie špičiek, Rezervovaná kapacita, Ekonomická analýza

Abstract

The aim of this work was to create an application, a software tool, which will allow to optimally choose the size of the battery storage, from an economic and technical point of view, using the calculation of energy and power balances. These calculations are based on input data for a defined period, object consumption, battery storage parameters and photovoltaic power plant. In the theoretical part of the work, research was conducted to find suitable storage devices for industrial facilities and explore their potential applications. The third chapter covers the algorithmization and development of an application focused on peak shaving and reducing the reserved capacity of an industrial facility through battery storage. The chapter describes in detail the necessary input data for simulation, application development, and individual parts of the program are described using flow diagrams. Following this, the creation of the graphical user interface of the application and the economic analysis are detailed. The fourth chapter presents a case study with two scenarios. Based on the case study, the functionality of the application was verified, confirmed, and demonstrated.

Keywords

Battery storage, Peak shaving, Reserved capacity, Economic analysis

Bibliografická citácia

PREČUCH, Martin. *Optimalizace velikosti bateriového úložiště v průmyslových objektech s obnovitelnými zdroji*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159514>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Martin Vojtek.

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko študenta:	Martin Prečuch
VUT ID študenta:	211578
Typ práce:	Diplomová práca
Akademický rok:	2023/2024
Téma záverečnej práce:	Optimalizácia veľkosti batériového úložiska v priemyselných objektoch s obnoviteľnými zdrojmi

Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 20. mája 2024

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce Ing. Martinovi Vojtekovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

V Brne dňa: 20. mája 2024

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ZOZNAM TABULIEK	11
ÚVOD	12
1. AKUMULAČNÉ SYSTÉMY	13
1.1 PARAMETRE ÚLOŽÍSK ENERGIE.....	14
1.2 LÍTIUM-IÓNOVÉ BATÉRIE.....	15
1.2.1 LCO.....	16
1.2.2 LMO.....	16
1.2.3 LFP.....	17
1.2.4 NCA.....	17
1.2.5 NMC.....	17
1.2.6 LTO.....	17
1.3 OLOVENÉ BATÉRIE	18
1.3.1 Zaplavené olovené batérie	19
1.3.2 Ventilom regulované olovené batérie.....	19
1.4 VYSOKOTEPLTNÉ BATÉRIE	20
1.4.1 Sodíkovo-sírové batérie.....	20
1.4.2 Chlorid-nikel-sodík batérie	20
1.5 NIKLOVÉ BATÉRIE	21
1.5.1 Nikel-kadmiové batérie	21
1.5.2 Nikel-metal hydrid batérie	21
1.6 PRIETOKOVÉ BATÉRIE.....	21
1.6.1 Vanádium-redoxné prietokové batérie	22
1.6.2 Zinkovo-brómové prietokové batérie	22
2. MOŽNOSTI APLIKÁCIÍ BATÉRIOVÝCH SYSTÉMOV V PRIEMYSLE.....	24
2.1 ENERGETICKÁ ARBITRÁŽ.....	25
2.2 PODPORA NAPÁJACÍCH SYSTÉMOV	25
2.3 REGULÁCIA FREKVENCIE.....	25
2.4 TOČIVÁ A NETOČIVÁ REZERVA	26
2.5 PODPORA NAPÄTIA	26
2.6 BLACK START	26
2.7 SLUŽBY PRE PRENOSOVÚ A DISTRIBUČNÚ INFRAŠTRUKTÚRU	27
2.8 KVALITA ENERGIE	27
2.9 SPOĽAHLIVOSŤ NAPÁJANIA	27
2.10 OREZÁVANIE ŠPIČIEK	27
3. ALGORITMIZÁCIA A VÝVOJ APLIKÁCIE PRE SIMULOVANIE BATÉRIOVÉHO ÚLOŽISKA	30
3.1 VSTUPNÉ DÁTA PRE SIMULÁCIU.....	31
3.1.1 Vstupné dáta o spotrebe elektrickej energie	31
3.1.2 Vstupné dáta o výrobe elektrickej energie z fotovoltickej elektrárne.....	33
3.1.3 Vstupné údaje o batérovom úložisku.....	35
3.1.4 Vstupné údaje o orezávaní špičkového zaťaženia	36

3.1.5	<i>Ekonomická analýza a jej vstupné údaje</i>	37
3.1.6	<i>Interval a spustenie simulácie</i>	39
3.2	SPRACOVANIE VSTUPNÝCH DÁT	40
3.3	PROCES VYBÍJANIA BATÉRIOVÉHO ÚLOŽISKA	43
3.4	PROCES AKUMULÁCIE PREBYTKU ELEKTRICKEJ ENERGIE	44
3.5	STRATÉGIA PRIEBEŽNÉHO NABÍJANIA „INTERMEDIATE CHARGING“	45
3.6	STRATÉGIA NABÍJACÍCH INTERVALOV „CHARGING INTERVALS“	46
3.7	VYHODNOTENIE SIMULÁCIE	47
3.8	CITLIVOSTNÁ ANALÝZA	49
3.9	GRAFICKÉ UŽÍVATEĽSKÉ ROZHRAVIE APLIKÁCIE	49
3.9.1	<i>Panel s dátami o spotrebe</i>	50
3.9.2	<i>Panel s dátami o batériovom úložisku</i>	51
3.9.3	<i>Panel s dátami o fotovoltaičkej elektrárni</i>	51
3.9.4	<i>Panel s dátami o rezervovanej kapacite a orezávaní špičkovej spotreby</i>	52
3.9.5	<i>Panel s dátami pre výpočet ekonomickej analýzy</i>	53
3.9.6	<i>Panel pre nastavenie dĺžky simulácie a spustenie simulácie</i>	54
3.9.7	<i>Karta s výsledkami simulácie</i>	54
3.9.8	<i>Karta s výsledkami citlivostnej analýzy</i>	55
3.9.9	<i>Zobrazenie výsledkov pomocou grafických závislostí</i>	56
3.9.10	<i>Karta s výsledkami ekonomickej analýzy</i>	59
3.10	SYSTÉMOVÉ POŽIADAVKY NA SPUSTENIE APLIKÁCIE.....	60
4.	PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA	63
4.1	ZNÍŽENIE REZEROVANEJ KAPACITY INŠTALÁCIU BATÉRIOVÉHO ÚLOŽISKA	64
4.2	ZNÍŽENIE REZEROVANEJ KAPACITY INŠTALÁCIU BATÉRIOVÉHO ÚLOŽISKA A FOTOVOLTAICKEJ ELEKTRÁRNE	70
	ZÁVER	75
	LITERATÚRA	77
	ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	82
	ZOZNAM PRÍLOH	84

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1: Klasifikácia technológií ukladania energie	13
Obrázok 2: Princíp činnosti lítium-iónovej batérie [4]	15
Obrázok 3: Princíp činnosti olovenej batérie [4]	18
Obrázok 4: Princíp činnosti sodíkovo-sírovej batérie [4]	20
Obrázok 5: Schematický diagram prietokovej batérie [4]	22
Obrázok 6: Rozsah služieb, ktoré môžu poskytovať akumulačné systémy	24
Obrázok 7: Orezávanie špičiek využitím batériového úložiska [24]	28
Obrázok 8: Členenie programu	31
Obrázok 9: Normalizovaný typový diagram dodávky [25]	32
Obrázok 10: Chybové hlásenie v prípade, že nie je nahratý súbor s nameranými dátami	33
Obrázok 11: Solárne databázy pre jednotlivé regióny [27].....	35
Obrázok 12: Chybové hlásenie v prípade problému s komunikáciou so serverom PVGIS	35
Obrázok 13: Chybové hlásenie v prípade zadania neexistujúceho dátumu	40
Obrázok 14: Chybové hlásenie v prípade zadania nesprávneho intervalu simulácie	40
Obrázok 15: Vývojový diagram pre výpočet výkonových bilancií systému	41
Obrázok 16: Vývojový diagram algoritmu pre riadenie vybíjania a nabíjania batériového úložiska	42
Obrázok 17: Vývojový diagram algoritmu pre riadenie vybíjania batériového úložiska.....	43
Obrázok 18: Vývojový diagram algoritmu pre riadenie nabíjania batériového úložiska z fotovoltaickej elektrárne.....	44
Obrázok 19: Vývojový diagram algoritmu pre riadenie nabíjania batériového úložiska stratégiou pribežného nabíjania.....	45
Obrázok 20: Vývojový diagram algoritmu pre riadenie nabíjania batériového úložiska stratégiou nabíjajúcich intervalov	46
Obrázok 21: Vývojový diagram algoritmu pre vyhodnotenie simulácie	48
Obrázok 22: Vývojový diagram algoritmu pre ekonomickú analýzu	48
Obrázok 23: Vývojový diagram algoritmu pre citlivostnú analýzu	49
Obrázok 24: Panel pre zadávanie vstupných údajov o spotrebe	50
Obrázok 25: Panel pre zadávanie vstupných údajov o batériovou úložisku	51
Obrázok 26: Panel pre zadávanie vstupných údajov o fotovoltaickej elektrárni	52
Obrázok 27: Panel pre zadávanie údajov o orezávaní špičkového výkonu.....	53
Obrázok 28: Panel pre zadávanie údajov na výpočet ekonomickej analýzy	53
Obrázok 29: Panel pre zadávanie dĺžky simulácie a jej spustenie	54
Obrázok 30: Rozloženie karty s výsledkami simulácie	55
Obrázok 31: Karta s výsledkami citlivostnej analýzy	56
Obrázok 32: Grafické zobrazenie výroby fotovoltaickej elektrárne a spotreby objektu v čase	57
Obrázok 33: Grafické zobrazenie výkonu systému s vyznačením orezávania špičkovej záťaže v čase	57
Obrázok 34: Grafické zobrazenie výkonu batériového úložiska v čase.....	58
Obrázok 35: Grafické zobrazenie stavu nabitia batériového úložiska v čase	58
Obrázok 36: Histogram nabíjania a vybíjania batériového úložiska	59
Obrázok 37: Karta s výsledkami ekonomickej analýzy	60
Obrázok 38: Profil spotreby priemyselného objektu v roku 2023	63
Obrázok 39: Výkon objektu v čase po znížení rezervovanej kapacity a inštalácii batériového úložiska....	66
Obrázok 40: Priebeh výkonu batériového úložiska v čase.....	67
Obrázok 41: Histogram nabíjania a vybíjania batériového úložiska.....	67
Obrázok 42: Priebeh stavu nabitia batériového úložiska v čase	68
Obrázok 43: Vývoj čistej súčasnej hodnoty v čase.....	69

Obrázok 44: Diskontovaný peňažný tok v čase	69
Obrázok 45: Výkon objektu v čase po inštalácii fotovoltaickej elektrárne a batériového úložiska s nižšou kapacitou	71
Obrázok 46: Priebeh výkonu batériového úložiska v čase.....	72
Obrázok 47: Histogram nabíjania a vybíjania batériového úložiska.....	72
Obrázok 48: Priebeh stavu nabitia batériového úložiska v čase	73
Obrázok 49: Vývoj čistej súčasnej hodnoty v čase.....	74
Obrázok 50: Diskontovaný peňažný tok v čase	74

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1: Súhrn parametrov lítium-iónových technológií [8], [10], [12]	18
Tabuľka 2: Prehľad výhod a nevýhod zaplavených olovených batérií [4].....	19
Tabuľka 3: Prehľad výhod a nevýhod ventilom regulovaných olovených batérií [4].....	19
Tabuľka 4: Prehľad výhod a nevýhod vanádium-redoxných prietokových batérií [4]	22
Tabuľka 5: Prehľad výhod a nevýhod zinkovo-brómových prietokových batérií [4].....	23
Tabuľka 6: Prehľad parametrov batériových technológií [1].....	23
Tabuľka 7: Súhrn služieb akumuláčnych systémov a ich charakteristiky [18], [22].	29
Tabuľka 8: Systémové požiadavky na spustenie MATLAB Runtime pre Windows [35]	61
Tabuľka 9: Systémové požiadavky na spustenie MATLAB Runtime pre Linux [36].....	61
Tabuľka 10: Systémové požiadavky na spustenie MATLAB Runtime pre Mac [37]	62
Tabuľka 11: Ceny za rezervovanú kapacitu prevádzkovateľa distribučnej sústavy [38]	64
Tabuľka 12: Parametre zvoleného batériového úložiska zadané do programu.....	64
Tabuľka 13: Prehľad investičných nákladov batériových úložísk	65
Tabuľka 14: Ekonomické vstupy pre výpočet ekonomickej analýzy	65
Tabuľka 15: Prehľad nových hodnôt mesačnej rezervovanej kapacity	66
Tabuľka 16: Výpis energetických bilancií za simulované obdobie	67
Tabuľka 17: Výsledky ekonomickej analýzy	68
Tabuľka 18: Vstupné údaje o fotovoltickej elektrárni.....	70
Tabuľka 19: Ekonomické vstupy pre výpočet ekonomickej analýzy.....	70
Tabuľka 20: Výpis energetických bilancií za simulované obdobie	71
Tabuľka 21: Výsledky ekonomickej analýzy s fotovoltickou elektrárnou.....	73

ÚVOD

Integrácia obnoviteľných zdrojov energie, najmä fotovoltaických elektrární a technológií akumulácie energie sa stáva čoraz dôležitejšou pri vytváraní trvalo udržateľných energetických systémov. V tomto kontexte sa systémy batériových úložísk ukázali ako vhodný nástroj na optimalizáciu energetického manažmentu v rôznych sektoroch, vrátane priemyselných objektov. Kombinácia batériových úložísk a fotovoltaických elektrární ponúka príležitosť na zvýšenie účinnosti a spoľahlivosti dodávok energie pri súčasnom znížení prevádzkových nákladov a dopadu na životné prostredie. Ústredným bodom tohto prechodu je potreba efektívnych riešení skladovania energie schopných zmierniť prerušovanie obnoviteľných zdrojov a optimalizovať spotrebu energie.

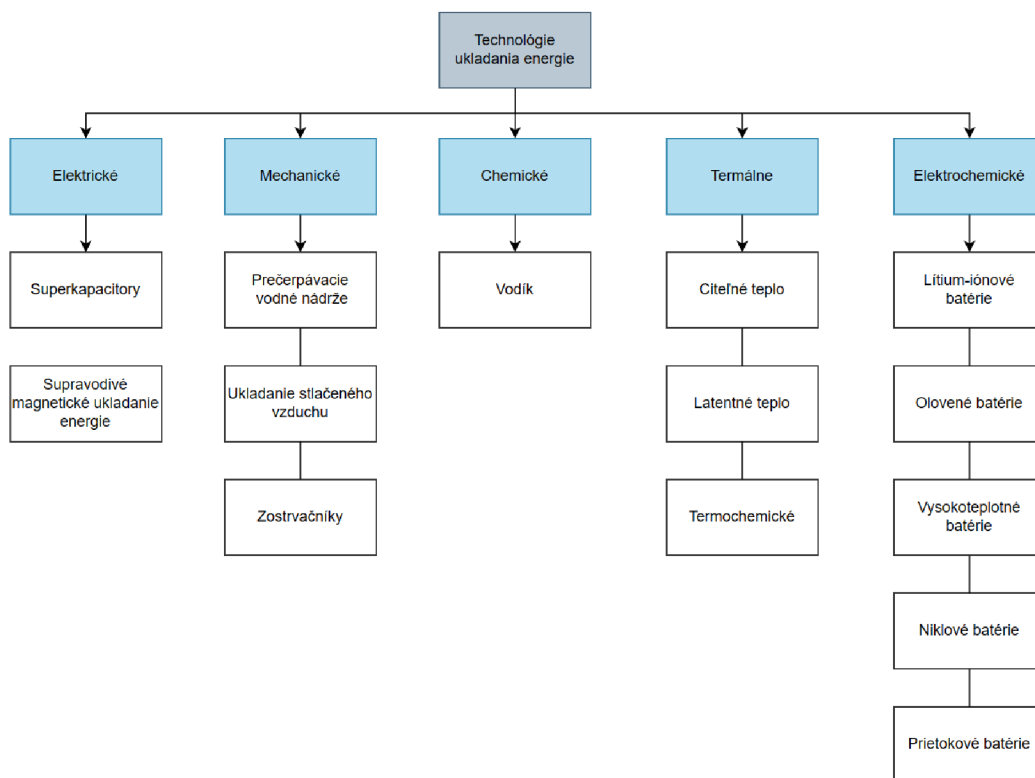
Táto diplomová práca sa zameriava na preskúmanie možných elektrochemických technológií akumulácie elektrickej energie v priemyselných objektoch a ich využitie. Na základe tohto preskúmania boli vybrané služby orezávanie špičiek, podpora napájacích zdrojov a spoľahlivosť napájania, pre ktoré bola vyvinutá aplikácia. Táto aplikácia bola vytvorená v prostredí MATLAB App Designer a verzii MATLAB 2022b. Cieľom bolo vytvoriť univerzálnu aplikáciu na optimalizáciu veľkosti batériového úložiska pre priemyselný objekt s hlavným zameraním na orezávanie špičiek a znižovanie rezervovanej kapacity. Pri tvorbe aplikácie sa uvažovalo s možnosťou využitia fotovoltaickej elektrárne.

V diplomovej práci je popísaný postup tvorby aplikácie, ako aj potrebné vstupné údaje pre jej správny chod. Jednotlivé časti programu sú detailne popísané a znázornené pomocou vývojových diagramov. Aplikácia umožňuje používateľovi výber zdroja vstupných údajov a možnosti výroby elektrickej energie prostredníctvom fotovoltaickej elektrárne. Následne je vypočítaná ekonomická a citlivostná analýza pre zvolené riešenie.

Pre overenie funkčnosti aplikácie a zvoleného riešenia je prevedená prípadová štúdia. Táto prípadová štúdia simuluje batériové úložisko pre primyselný objekt, pre ktorý boli k dispozícii namerané dáta o spotrebe počas celého roku. Na základe tejto prípadovej štúdie bola overená funkčnosť aplikácie a preukázané ekonomické výhody orezávania špičiek a zníženia rezervovanej kapacity pre zvolený priemyselný objekt.

1. AKUMULAČNÉ SYSTÉMY

Akumulácia energie sa vzťahuje na proces uchovania energie na neskoršie použitie. Bez akumulácie energie musí množstvo vyrobenej energie zodpovedať množstvu spotrebovanej energie. Akumulačné zariadenia umožňujú využitie energie vyrobenej v čase nízkeho dopytu, v časoch so zvýšeným dopytom. Na akumuláciu elektrickej energie sa využívajú rôzne formy. Medzi najpoužívanejšie patria elektrická, mechanická, chemická, termálna a elektrochemická akumulácia elektrickej energie. Akumulačné systémy je možné kategorizovať podľa rôznych kľúčových parametrov, ako je vhodná doba skladovania, čas vybíjania, alebo rozdelenia na stacionárne a mobilné aplikácie. Práve využívanie elektrochemickej akumulácie energie pre stacionárne aplikácie je cieľom tejto práce a jednotlivé technológie sú popísané v nasledujúcich podkapitolách [1], [2], [3].



Obrázok 1: Klasifikácia technológií ukladania energie

Decentralizovaná výroba elektrickej energie zahŕňa rôzne zdroje výroby, a to najmä využitie obnoviteľných zdrojov prostredníctvom solárnych a veterných elektrární. Solárne a veterné elektrárne sa vyznačujú svojou premenlivosťou výroby elektrickej energie, čo je ich veľkou nevýhodou oproti konvenčným zdrojom energie, pri ktorých je jednoduché zosúladienie výroby a spotreby elektrickej energie. Nepriaznivý vplyv týchto elektrární vyplýva z premenlivého slnečného žiarenia a rýchlosti vetra. Využívanie

batériových akumulčných systémov je možným riešením zníženia fluktuácie obnoviteľných zdrojov, uľahčením ich prieniku do energetického mixu, zvýšením prevádzkovej flexibility a optimálneho riadenia energetického systému. Akumulačné systémy napomáhajú zákazníkovi flexibilne riadiť spotrebu a výrobu z premenlivých zdrojov elektrickej energie [1], [2], [3].

Technológie na akumuláciu energie majú rôzne vlastnosti, ktoré určujú ich technické využitie pre určité typy aplikácií. Napríklad závislosť od času vybíjania, menovitého výkonu, kapacity alebo hustoty energie. Na základe týchto parametrov sa často využitie akumulčných zariadení líši. Pri výbere vhodnej akumulčnej technológie je preto potrebné zohľadniť viaceré faktory [4].

1.1 Parametre úložísk energie

V tejto kapitole sú vymenované a popísané dôležité parametre úložísk energie. Nasledujúce druhy parametrov a ich definície boli prevzaté z [5], [6].

Špecifická energia: udáva množstvo energie, ktoré môže byť uložené v danom systéme na jednotku hmotnosti. Čím vyššia hustota energie systému, tým väčšie množstvo energie je uložené. Jednotkou špecifickej energie je Wh/kg.

Hustota výkonu: udáva koľko energie dokáže akumulčný systém uvoľniť na jednotku hmotnosti alebo objemu. Hustota výkonu je udávaná vo W/kg alebo W/l.

Životnosť cyklu: udáva počet, koľko krát je možné akumulčný systém nabiť a vybiť. Ich životnosť závisí od rôznych faktorov ako sú teplota skladovania, stav vybitia, hĺbka vybitia alebo C-rate.

Stav nabitia (SoC): stav nabitia udáva množstvo energie dostupnej v akumulčnom systéme v určitom čase. Stav nabitia je udávaný v percentách a určuje sa podľa nasledujúcej rovnice, kde C je kapacita v určitom čase a C_0 je kapacita pri plnom nabití.

$$SoC = \frac{C}{C_0} \cdot 100 \quad (1.1)$$

Hĺbka vybitia (DoD): hĺbka vybitia určuje percento vybitia akumulčného systému v pomere k celkovej kapacite systému. Čím častejšie je akumulčný systém nabíjaný a vybíjaný, tým bude jeho životnosť kratšia. Hĺbka vybitia je určená pomocou nasledujúcej rovnice.

$$DoD = \frac{C_0 - C}{C_0} \cdot 100 = 1 - SoC \quad (1.2)$$

C-rate: udáva rýchlosť nabíjania a vybijania. Plne nabitý akumulačný systém hodnotený 1C s kapacitou 1 Ah, by mal poskytovať prúd 1 A po dobu 1 hodiny. Rovnaký systém vybijaný pri 0,5 C, by mal poskytovať 500 mAh po dobu 2 hodín a pri 2C dodávať 2 A počas 30 minút.

Samovybijanie: určuje nepretržitú stratu akumulovanej energie v dôsledku vnútorných procesov akumulačného systému, ktorá je udávaná v percentách.

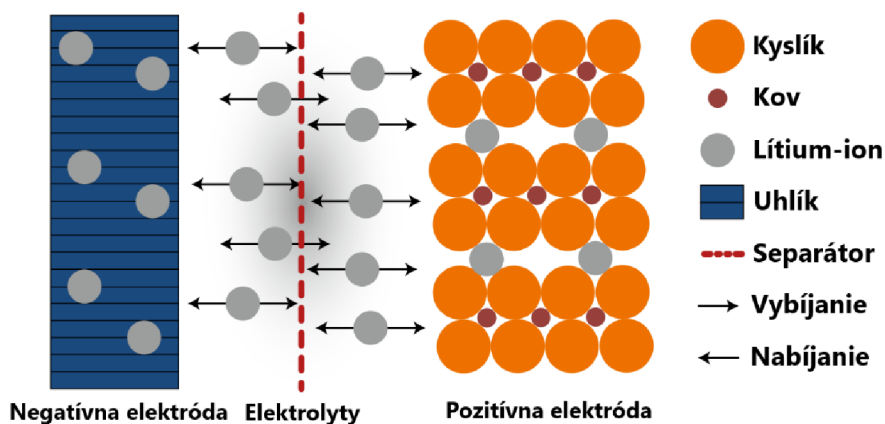
Čas odozvy: určuje čas potrebný na to, aby akumulačný systém dosiahol nominálny výkon z pokojného stavu. Jednotlivé aplikácie sú rôzne závislé na čase odozvy, ale je vhodné, aby bol čo najkratší. Čas odozvy je udávaný v sekundách.

Účinnosť cyklu: udáva účinnosť cyklu nabíjania a vybijania akumulačného zariadenia. Účinnosť cyklu akumulačného zariadenia je udávaná v percentách.

1.2 Lítium-iónové batérie

Lítium-iónové batérie sa používajú dlhodobo a v rôznych priemyselných odvetviach. Z dostupných kovov pre chémiu batérií, je lítium považované za najsľubnejšie. Je široko dostupné, ľahké a elektropozitívne. Táto základná výhoda umožňuje batériám na základe lítia, aby mali vyšší potenciál na skladovanie energie oproti iným chemickým látkam. Jednou z nevýhod je jeho vysoká reaktivita, takže je technologicky náročné skonštruovať bezpečné batérové články obsahujúce lítium. Tento problém bol riešený nepoužívaním kovového lítia, ale používaním zlúčenín, ktoré sú schopné dodávať lítiové ióny (Li^+) [7], [10].

Hlavnými komponentmi článkov lítium-iónových batérií sú katóda, anóda, elektrolyt a separátor. Počas nabíjania sa lítiové ióny pohybujú od katódy cez elektrolyt, až k anóde a počas vybijania je tento proces obrátený [7].



Obrázok 2: Princíp činnosti lítium-iónovej batérie [4]

Komerčne využívané batérie nesú názov podľa lítium-iónového donora v katóde, ktorý je hlavný determinant vlastnosti článku. K tomuto účelu sa vyžívajú následné chemické zloženia lítium-iónových batérií [8], [9]:

- Lithium Cobalt Oxide (LCO)
- Lithium Manganese Oxide (LMO)
- Lithium Iron Phosphate (LFP)
- Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (NCA)
- Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC)
- Lithium Titanium Oxide (LTO)

Anóda je prevažne vyrábaná z grafitu, pre jeho nižšiu cenu a dostupnosť. Nízka tepelná rozťažnosť lítium-iónových batérií pomáha udržiavať pôvodnú kapacitu nabíjania a vybíjania aj po dlhých cykloch. Výrobný proces je podobný ako pri katódach, avšak zmes je nalepená na medenej fólii v puzdre anódy. Hlinená fólia katódy a medená fólia anódy sú vyvedené k terminálom článkov batérie [7].

Elektrolyt je zmesou soli lítia, ako sú napríklad hexafluorofosforečnan lítny (LiPF_6), chloristan lítny (LiClO_4), lítium-exafluóarsenát (LiAsF_6) a organických rozpúšťadiel. Organické rozpúšťadlo je kriticky dôležité pre zvýšenie mobility lítiových iónov a je tak kľúčový faktor výkonu batérie [7].

Separátor je bezpečnostný komponent medzi katódou a anódou. Zabraňuje ich priamemu kontaktu, teda skratu a zároveň je priepustný pre ióny lítia. Najčastejšie sa na výrobu separátorov používa polyetylén a polypropylén. Pri nadmernom zahrievaní batéριοvého článku dochádza k tepelnému úniku, kde sa tieto materiály topia a dochádza k degradácii mikroporéznych vlastností a blokovaniu toku iónov. Táto vlastnosť nenapraviteľne poškodí batériu, ale zabráni tak veľkým negatívnym následkom [4], [7].

1.2.1 LCO

Lítium-kobalt-oxid batéria je vyrobená z LiCoO_2 katódy a grafitovej anódy. Táto technológia sa vyznačuje dlhou životnosťou cyklu a vysokou hustotou energie. Špecifická energia tohto typu batérie je v rozmedzí 150–200 Wh/kg. Medzi nevýhody patrí relatívne nízka celková životnosť, nízka tepelná stabilita a obmedzené možnosti zaťaženia, keďže disponuje nižším špecifickým výkonom a nedokáže zvládať veľké prúdy. LCO technológia je charakterizovaná pomerne nízkym počtom plných cyklov približne od 500–1 000, a preto je najčastejšie využívaná v mobilných telefónoch a iných prenosných zariadeniach [4], [8], [10].

1.2.2 LMO

Lítium-mangán-oxid batérie majú katódu vyrobenú z LiMn_2O_4 a anódu vyrobenú z grafitu. Ich trojrozmerná spinelová štruktúra podporuje tok iónov na elektróde, čo vedie k nízkemu vnútornému odporu a lepšiemu zvládnutiu prúdu. Oproti LCO technológii

majú LMO batérie dlhšiu životnosť, v rozsahu 1 000–1 500 cyklov, ale nižšiu energetickú hustotu v rozsahu 100–150 Wh/kg. Technológia je však bezpečnejšia a neobsahuje kobalt. Ich využitie nie je bežné a používajú sa na špeciálne aplikácie [4], [8], [10].

1.2.3 LFP

Lítium-železo-fosfátové LiFePO_4 batérie majú výdrž približne 2 000 úplných cyklov a články dokážu udržiavať konštantné napätie a konštantný výkon. Napriek nižšej špecifickej energii, ktorá sa pohybuje v rozsahu 90–140 Wh/kg, patrí táto technológia medzi najperspektívnejšie z radov lítiových batérií vďaka jej bezpečnosti, vysokej kapacite a nízkemu environmentálnu dopadu. Majú dobrú tepelnú stabilitu, dlhú životnosť a nízku mieru samovybíjania [4], [8], [10].

1.2.4 NCA

Lítium-nikel-kobalt-oxid batérie LiNiCoAlO_2 disponujú vysokou špecifickou energiou 200–250 Wh/kg, v pomerne malom a ľahkom článku, vysokým špecifickým výkonom a počtom 1 000–1 500 úplných cyklov. Udržujú si približne 80–90 % z pôvodnej kapacity batérie po niekoľkých stovkách cykloch a majú nízku mieru samovybíjania a to 1–2 % za mesiac. Nevýhodami tejto technológie sú znížená bezpečnosť a vysoké náklady batérie. Tento typ batérií je najčastejšie využívaný v automobilovom priemysle na pohon elektromobilov [4], [8], [10].

1.2.5 NMC

Lítium-nikel-mangán-kobalt-oxid batérie LiNiMnCoO_2 majú oproti batériám s technológiou NCA nižšiu hustotu energie, pohybujúcu sa v rozsahu 150–200 Wh/kg, ale dlhšiu životnosť 1 000–2 000 úplných cyklov. Podiel niklu, mangánu, a kobaltu je možné meniť, s cieľom upraviť charakteristiky batérie pre špecifické aplikácie. Zvýšením podielu niklu sa dosiahne vyššia špecifická energia a zvýšením podielu mangánu sa zvýši špecifický výkon [4], [8], [10].

1.2.6 LTO

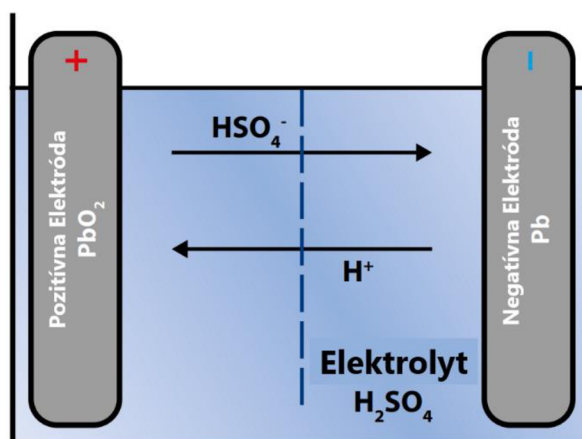
Lítium-titánium-oxid batérie $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ majú výhodu oproti ostatným technológiám lítiových batérií v bezpečnosti, výkone, práci pri nízkych teplotách a tepelnej stabilite počas nabíjania a vybíjania. Ďalšou výhodou tejto technológie je životnosť, ktorá dosahuje hodnotu 20 000 cyklov. V dôsledku vyššieho referenčného potenciálu titánu v porovnaní s grafitom majú LTO články nižšie napätie a to približne 2,5 V, čo sa prejavuje aj znížením hustoty energie [4], [8].

Tabuľka 1: Súhrn parametrov lítium-iónových technológií [8], [10], [12]

Technológia	Nominálne napätie článku (V)	Špecifická energia (Wh/kg)	Životnosť cyklov batérie (-)	C-rate nabíjanie/vybíjanie (-)
LCO	3,7	150–200	500–1 000	0,7-1C/1C
LMO	3,8	100–150	1 000–1 500	0,7-1C/1C
LFP	3,3	90–140	2 000	1C/1C
NCA	3,6	200–250	1 000–1 500	0,7C/1C
NMC	3,6	150–200	1 000–2 000	0,7C/1C
LTO	2,5	50–80	20 000	1C/10C

1.3 Olovené batérie

Tento typ batérií, fungujúci na základnej elektrochémii, poskytuje nižšiu špecifickú energiu a to v rozsahu 30–40 Wh/kg. Napriek tomu majú olovené batérie dlhú životnosť a nízke náklady v porovnaní s inými typmi. Nominálne napätie článku je približne 2 V. Energetická účinnosť batérií sa pohybuje okolo 70 %. Materiálom negatívnej elektródy je olovo a materiálom pozitívnej elektródy je vysoko porézny oxid olovnatý. Elektródy sú oddelené elektricky izolujúcou, ale chemicky priepustnou membránou. Táto membrána je najčastejšie vyrobená z polyetylénu, polypropylénu a polyvinylchloridu. Elektrolytom je zriedená vodná kyselina sírová, ktorá sa zúčastňuje pri procese vybíjania [13].



Obrázok 3: Princíp činnosti olovenej batérie [4]

Kapacita batérie sa v dôsledku sulfatácie batérie a uvoľňovaním aktívneho materiálu znižuje. Najčastejšie je degradácia batérie spôsobená režimom vybíjania/nabíjania, dlhodobému vystaveniu nízkemu náboju a hĺbkou vybíjania. Počas procesu vybíjania sa na záporných elektródach vytvárajú ióny H⁺ a síran olovnatý. Druhá elektróda tiež produkuje síran olovnatý a vodu, keď elektrolyt reaguje s PbO₂ pozitívnej elektródy. Ak

nabíjanie batérie pokračuje aj po dosiahnutí plnej kapacity, začne elektrolyza vody. Preto je potrebné dopĺňanie vody do batérového článku. Olovené batérie sa primárne delia na zaplavené a ventilom regulované/utesnené [13], [14].

1.3.1 Zaplavené olovené batérie

Zaplavené batérie používajú ako elektrolyt tekutú kyselinu sírovú. Každý článok má kladnú elektródu vyrobenú z oxidu olovnateho a zápornú elektródu vyrobenú z olova. Na izoláciu elektród je použitý separátor [4].

Tabuľka 2: Prehľad výhod a nevýhod zaplavených olovených batérií [4]

Výhody	Nevýhody
Nižšie náklady oproti iným batériám	Malý počet cyklov (do 2 500)
Vysoká spoľahlivosť	Malá hustota energie 50–100 Wh/kg
Bohaté skúsenosti s výrobou a prevádzkou	Znížený výkon pri nízkych alebo vysokých okolitých teplotách (potrebný systém riadenia teploty)
Možná implementácia do veľkých rozmerov	Potreba pravidelnej výmeny vody
Dobry tepelný výkon	Sulfatácia pri dlhodobo prázdnom stave
Jednoduchá indikácia stavu nabitia	Asymetrické možnosti nabíjania a vybíjania

1.3.2 Ventilom regulované olovené batérie

Ventilom regulovaná batéria, tiež známa aj ako utesnená batéria, je pokrokovejším typom tradičných zaplavených batérií. Ventil je navrhnutý tak, aby zabránil strate elektrolytu a reaguje na maximálny pretlak, pričom odvzdušňuje len vtedy, ak tlak presiahne 100 milibarov. Ventilom riadená olovená batéria je zvyčajne drahšia ako zaplavená batéria, ale jej výhodou je, že vďaka samoregulácii dokáže vydržať dlhú dobu bez údržby [4].

Tabuľka 3: Prehľad výhod a nevýhod ventilom regulovaných olovených batérií [4]

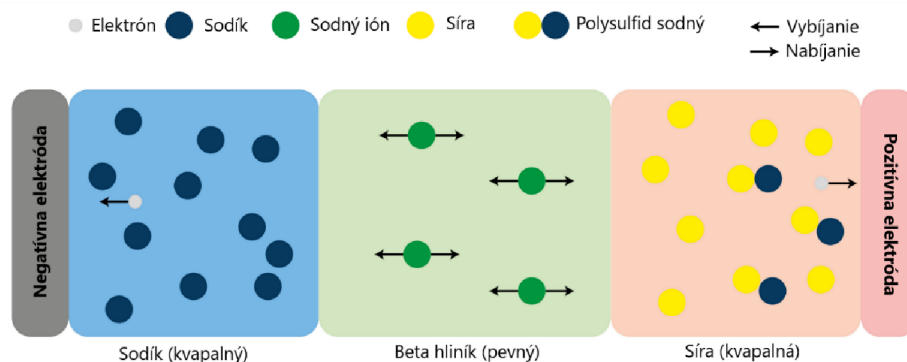
Výhody	Nevýhody
Nenáročná na údržbu	Nemala by byť skladovaná vo vybitom stave
Možná prevádzka v priestoroch bez špeciálneho vetrania	Vyššia cena oproti zaplaveným batériám
Bohaté skúsenosti s výrobou a prevádzkou	Kratšia životnosť oproti zaplaveným batériám
Dobrá recyklácia a miera zhodnotenia materiálov	Citlivé na nedostatočné a nadmerné nabíjanie

1.4 Vysokoteplotné batérie

Vysokoteplotné batérie využívajú tekuté aktívne materiály a pevný keramický elektrolyt vyrobený z beta-hliníka, ktorý zároveň slúži aj ako separátor medzi elektródami batérie. Na udržanie aktívnych materiálov v tekutom stave sú potrebné vysoké teploty. Najčastejšie sa ako anódový materiál používa roztavený sodík. Pri nabíjaní a vybijaní dochádza k prechodu iónov sodíka cez membránu [4].

1.4.1 Sodíkovo-sírové batérie

Výhodou sodíkovo-sírových batérií je ich vyššia hustota energie 140–300 Wh/kg v porovnaní s prietokovými batériami. Patria medzi kompaktné akumulácie a sú vhodné na pravidelné cyklovanie. Pracovná teplota sodíkovo-sírových batérií je v rozmedzí 300 – 350 °C a miera samovybijania je 0,05–1 % za deň. NaS batérie dosahujú vysokú životnosť a to aj viac ako 5 000 cyklov. Ďalšou výhodou je, že využívajú netoxické materiály a majú vysokú mieru recyklácie materiálu. Nevýhodami týchto batérií sú vysoké prevádzkové náklady, potreba tepelného krytu a elektrického ohrevu, čo môže spotrebovať až 3 % výkonu. Elektrický ohrev slúži na zahriatie článkov na pracovnú teplotu, alebo slúži na vyrovnávanie strát pri nečinnosti systému [4].



Obrázok 4: Princíp činnosti sodíkovo-sírovej batérie [4]

1.4.2 Chlorid-nikel-sodík batérie

Tento typ batérií sa vyznačuje dobrou hustotou energie a nenáročnou údržbou. Ako primárny elektrolyt sa používa pevný beta-hliníkový keramický elektrolyt a ako sekundárny elektrolyt sa používa NaAlCl₄. Teplota topenia sekundárneho elektrolytu je 157 °C, vďaka čomu sú tieto články bezpečnejšie vzhľadom na znížené riziko požiaru a sú aj menej korozívne oproti NaS článkom. Miera samovybijania sa pohybuje na 5 % za deň a ich účinnosť je približne 84 % [4].

1.5 Niklové batérie

1.5.1 Nikel-kadmiové batérie

Technológia nikel-kadmiových batérií Ni-Cd je založená na elektrochemických reakciách nabíjania/vybíjania, ktoré sa vyskytujú medzi kladnou elektródou (katódou), ktorá obsahuje nikel oxid-hydroxid ako aktívny materiál a zápornou elektródu (anódou), ktorá sa skladá z kovového kadmia. Elektródy sú oddelené priepustnou membránou, ktorá umožňuje tok elektrónov a iónov. Elektrolyt je vyrobený z vodného hydroxidu draselného. Hustota energie nikel kadmiových batérií sa pohybuje v rozmedzí 30-70 Wh/kg a účinnosť cyklov je približne 70 %. Tento druh batérií sa najčastejšie používa v letectve a železničnej doprave [15].

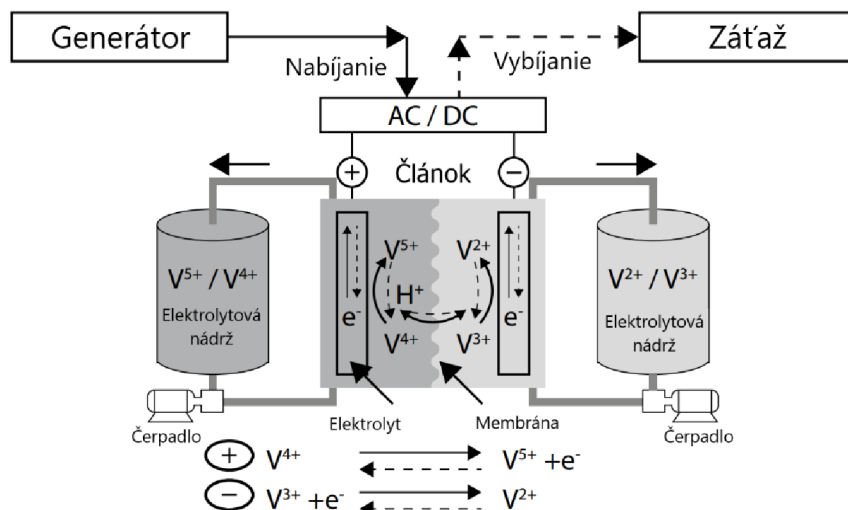
1.5.2 Nikel-metal hydrid batérie

Nikel-metal hydrid batérie NiMH sú založené na elektrochemických reakciách nabíjania a vybíjania, ktoré sa vyskytujú medzi katódou obsahujúcou oxid niklu ako aktívny materiál a anódou, ktorá je zložená zo zliatiny absorbujúcej vodík. Elektródy sú oddelené priepustnou membránou vyrobenou z hydroxidu draselného. Táto technológia disponuje hustotou energie 75-80 Wh/kg a účinnosťou približne 70 %. NiMH batérie postupne nahradili Ni-Cd batérie a najčastejšie sa táto technológia používala v doprave pri hybridných vozidlách [16].

1.6 Prietokové batérie

Prietokové batérie sa líšia od iných typov batérií tým, že elektro-aktívne materiály nie sú uložené v elektróde, ale sú rozpustené v roztokoch elektrolytov. Prietokové batérie je možné opísať aj ako regeneračné palivové články, ktoré existujú v rôznych formách a prevedeniach. Elektrolyty v kvapalnom, alebo plynnom stave sú uložené v nádržiach, na anódovej strane v anolytovej nádrži a na katódovej strane v katolytovej nádrži. Tieto nádrže sú oddelené od regeneračného zásobníka. Elektrolyty sú čerpané z nádrží do článkov, kde dochádza k reverzibilným elektrochemickým reakciám počas procesu nabíjania a vybíjania [4], [17].

Najbežnejšími typmi sú vanádium-redoxná prietoková batéria a zinkovo-brómová hybridná prietoková batéria. Zinkovo-brómová batéria je hybridná z dôvodu, že má jeden alebo viacero aktívnych materiálov uložených v článku. Prietokové batérie majú rôzne výhody, ako je napríklad vysoký počet cyklov a dokážu pracovať s hlbokým vybitím bez vplyvu na celkovú životnosť batérie. Nevýhodou je ich nižšia účinnosť oproti lítium-iónovým batériám [4], [17].



Obrázok 5: Schematický diagram prietokovej batérie [4]

1.6.1 Vanádium-redoxné prietokové batérie

Vanádium-redoxné prietokové batérie obsahujú redoxné páry V^{2+}/V^{3+} a V^{5+}/V^{4+} v jemnom roztoku kyseliny sírovej v nádržiach s elektrolytom. Elektrolyty sú oddelené iónovo selektívnou membránou od iónov. Elektrická neutralita článku je zaistená prechodom vodíkových iónov H^+ cez membránu. Rozsah pracovnej teploty týchto batérií sa pohybuje od $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hustota energie je približne 25 Wh/kg [4], [17].

Tabuľka 4: Prehľad výhod a nevýhod vanádium-redoxných prietokových batérií [4]

Výhody	Nevýhody
Dlhá životnosť	Nízka hustota energie
Pomerne vysoká účinnosť (85 %)	Zrážanie V_2O_5 pri teplotách nad $40\text{ }^{\circ}\text{C}$
Dlhé nepretržité vybíjanie	Vysoké náklady
Rýchla odozva	Potrebná optimalizácia elektrolytu kvôli zníženiu energetickej účinnosti

1.6.2 Zinkovo-brómové prietokové batérie

Elektródy zinkovo-brómových batérií sú vyrobené z uhlíkovo plastového zloženia, pretože kovové elektródy by korodovali v prostredí bohatom na bróm. Elektródy oddeľuje mikroporézna membrána. Dve externé nádrže pumpujú vodný elektrolyt smerom k článkom batérie, podobne ako pri vanádium-redoxných batériách. Pri tomto type batérií zinok nie je úplne rozpustený v elektrolyte a počas procesu nabíjania sa ukladá ako pevná kovová vrstva na negatívnu elektródu, pričom ióny brómu oxidujú na bróm na kladnej katódovej strane. Počas vybíjania je proces opačný [4], [17].

Tabuľka 5: Prehľad výhod a nevýhod zinkovo-brómových prietokových batérií [4]

Výhody	Nevýhody
Vyššie napätie (1,8 V) oproti vanádiu-redoxným batériám (1,4 V)	Korózia materiálu
Vysoká hustota energie	Potrebné pomocné systémy na reguláciu cirkulácie a teploty
Možnosť hlbokého vybitia	Vysoká miera samovybíjania (8–33 % za deň) a malá energetická účinnosť

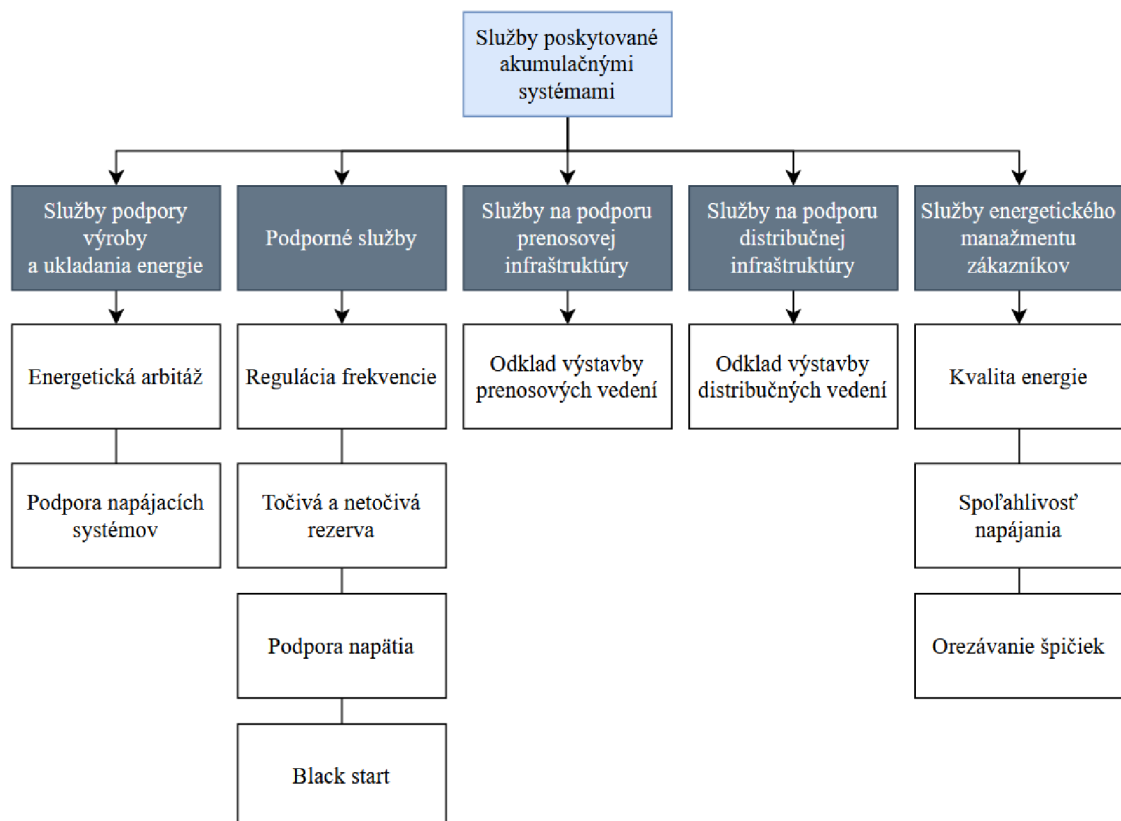
V nasledujúcej tabuľke 6 sú vypísané dôležité parametre jednotlivých batériových technológií popísaných v predchádzajúcich podkapitolách.

Tabuľka 6: Prehľad parametrov batériových technológií [1]

Druh batérie	Špecifická energia (Wh/kg)	Špecifický výkon (W/kg)	Účinnosť (%)	Doba životnosti (roky)	Miera denného samovybíjania (%)
Lítium-iónové	150–250	150–350	90–95	15–20	0,1–0,3
Olovené	30–40	100–300	70–85	5–15	0,1–0,3
Vysokoteplotné	150–300	150–230	85–90	15	0,05–1
Niklové	50–80	150–200	60–70	10–15	0,2–0,6
Prietokové	20–30	80–150	70–85	15–20	0,2

2. MOŽNOSTI APLIKÁCIÍ BATÉRIOVÝCH SYSTÉMOV V PRIEMYSLE

Táto kapitola popisuje možnosti využitia batériových systémov. Systémy akumulácie energie poskytujú podobné služby, ako konvenčné zariadenia na výrobu elektriny. Spôsoby využitia uloženej energie je možné deliť a zhromažďovať podľa rôznych kategórií, pričom sa často uvažuje dĺžka akumulácie a využitie energie v akumuláčnom systéme. Použitie batériového úložiska je podmienené tým, či dokáže zabezpečiť prínos pre daný systém. Krátkodobé ukladanie energie má krátke trvanie a aplikácie si vyžadujú veľký výkon. Pri krátkodobých skladovaniach energie, kedy sa nabíjanie a vybíjanie uvažuje v niekoľkých minútach, sa batériové úložiská neuvažujú ako primárne riešenie. Dlhodobé ukladanie energie si vyžaduje akumuláciu energie na dlhšie časové obdobie. Batériové systémy sa najčastejšie využívajú na ukladanie energie počas dlhšieho časového obdobia. Od týchto zásobníkov sa očakáva, aby boli schopné udržať veľké množstvo energie, pri čo najmenšej miere samovybíjania. Nasledujúce podkapitoly opisujú práve dlhodobé uloženie energie, s každodenným využitím [4].



Obrázok 6: Rozsah služieb, ktoré môžu poskytovať akumuláčny systémy

2.1 Energetická arbitráž

Energetická arbitráž spočíva v nákupe elektrickej energie, teda v nabíjaní akumuláčného systému v čase, keď sú ceny nízke. Následne je možné elektrickú energiu použiť alebo predať, keď je cena vysoká. Alternatívne môže úložisko akumulovať energiu v čase prebytočnej výroby, ktorá by inak bola obmedzená. Tento typ aplikácie si vyžaduje dostatočne veľkú kapacitu batérie, aby bola schopná dodávať výkon niekoľko hodín denne a zároveň aby mala veľký počet cyklov, kde sa predpokladá využitie približne 200–300 krát v roku [18], [19].

2.2 Podpora napájacích systémov

Tento druh aplikácie môže pozostávať z rôznych podkategórií a služieb, ktoré spolu tvoria podporu napájacieho systému ako celku, alebo premenlivých zdrojov elektrickej energie. Jedným z nich je využitie akumuláčného systému na dosiahnutie konštantného výstupu z obnoviteľných zdrojov počas daného časového obdobia. Akumulácia energie prebieha v čase nadmernej výroby elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov. Následne sa energia využíva na doplnenie výroby, keď premenlivá energia neočakávane zníži svoj výkon. Od akumuláčného systému sa vyžaduje, aby reagoval rýchlo na náhodne sa meniaci profil zaťaženia [18], [19].

Ďalšou službou je podpora konvenčnej výroby s jej optimalizáciou. Akumulačné systémy preberú záťaž generátora počas jeho spomalenia, kým sa generátor znova rozbehne alebo nabehne nový generátor. Tým sa zabráni zastaveniu jednotky, s čím sú spojené náklady na opätovné spustenie. Pri nábehu generátora sú akumuláčné systémy schopné zachytiť silné a rýchle zmeny záťaže, čo umožňuje generátoru zvýšiť alebo znížiť výrobu [18], [19].

2.3 Regulácia frekvencie

Regulácia frekvencie je okamžitá a automatická odozva výkonu na zmenu lokálnej snímanej systémovej frekvencie, buď zo systému alebo z prvku systému a je dôležitá pre udržanie stability siete. Cieľom primárnej regulácie frekvencie (FCR) je zastaviť pokles frekvencie a jej stabilizácia v rámci synchrónnej oblasti, bez obnovenia systémovej frekvencie na referenčné hodnoty. Doba aktivácie je do 30 sekúnd [20], [21].

Ďalej nastáva proces obnovenia frekvencie a výkonovej rovnováhy (FRR). Automatické obnovenie frekvencie upravuje generovanie činného výkonu vo výrobných jednotkách tak, aby došlo k obnoveniu frekvencie na referenčné hodnoty. Na tejto kontrole sa podieľajú jednotky, ktoré sa nachádzajú v oblasti, kde došlo k nerovnováhe siete [20].

Manuálne obnovenie frekvencie slúži na obnovenie rezerv primárnej a sekundárnej regulácie frekvencie na dosiahnutie cieľových hodnôt, ak sekundárna regulácia

frekvencie nie je schopná vykonať túto úlohu. Proces sekundárnej a terciárnej regulácie nastáva od 30 sekúnd po 15 minút [20].

Proces náhrady záloh (RR) s dobou aktivácie od 15 minút po dobu niekoľkých hodín sú rezervy činného výkonu, ktoré sú dostupné na obnovenie alebo podporu požadovanej úrovne FRR. Tieto rezervy majú byť pripravené na dodatočné odchýlky sústavy, vrátane výrobných rezerv [20].

2.4 Točivá a netočivá rezerva

Točivá rezerva je výrobná kapacita, ktorá je schopná okamžite odpovedať na neočakávanú udalosť, ako je výpadok výroby. Elektrárne, v ktorých sa nachádzajú rotujúce generátory alebo turbíny majú zotrvačnosť. Ak zariadenie nie je úplne využitú, avšak je v prevádzke, môže slúžiť ako výkonová rezerva. Netočivá rezerva je výrobná kapacita, ktorá môže reagovať na neočakávané udalosti straty výroby v krátkom čase, zvyčajne do 10 minút, ale nie okamžite. Aj keď batérie nie sú točivé zariadenia, dokážu dodať energiu rýchlo, a tak môžu fungovať ako točivé rezervy. Keďže ide o symetrickú službu, úložisko by malo byť pripravené na dodanie a príjem energie. Preto je potrebné, aby boli tieto úložiská prevádzkované v stave čiastočného nabitia [21], [22].

2.5 Podpora napätia

Podstatou tejto služby je dodávanie, alebo odber jalového výkonu pomocou synchronnej, alebo statickej kompenzácie. S rastúcou integráciou nesynchronných zdrojov energie táto služba naberá na význame. Regulácia napätia pomocou akumuláčnych systémov môže stabilizovať výkyvy napätia v distribučných sieťach nízkeho napätia s vysokým pomerom obnoviteľných zdrojov. Primárna regulácia napätia je lokálne riadenie, ktoré udržiava napätie na stanovenej hodnote. Sekundárna regulácia napätia je centralizované automatické riadenie, ktoré koordinuje činnosť miestnych regulátorov, s cieľom riadiť dodávku jalového výkonu v rámci lokálnej napäťovej zóny. Terciárna regulácia je manuálne riadenie tokov jalového výkonu cez energetický systém. Od tejto služby sa očakáva rýchla doba odozvy a to do 5 sekúnd [21], [22].

2.6 Black start

Cieľom akumuláčného systému je prispieť procesu obnovy prevádzky elektrárne bez spoliehania sa na externú energetickú sieť. Pre tento proces je potrebné, aby akumuláčny systém mali vysoký stav nabitia, aj keď úložisko nie je väčšinu času v prevádzke. Táto služba zároveň naberá na význame s postupným vyradovaním rotujúcich hmôt v systéme a integráciou obnoviteľných zdrojov. Predpokladané časové rozmedzie vybíjania je široké a to od niekoľkých sekúnd po hodiny. Z tohto dôvodu je potrebná aj veľká kapacita batérového úložiska [21], [22].

2.7 Služby pre prenosovú a distribučnú infraštruktúru

Jednou z možností je využitie úložisk energie na ukladanie energie namiesto budovania nových prenosových a distribučných vedení v konkrétnych lokalitách, čím sa zníži ich preťaženie. Vysoké zaťaženia, pre ktoré by bolo potrebné postaviť nové vedenia sa vyskytujú len zriedkavo a po krátku dobu. Relatívne malým úložiskom je možné dosiahnuť potrebnú kapacitu, ktorá odloží potrebu výstavby nového vedenia. Výstavbou batériového úložiska v lokalite, kde dochádza k zvýšeným odberom sa predlžuje životnosť vedení, v dôsledku zníženia ich zaťaženia. Dodávaním elektrickej energie z akumuláčného zariadenia po dobu zvýšeného dopytu, je možné udržať zaťaženie prenosového alebo distribučného vedenia pod maximálnym zaťažením [21], [22].

2.8 Kvalita energie

Táto služba je zameraná na udržanie kvality dodávanej energie. Úložisko energie sa používa na ochranu zákazníkov v mieste odberu pred krátkodobými udalosťami. Nízka kvalita energie sa môže prejavovať zmenou veľkosti napätia, zmenou frekvencie, nízkym účinníkom, alebo prerušením napájania. Na rozdiel od služieb, ktoré sú spomenuté v predchádzajúcich podkapitolách, má služba kvalita energie jednotlivé požiadavky zahrnuté v jednej službe. Úložisko zabezpečuje kvalitu energie na strane zákazníka, nie na strane distribútora. Trvanie vybíjania akumuláčného systému určeného na zlepšenie kvality energie sa zvyčajne pohybuje v niekoľkých sekundách až minútach [21], [22].

2.9 Spol'ahlivosť napájania

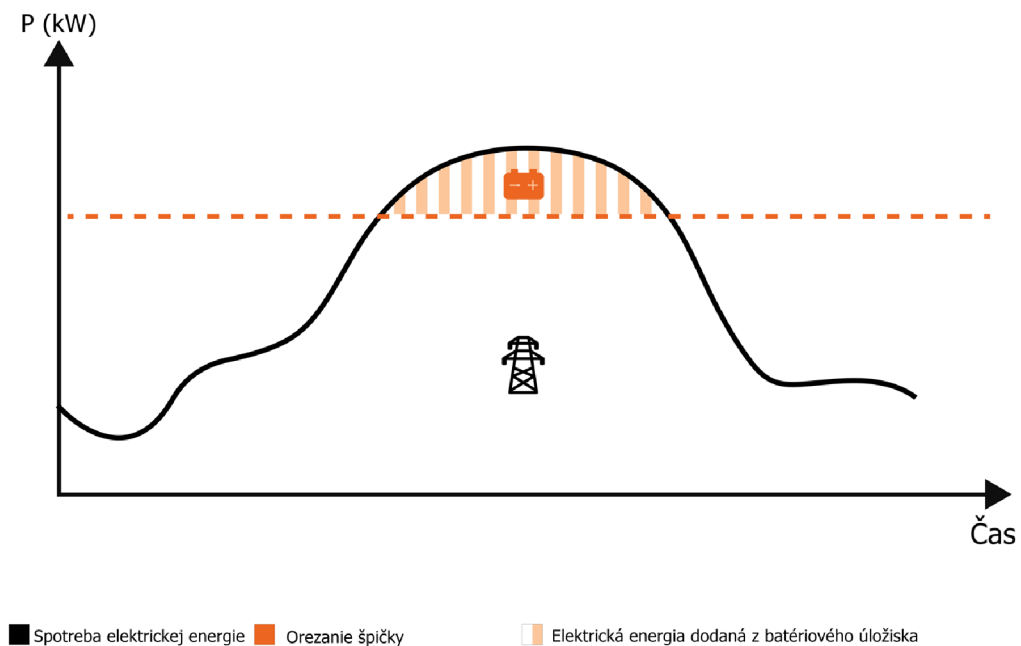
Touto službou sa rozumie použitie batériového systému, ako náhrady napájania objektu pri výpadku siete. Táto služba vyžaduje, aby úložný systém a záťaže boli počas výpadku siete izolované a aby sa po obnovení napájania znova zosynchronizovali so sieťou. Pre túto službu je potrebná veľká kapacita batériového úložiska, ktorá je závislá na veľkosti zálohovanej záťaže a ktorú bude možné dodávať aj niekoľko hodín. Pre napájanie objektu v čase výpadku energetickej siete je potrebné, aby úložisko malo dostatočne vysoký stav nabitia. Najčastejšie sa uvažuje, že akumuláčny systém je vo vlastníctve a pod kontrolou zákazníka [21], [22].

2.10 Orezávanie špičiek

V priemysle sa často používajú stroje a zariadenia, ktoré vyžadujú veľké množstvo energie v krátkom časovom intervale počas dňa. V dôsledku toho sa prenosová a distribučná sústava musí dimenzovať na tieto krátke časové obdobia a po zvyšok dňa nie je plne využívaná. Priemyselný odoberatelia elektrickej energie sú účtovaní za spotrebovanú energiu a rezervovanú kapacitu objektu. Rezervovaná kapacita predstavuje najvyššiu spotrebu energie, zvyčajne spriemerovanú za 15 minút. Položka za rezervovanú

kapacitu tvorí značnú časť z celkovej ceny. Orezávanie špičiek je stratégia používaná na riadenie a znižovanie úrovni spotreby elektrickej energie zo siete, hlavne keď sú náklady na energiu najvyššie [23].

Akumulačné systémy je možné vybíjať na krátke časové úseky počas špičiek. Nabíjanie batériového úložiska je možné počas obdobia so zníženou spotrebou priamo zo siete alebo pomocou obnoviteľných zdrojov energie. Výhodou je aj zvýšená stabilita siete, kedy je elektrická sieť menej zaťažovaná a potrebný výkon sa dodáva z batériového systému. Odberatelia platia sieťovú tarifu na základe ich špičkového zaťaženia. Nasadením batériového úložiska môžu používatelia znížiť špičkový dopyt, a tým znížiť poplatky za odber a celkové náklady za elektrickú energiu. Toto zníženie sa prejaví zmenou rezervovanej kapacity objektu. Pomáha to nielen riadiť prevádzkové náklady, ale prispieva aj k efektívnejšiemu využívaniu energetických zdrojov a znižuje zaťaženie siete. Orezávanie špičiek sa praktizuje už mnoho rokov pomocou dieselových generátorov. Momentálne je však možnosť využitia batériových úložisk, ktoré dokážu vybíjať počas krátkych časových úsekov a nabíjať v čase nízkeho zaťaženia, čím sa znižuje poplatok za špičkové zaťaženie [21], [22], [23].



Obrázok 7: Orezávanie špičiek využitím batériového úložiska [24]

Tabuľka 7: Súhrn služieb akumuláčnych systémov a ich charakteristiky [18], [22].

Služba	Typická kapacita (MWh)	Výkon (MW)	Čas vybíjania	Frekvencia využitia (počet cyklov/rok)
Energetická arbitráž	1–50	1–500	> 5 hodín	200–300
Podpora napájacieho systému	1–10	1–500	2–6 hodín	5–100
Regulácia frekvencie	1–10	10–40	Sekundy až hodiny	> 250
Točivá a netočivá rezerva	7,5	10–100	Minúty až hodiny	20–50
Podpora napätia	100	10–100	Minúty až hodiny	12
Black start	0,1–3	5–50	Sekundy až hodiny	10–20
Služby pre prenosovú a distribučnú infraštruktúru	100	1–100	1–8 hodín	50–100
Kvalita energie	0,005–0,02	0,1–10	< 1 minúta	10–200
Spoľahlivosť napájania	1–4	0,05–20	Minúty až hodiny	< 50
Orezávanie špičiek	0,01–1	0,001–1	Minúty až hodiny	> 300

3. ALGORITMIZÁCIA A VÝVOJ APLIKÁCIE PRE SIMULOVANIE BATÉRIOVÉHO ÚLOŽISKA

Cieľom diplomovej práce je vytvorenie aplikácie, ktorá simuluje využitie batériového úložiska na orezávanie špičkovej spotreby v priemyselnom objekte, s možnosťou integrovania fotovoltaikej elektrárne. Aplikácia slúži na voľbu optimálnej veľkosti batériového úložiska, na základe zadaných parametrov. Táto aplikácia bola vytvorená v prostredí MATLAB App Designer a verzii MATLAB 2022b. MATLAB App Designer je interaktívne vývojové prostredie na navrhovanie rozloženia aplikácie a jej správania. Pre vývoj aplikácie boli využité toolboxy. Toolboxy sú využívané pre zjednodušenie tvorby aplikácie, pretože poskytujú už vstavané funkcie, ktoré boli potrebné pre správny chod simulácie.

Prostredníctvom aplikácie má používateľ možnosť simulovať, či zvolené batériové úložisko bude postačovať pre dodávku elektrickej energie, na základe zadaných vstupných parametrov pre daný priemyselný objekt.

Vzhľadom k voľbe spôsobov využitia prichádza do úvahy z dostupných elektrochemických technológií využitie lítium-iónových, alebo olovených batérií. Najčastejšie sa však pre dané aplikácie v priemyselných objektoch využívajú lítium-iónové úložiská s technológiami LFP a NMC.

Navrhnutá aplikácia sa zameriava najmä na orezávanie špičiek a zníženie rezervovanej kapacity objektu. Batériové úložisko sa využíva na orezávanie špičiek v období vysokého dopytu, čím sa môžu znížiť poplatky za rezervovanú kapacitu objektu. Pomocou batériového úložiska je možné vyrovnanie záťaže a zníženie kolísania spotreby počas dňa.

Ďalšou službou je podpora napájacích systémov, kedy bude batériové úložisko využívané na vyrovňovanie výkyvov výroby z fotovoltaičných panelov. V prípade výroby elektrickej energie bude úložisko akumulovať prebytočnú energiu počas obdobia so zvýšenou výrobou a následne ju využívať počas obdobia so zníženou výrobou. Elektrická energia vyrobená z fotovoltaikej elektrárne sa priamo podieľa na znížení energie systému.

Treťou službou je spoľahlivosť napájania, teda využitie batériového úložiska na dodávanie energie v čase výpadkov alebo prerušovanej dodávky energie. Táto služba nie je hlavným zameraním simulácie, ale používateľ si môže pomocou stavu nabitia batérie sledovať hĺbku vybitia batériového úložiska. Zvolením dostatočnej veľkosti kapacity batériového úložiska a sledovaním jeho stavu nabitia je možné zabezpečiť rezervu v čase výpadkov dodávky energie.

Tieto služby sú vhodné pre využitie v priemyselnom objekte s fotovoltaičkou elektrárnou, ale aj bez nej. Jedným z kritérií pre výber týchto služieb je aj možnosť ich vzájomnej kombinácie. Energia, ktorú bolo možné uložiť z fotovoltaikej elektrárne,

môže byť následne využitá na pokrytie spotreby v čase orezávania špičiek, alebo ako rezerva pre spoľahlivosť napájania v čase výpadku dodávky elektrickej energie. V prípade, že nie je nainštalovaná fotovoltaická elektrárňa, je možné zvoliť kapacitu batériového úložiska tak, aby bola pokrytá dodávka energie v čase špičiek a aby bola zároveň dostatočne veľká rezerva energie v čase výpadku. Tieto jednotlivé služby sa líšia v závislosti od sledovaného objektu a od požiadaviek užívateľa. Na obrázku 8 sú zobrazené jednotlivé procesy programu.



Obrázok 8: Členenie programu

V nasledujúcich podkapitolách je popísaný vývoj aplikácie, vstupné údaje, kľúčové algoritmy a grafické užívateľské rozhranie. Tieto kapitoly poskytnú komplexný pohľad na vývoj aplikácie a detailné informácie o tom, ako bola navrhnutá s cieľom verne simulovať využitie batériového úložiska v priemyselnom prostredí.

3.1 Vstupné dáta pre simuláciu

Vstupné dáta pre simuláciu sú dôležité pre správne vykonanie analýzy využitia batériového úložiska v priemyselnom objekte. Tieto údaje zahŕňajú informácie o spotrebe elektrickej energie, novej výrobe z fotovoltaickej elektrárne, parametroch batériového úložiska, rezervovanej kapacity a ekonomických vstupoch. V nasledujúcich častiach sú popísané vstupy potrebné pre simuláciu, ako aj ich špecifikácia a formátovanie. Pri vývoji aplikácie boli implementované zachytenia chýb, ktoré majú zabrániť programu vykonávať úlohy s nesprávne zadefinovanými vstupnými údajmi.

Editačné polia, ktoré slúžia na zadávanie parametrov sú ošetrené tak, aby bolo možné zadať len numerické hodnoty. Niektoré z editačných polí sú taktiež ošetrené množinou čísel, tým pádom je možné zadať len hodnotu, ktorá je v danom rozmedzí. V prípade zadania hodnoty v zlom formáte sa objaví pri konkrétnom editačnom poli informácia s upozornením na správne zadanie hodnoty.

Hlásenia aplikácie dávajú prehľad o stave simulácie, ako aj o prípadných chybných vstupných dátach a sú zobrazené pomocou dialógových okien. Tieto hlásenia sa môžu objaviť až po inicializácii simulácie, stlačením tlačidla „Run“.

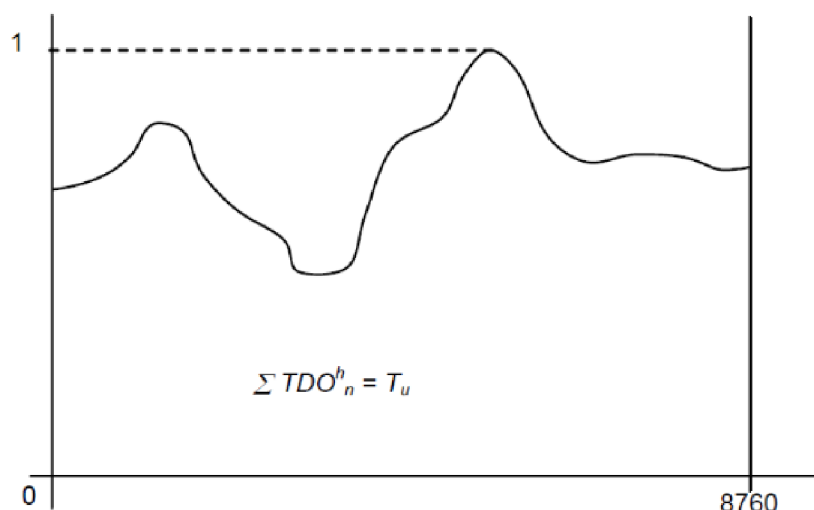
3.1.1 Vstupné dáta o spotrebe elektrickej energie

Ako vstupné dáta o spotrebe je možné využívať hodnoty z typových diagramov dodávok, alebo namerané dáta pre konkrétny objekt. V prípade, že sa jedná o objekt, pre ktorý nie sú k dispozícii dáta o spotrebe, je možné využiť typové diagramy dodávky (TDD). Typové diagramy dodávok nahrádzajú postup pre stanovenie 15 minútového

alebo hodinového odberu skupiny odberateľov elektrickej energie, bez priebehového merania. Typové diagramy dodávok pre jednotlivé kategórie odberu zverejňuje na svojich webových stránkach operátor trhu. TDD rozdeľujeme na normalizované a prepočítané. Normalizovaný typový diagram dodávky je postupnosť 8 760 relatívnych hodnôt (8784 hodnôt pre prestupný rok), priemerných hodinových dodávok v roku, vzhľadom k hodnote ročného maxima určeného z merania vzoriek. Tieto hodnoty sa pohybujú v rozmedzí 0–1 a definujú tvar diagramu zaťaženia pre danú skupinu odberateľov [25].

Typové diagramy dodávky sú rozdelené do nasledujúcich kategórií:

- TDD1 – priemyselný odber bez elektrického vykurovania
- TDD2 – priemyselný odber s akumulárnym ohrevom a kúrením
- TDD3 – priemyselný odber s priamovýhrevným vykurovaním
- TDD4 – domácnosti bez elektrického vykurovania
- TDD5 – domácnosti s akumulárnym ohrevom a kúrením
- TDD6 – domácnosti s priamovýhrevným vykurovaním
- TDD8 – priemyselný odber – verejné osvetlenie



Obrázok 9: Normalizovaný typový diagram dodávky [25]

V rámci aplikácie sú využité normalizované TDD pre aktuálny rok 2024 a na výber sú kategórie TDD1, TDD2, TDD3 a TDD8. Normalizované TDD boli prevzaté zo stránky operátora trhu OTE pre Českú republiku a poskytujú predpokladaný profil spotreby elektrickej energie. Používateľ zadá hodnotu ročného maxima, ktorou sa následne prenasobia hodnoty z vybraného TDD. Ako veľkosť ročného maxima je potrebné zadať kladné reálne číslo v kW.

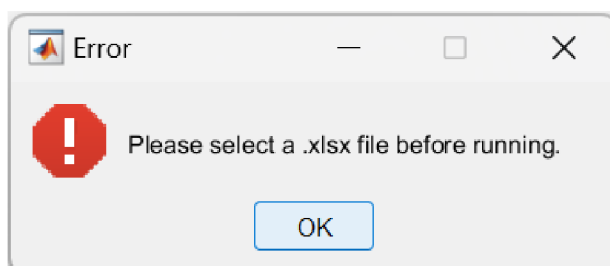
Druhou možnosťou definovania dát spotreby elektrickej energie je využitie skutočných nameraných hodnôt pre konkrétny objekt, ktoré do aplikácie nahrá používateľ. Používateľ namerané dáta vloží do priloženého súboru typu .xlsx.

K programu sú priložené 4 súbory formátu .xlsx, každý pre rôznu hustotu nameraných dát:

- ConsumptionData15min – pre 15 minútové dáta spotreby,
- ConsumptionData15min_LY – pre 15 minútové dáta spotreby počas prechodného roku,
- ConsumptionData1hour – pre hodinové dáta spotreby,
- ConsumptionData1hour_LY – pre hodinové dáta spotreby počas prechodného roku.

V každom zo súborov sa nachádzajú 2 hárky. Prvý hárok s názvom „Main“ je uzamknutý a slúži ako zdroj dát pre simuláciu. Hárok „Main“ kopíruje údaje z hárku „User inputs“, do ktorého používateľ zadáva dáta o spotrebe objektu. Do bunky A2 zadáva používateľ rok, pre ktorý sa má simulácia uskutočniť. Následne do stĺpca B zadá 15 minútové alebo hodinové dáta o spotrebe. Tieto dáta musia byť zadávané ako reálne čísla v kW a formátované s bodkou, ako oddeľovačom desatinného miesta.

Ak používateľ zvolí ako zdroj dát vlastné namerané hodnoty, je aplikácia navrhnutá tak, aby overila, či používateľ poskytol dátový súbor v podobe excelovského dokumentu. Toto overenie je dôležité, pretože nasledujúce úlohy závisia od dostupnosti údajov poskytnutých používateľom. Časť kódu, určená na kontrolu cesty k súboru s nameranými údajmi zabezpečuje jeho nahratie a bráni ďalším výpočtom aplikácie bez nahratia súboru.



Obrázok 10: Chybové hlásenie v prípade, že nie je nahratý súbor s nameranými dátami

3.1.2 Vstupné dáta o výrobe elektrickej energie z fotovoltaickej elektrárne

Ďalším vstupným údajom je výroba elektrickej energie z fotovoltaickej elektrárne. Používateľ má možnosť výberu, či daný objekt disponuje takouto výrobou elektrickej energie alebo nie. Túto voľbu môže uskutočniť pomocou prepínača na paneli s názvom „Photovoltaics inputs“. Údaje o spotrebe pre konkrétnu lokalitu sú zo stránky PVGIS. PVGIS je fotovoltaický geografický informačný systém, ktorý je vyvinutý Spoločným výskumným centrom Európskej Komisie. Tento nástroj poskytuje údaje o solárnej energii pre rôzne geografické oblasti. Informácie z tejto stránky sú získavané prostredníctvom aplikačného programovacieho rozhrania [26].

Keďže PVGIS poskytuje dáta o solárnej energii v hodinových intervaloch, je potrebná simulácia dát pre 15 minútové intervaly. Na generovanie hodnôt výkonu fotovoltaickej energie v 15 minútových intervaloch je využitá vstavaná funkcia interp1

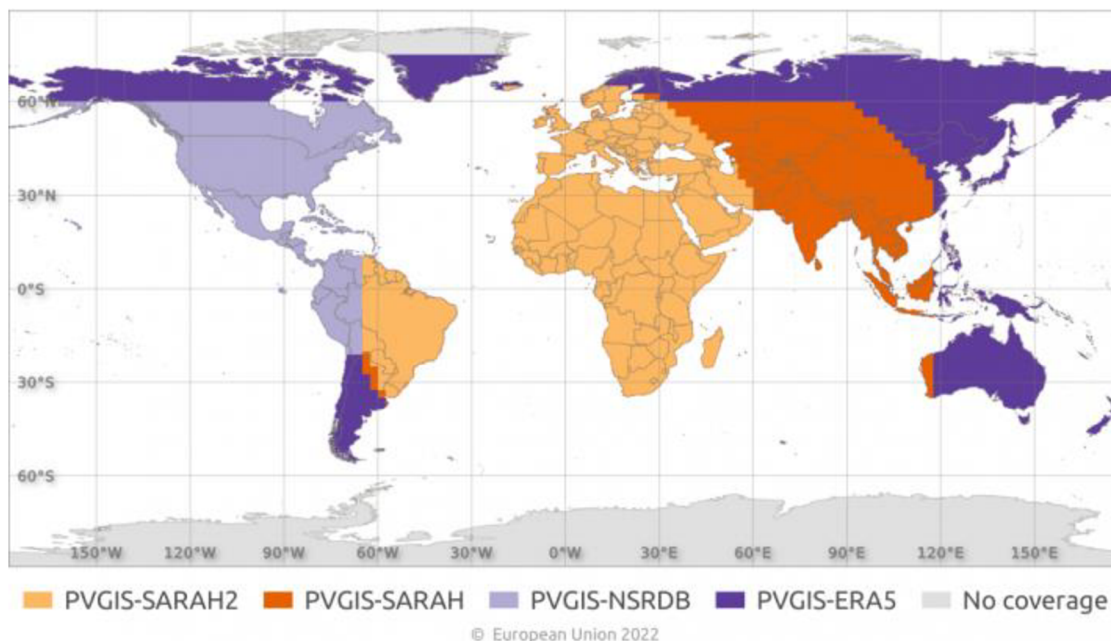
programu MATLAB. Táto funkcia je založená na lineárnej interpolácii dvoch susedných hodnôt. Ako dáta výroby sa používajú posledné aktuálne hodnoty poskytované službou PVGIS, pre konkrétnu lokalitu.

Potrebné vstupy pre žiadosť zo stránky PVGIS zadáva používateľ na karte „Inputs“ do panela s názvom „Photovoltaics inputs“. Medzi tieto vstupy patria:

- Latitude (Zemepisná šírka): Hodnota zemepisnej šírky v stupňoch, ktorá určuje geografickú polohu, kde je fotovoltaický systém umiestnený. Formát súradníc je desatinné číslo v dekadickom zápise,
- Longitude (Zemepisná dĺžka): Hodnota zemepisnej dĺžky v stupňoch, ktorá určuje geografickú polohu, kde je fotovoltaický systém umiestnený. Formát súradníc je desatinné číslo v dekadickom zápise,
- Power of PV system (Výkon fotovoltaického systému): Celkový výkon fotovoltaického systému v kWp,
- Loss of PV system (Straty fotovoltaického systému): Celkové straty fotovoltaického systému vyjadrené v percentách, ktoré zohľadňujú rôzne faktory ovplyvňujúce výkon systému,
- PV technology (Technológia fotovoltaickej elektrárne): Technológia panelov fotovoltaickej elektrárne, ktorá môže byť vybraná pomocou rolovacieho menu. Dostupné možnosti zahŕňajú:
 - Kryštalický kremík
 - Selenid kadmia a india
 - Telurid kadmia
- Slope (Uhol sklonu): Uhol sklonu solárnych panelov od horizontálnej roviny, vyjadrený v stupňoch,
- Azimuth (Azimut): Orientovaný uhol fotovoltaickej elektrárne, ktorý udáva smer, ktorým sú solárne panely natočené, vyjadrený v stupňoch.

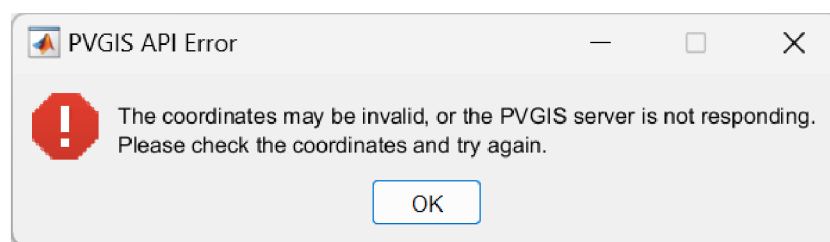
Tieto vstupy sú nevyhnutné pre získanie presných a relevantných údajov o solárnej energii pre danú lokalitu, ktoré sa následne použijú pri simulácii v aplikácii na analýzu využitia batériového úložiska a solárnej výroby energie.

Ako zdroj dát o solárnej energii sa používa databáza PVGIS-SARAH2. Pre správne fungovanie programu je potrebné, aby používateľ zadal súradnice, ktoré sa nachádzajú na území pokrytom touto databázou. Databáza PVGIS-SARAH2 zahŕňa údaje o solárnej energii pre Európu, Áziu, Afriku a Južnú Ameriku.



Obrázok 11: Solárne databázy pre jednotlivé regióny [27]

Spracovaním chýb, ktoré sa môžu vyskytnúť počas interakcie so serverom PVGIS sa zaoberá časť kódu a v prípade chyby je používateľ upozornený pomocou dialógového okna. Toto chybové hlásenie sa môže vyskytnúť v dvoch prípadoch. Prvým z nich je, že používateľ zadal nesprávne súradnice. Oblasť, pre ktorú je možné vypočítať solárnu energiu sú zobrazené na obrázku 11. Ďalšou možnosťou, kedy sa toto dialógové okno môže zobrazit' je prípad, že server PVGIS je preťažený a program nedostal odpoveď. V tomto prípade je potrebné, aby používateľ vyskúšal spustiť simuláciu znova.



Obrázok 12: Chybové hlásenie v prípade problému s komunikáciou so serverom PVGIS

3.1.3 Vstupné údaje o batériovom úložisku

Používateľ zadáva informácie o batériovom úložisku do panelu s označením „Battery inputs“ na karte „Inputs“. Do editačných polí je potrebné zadať celkovú kapacitu batériového úložiska v kWh a C-rate tohto úložiska. V aplikácii sa uvažuje, že C-rate batérie je rovnaký pre nabíjanie a vybíjanie batérie. Kapacitu a C-rate batériového úložiska je potrebné zadať ako kladné reálne čísla. Výkon nabíjania a vybíjania batérie je určený rovnicou (3.1).

$$P_{BAT} = C_0 \cdot C_{rate} \quad (3.1)$$

Následne je potrebné, aby používateľ zadal maximálny a minimálny stav nabitia batérie v percentách. Tieto hodnoty je možné vložiť do editačných polí ako kladné reálne číslo v rozmedzí 0–100.

Maximálny stav nabitia určuje hodnotu, do ktorej sa batériové úložisko bude nabíjať energiou zo siete pri oboch implementovaných stratégiách nabíjania. Pre nabíjanie prebytočnej energie z fotovoltaickej elektrárne sa odporúča nastaviť hodnotu maximálneho stavu nabitia nižšiu ako 100 %. Keďže maximálny stav nabitia zadaný používateľom určuje hodnotu, do ktorej sa má nabíjať batériové úložisko zo siete, nastavením jeho nižšej hodnoty sa vytvorí rezerva pre nabíjanie prebytočnej energie z fotovoltaickej elektrárne. Týmto je zaistené efektívne využitie prebytočnej energie a zníži sa potreba nabíjania z distribučnej siete.

Pomocou minimálneho stavu nabitia je možné regulovať hĺbku vybitia batériového úložiska. Celková dostupná kapacita pre vybijanie je daná podľa rovnice (3.2).

$$C = \frac{MaxSoC - MinSoC}{100} \cdot C_0 \quad (3.2)$$

Táto rovnica určuje celkovú kapacitu, ktorá je dostupná pre vybijanie batérie v závislosti od zvolených hodnôt maximálneho a minimálneho stavu nabitia batérie. Uvedené hodnoty umožňujú používateľovi flexibilne nastaviť hĺbku vybitia batériového úložiska podľa jeho potrieb a preferencií.

Zároveň je možné pomocou minimálneho stavu nabitia nastaviť množstvo energie, ktoré má byť dostupné pre zabezpečenie spoľahlivosti systému. Táto služba nie je hlavným zameraním simulácie batériového úložiska, ale prostredníctvom stavu nabitia je možné nastaviť potrebné množstvo energie na zabezpečenie tejto služby.

3.1.4 Vstupné údaje o orezávaní špičkového zaťaženia

Hodnoty rezervovanej kapacity zadáva používateľ do panelu s názvom „Peak shaving inputs“. V tomto paneli používateľ zadáva pôvodné hodnoty rezervovanej kapacity bez batériového úložiska a nové hodnoty rezervovanej kapacity po inštalovaní batériového úložiska. Pomocou prepínačov je možné vybrať ročnú alebo mesačnú hodnotu rezervovanej kapacity. Tento výber je možné uskutočniť pre pôvodné a aj pre nové hodnoty rezervovanej kapacity. Nové hodnoty rezervovanej kapacity určujú, kedy má dôjsť k orezaniu špičiek a následnej dodávke z batériového úložiska. Podľa týchto hodnôt je v simulácii kontrolované prekročenie rezervovanej kapacity a to, či batériové úložisko vyhovuje. Pôvodné hodnoty rezervovanej kapacity slúžia pre výpočet ekonomickej analýzy.

Rezervovanou kapacitou sa rozumie zmluvne zjednaná hodnota maximálneho štvrťhodinového elektrického výkonu v kW, ktorú smie zákazník odoberať v jednom odbornom mieste zo zariadenia prevádzkovateľa distribučnej sústavy. Rezervovaná kapacita sa rozdeľuje na ročnú a mesačnú. Rozdiel medzi ročnou a mesačnou rezervovanou kapacitou je v cene za kW a v možnosti vykonávania zmien. Mesačnú rezervovanú kapacitu je možné dohodnúť na každý kalendárny mesiac rozdielne [28].

Túto hodnotu nesmie užívateľ sústavy prekročiť. V prípade prekročenia je udelená užívateľovi pokuta. Pre vvn a vn je maximálnou rezervovanou kapacitou hodnota štvrťhodinového výkonu dohodnutá v zmluve o pripojení do distribučnej sústavy. Pre nn je maximálna rezervovaná kapacita hodnota hlavného ističa v ampéroch.

Hodnoty rezervovanej kapacity pre celý rok, alebo osobitne pre každý mesiac je potrebné zadať ako kladné reálne číslo v kW. Tieto vstupné údaje umožňujú používateľovi plánovať a optimalizovať orezávanie špičkového zaťaženia v rôznych časových obdobiach, čo prispieva k efektívnemu využitiu batériového úložiska.

3.1.5 Ekonomická analýza a jej vstupné údaje

Ekonomická analýza slúži ako kľúčový rámec rozhodovania pre realizáciu a ziskovosť investície do batériového úložiska a prípadne do fotovoltaiických panelov. Primárnym cieľom tejto ekonomickej analýzy je posúdiť investíciu inštalácie batériového úložiska pre orezávanie špičiek, s možnou integráciou fotovoltaiickej elektrárne. Ekonomickú analýzu je v programe možné vypočítať len v prípade, že je odsimulovaný celý rok. Pre výpočet ekonomickej analýzy musí používateľ zadať v paneli „Simulation interval“ ako začiatok simulácie dátum 01/01-00:00, a ako koniec simulácie dátum 31/12-23:45.

Vstupné údaje pre ekonomickú analýzu zadáva používateľ do panelu „Economics inputs“. Do editačných polí zadáva počiatočnú investíciu do batériového úložiska a prípadnej fotovoltaiickej elektrárne v €. Počiatočná investícia má zahŕňať všetky výdaje týkajúce sa nákupu a inštalácie jednotlivých komponentov a infraštruktúry potrebnej pre integráciu systémov. Ďalej používateľ zadáva výdavky na údržbu batériového úložiska a fotovoltaiickej elektrárne za rok. Výdaje pokrývajú bežné kontroly, opravy, výmeny a akékoľvek ďalšie priebežné prevádzkové náklady.

Ďalšími vstupnými údajmi sú ceny elektrickej energie v €/kWh a cena za kW rezervovanej kapacity. Používateľ zadáva cenu elektrickej energie, za ktorú ju nakupuje zo siete a cenu, za ktorú predáva prebytočnú elektrickú energiu vyrobenú z fotovoltaiickej elektrárne. Cena za kWh predanej elektrickej energie je dôležitá hlavne v scenároch, kedy fotovoltaiický systém produkuje viac energie, ako je potrebné a tým je umožnený export prebytočnej energie. Cena za kW pôvodnej a novej rezervovanej kapacity je dôležitá pre určenie úspor integráciou batériového úložiska a následným orezávaním špičiek.

Životnosť batérie sa vzťahuje na očakávanú prevádzkovú životnosť batériového systému a je zadávaná v rokoch. Životnosť batérie určuje celkový počet časových období,

pre ktoré sa počíta ekonomická analýza investície a túto hodnotu je možné do editačného poľa zadať len ako celé číslo.

Diskontná sadzba udávaná v percentách predstavuje sadzu, ktorou sú budúce peňažné toky diskontované na ich súčasnú hodnotu. Diskontná sadzba predstavuje alternatívne náklady na investovanie finančných prostriedkov do projektu alebo investičnej príležitosti, pričom sa zohľadňuje časová hodnota peňazí [29].

Úsporou, ktorá vznikne inštaláciou batériového úložiska sa považuje zníženie rezervovanej kapacity z pôvodnej hodnoty na novú. Inštaláciou fotovoltickej elektrárne môžu vzniknúť úspory v podobe zníženia spotreby energie systému, úspora nabíjaním batériového úložiska prebytkom energie alebo predaj nadbytočnej energie do distribučnej siete.

Výsledky ekonomickej analýzy zahŕňajú nasledujúce ukazovatele. Prvým z nich je čistá súčasná hodnota (Net Present Value), teda hodnota všetkých budúcich peňažných tokov, pozitívnych aj negatívnych, počas celej doby investície, diskontovaných do súčasnosti. Analýza NPV je formou vnútorného oceňovania a používa sa pri kapitálovom rozpočtovaní a plánovaní investícií. Kladná hodnota NPV znamená, že predpokladané zisky generované investíciou, ktoré sú diskontované na súčasnú hodnotu presahujú očakávané náklady a investícia bude zisková. Investícia so zápornou hodnotou NPV značí stratu a projekt sa neuvažuje ako ziskový. V programe sa uvažuje konštantný peňažný tok pre každý rok počas celej doby projekcie. Čistá súčasná hodnota sa určí pomocou rovnice (3.3) [30].

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (3.3)$$

Kde:

- CF_t – čistý peňažný tok za obdobie t ,
- i – diskontná sadzba,
- n – počet časových období.

Vnútorná miera návratnosti (Internal Rate of Return) je metrika, ktorá sa používa vo finančnej analýze na odhad ziskovosti potenciálnych investícií. IRR je diskontná sadzba, pri ktorej sa čistá súčasná hodnota všetkých peňažných tokov rovná nule v analýze diskontovaných tokov. Vo všeobecnosti platí, že pri porovnávaní investičných možností s inými podobnými charakteristikami sa investícia s najvyšším IRR považuje za najlepšiu. Vnútorná miera návratnosti sa všeobecne určí podľa rovnice (3.4), ale v programe je určená vstavanou funkciou `irr` aplikácie MATLAB [31].

$$0 = NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} - IN \quad (3.4)$$

Kde:

- CF_t – čistý peňažný tok za obdobie t ,
- IN – celková počiatočná investícia,
- IRR – vnútorná miera návratnosti,
- n – počet časových období.

Návratnosť investície (Return on Investment) je pomer, ktorý meria ziskovosť investície porovnaním zisku alebo straty s jej nákladmi. Návratnosť investície sa uvádza v percentách a je možné ju vypočítať podľa rovnice (3.5) [32].

$$ROI = \frac{\text{Čistá súčasná hodnota}}{\text{Celková počiatočná investícia}} \cdot 100 \quad (3.5)$$

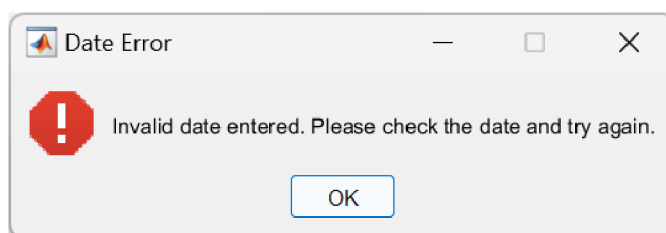
Doba návratnosti (Payback period) sa vzťahuje na časové obdobie, ktoré je potrebné na vrátenie nákladov na investíciu. V programe je doba návratnosti určená ako rok, v ktorom čistá súčasná hodnota dosiahne kladnú hodnotu [33].

Tieto vstupné údaje a výsledky ekonomickej analýzy poskytujú užívateľovi dôležité informácie pri rozhodovaní o investícii do batériového úložiska a fotovoltickej elektrárne.

3.1.6 Interval a spustenie simulácie

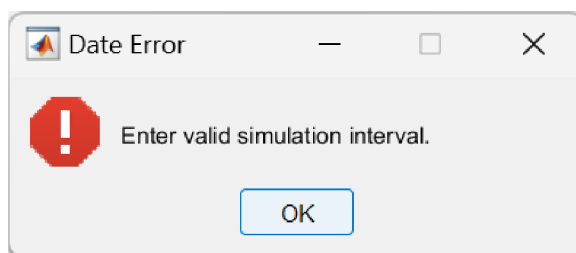
V paneli s názvom „Simulation interval“ zadáva používateľ časové obdobie, pre ktoré chce zobrazíť simuláciu batériového úložiska pre daný objekt. V tomto paneli je možné pomocou rolovacieho menu vybrať deň, mesiac, hodinu a minútu pre začiatok a koniec simulácie. Do editačného poľa zadáva aj rok, pre ktorý sa má simulácia vykonať. V prípade, že používateľ simuluje namerané dáta, je potrebné, aby sa rok simulácie zhodoval s rokom, ktorý je zadaný v excelovskom dokumente so spotrebou elektrickej energie objektu. V prípade použitia TDD, je potrebné nastaviť rok simulácie 2024. Na tomto paneli sa nachádza aj tlačidlo „Run“, s ktorým sa spustí simulácia.

V rámci kontroly zadávania časových údajov bola v programe zavedená bloková štruktúra „try-catch“, ktorá má zachytiť potenciálne chyby vyplývajúce z nesprávneho zadania dátumov. V prípade zadania dátumu, ktorý neexistuje, ako je napríklad 30. február alebo 31. apríl, zachytí „catch“ blok nesprávny dátum a používateľovi je prostredníctvom dialógového okna zobrazené upozornenie s výzvou na zadanie správneho dátumu. Ďalšie výpočty aplikácie sú pozastavené kým nie je zadaný správny dátum.



Obrázok 13: Chybové hlásenie v prípade zadania neexistujúceho dátumu

Nasledujúce hlásenie sa týka zadávania správneho časového intervalu simulácie. Časť kódu overuje, či dátum a čas začiatku simulácie nastáva pred alebo po dátume a čase konca simulácie. V prípade, že dátum konca simulácie je nastavený pred dátumom začiatku simulácie, program to vyhodnotí ako neplatný interval. Ak je zistený neplatný interval, používateľovi sa zobrazí dialógové okno s upozornením na zadanie platného intervalu a program je pozastavený.



Obrázok 14: Chybové hlásenie v prípade zadania nesprávneho intervalu simulácie

3.2 Spracovanie vstupných dát

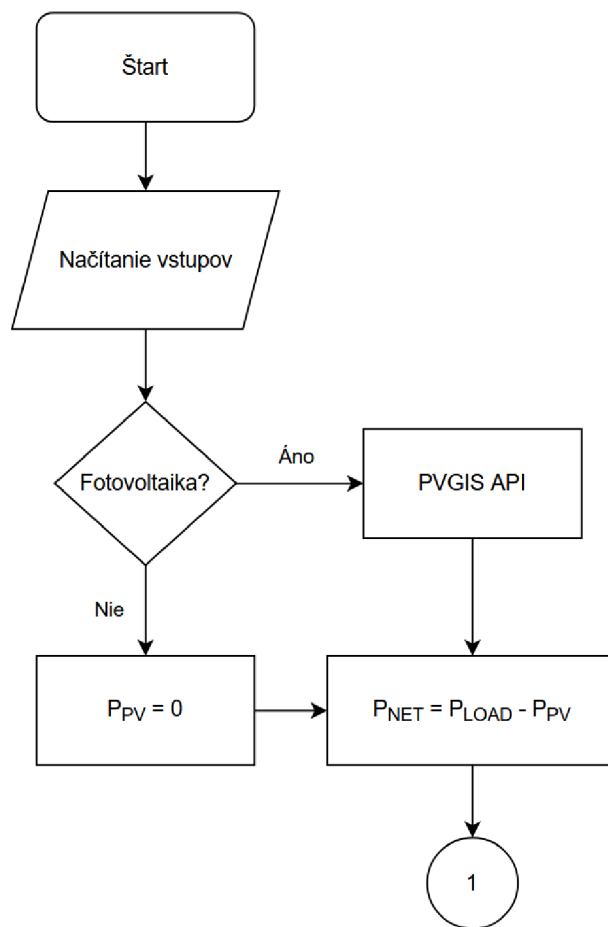
Po správnom načítaní vstupných dát o spotrebe a výrobe elektrickej energie začína aplikácia s výpočtami výkonových bilancií. Medzi hlavné patrí výpočet toku výkonu na rozhraní distribučnej siete a priemyselného objektu. Tento výkon je daný rozdielom spotreby a výroby.

$$P_{NET} = P_{LOAD} - P_{PV} \quad (3.6)$$

V prípade, kedy nie je prítomná výroba elektrickej energie sa výkon systému rovná spotrebe systému.

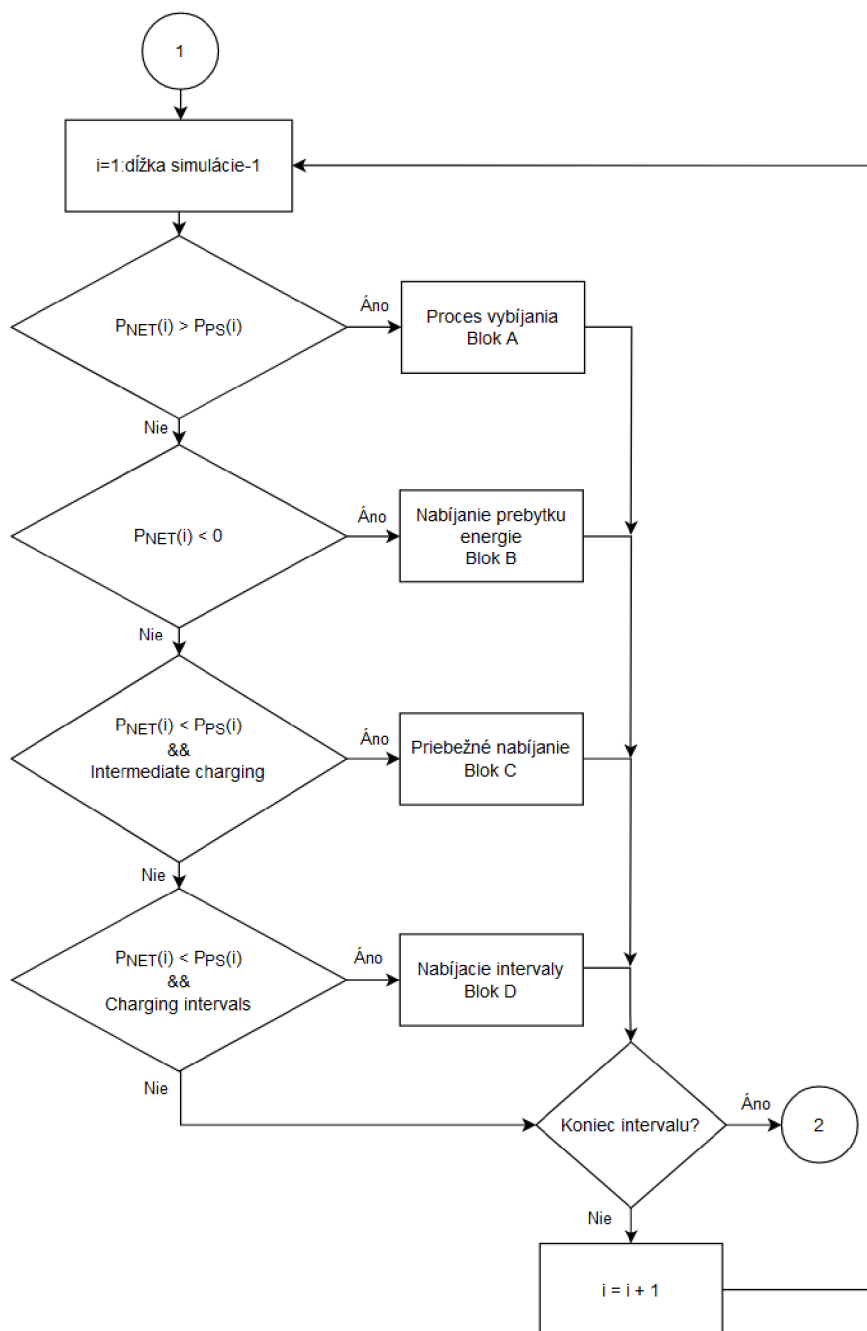
$$P_{NET} = P_{LOAD} - 0 = P_{LOAD} \quad (3.7)$$

Týmto spôsobom aplikácia zohľadňuje rôzne scenáre a prispôbuje svoje výpočty podľa aktuálnych podmienok.



Obrázok 15: Vývojový diagram pre výpočet výkonových bilancií systému

Na základe výkonových bilancií sú počítané energetické bilancie systému. Výsledné hodnoty pre zvolenú dobu simulácie sú zobrazené v karte „Results“. Tieto hodnoty poskytujú užitočný prehľad o energetických bilanciách systému. Po vypísaní energetických bilancií začína aplikácia proces vybíjania a nabíjania batériového úložiska s cieľom orezávať špičkové zaťaženia, pričom zohľadňuje vstupné parametre a dĺžku simulácie. Aplikácia sleduje priebeh spotreby a výroby energie a na základe toho riadi nabíjanie a vybíjanie batériového úložiska.

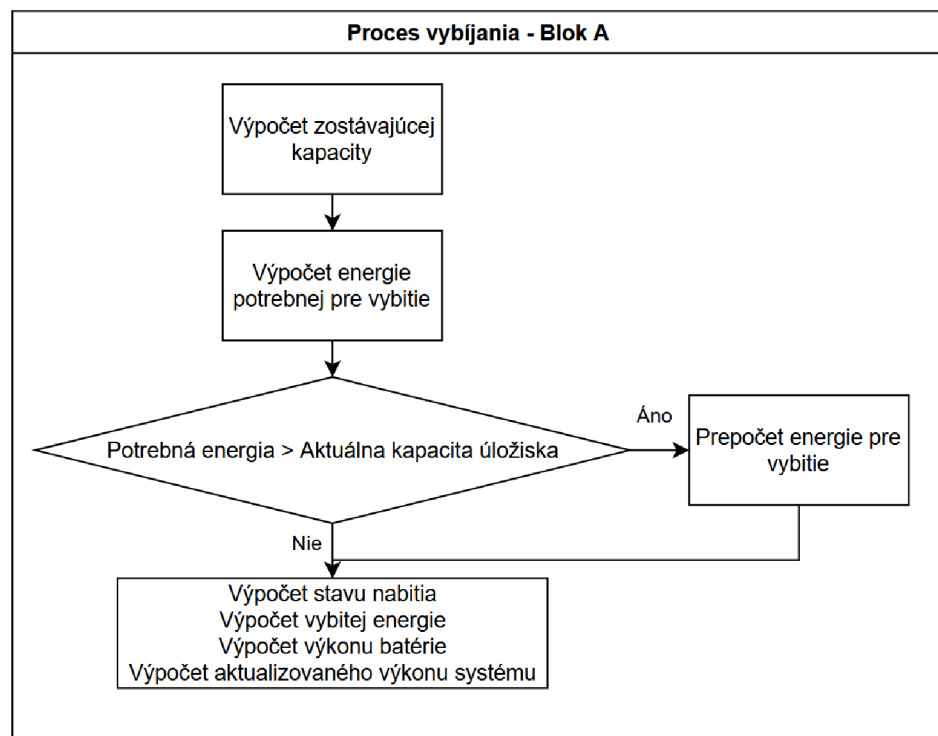


Obrázok 16: Vývojový diagram algoritmu pre riadenie vybíjania a nabíjania batériového úložiska

3.3 Proces vybíjania batériového úložiska

Proces vybíjania batériového úložiska predstavuje dôležitú fázu jeho prevádzky. Táto časť popisuje mechanizmus riadenia tokov elektrickej energie v rámci vybíjania batériového úložiska. Proces vybíjania batériového úložiska začína vyhodnotením stavu, kedy výkon systému prekročí nastavené prahové hodnoty pre orezávanie špičiek. Táto podmienka slúži ako spúšťač na určenie, či je potrebné vybíjanie batérie. Po splnení podmienky program vypočíta zostávajúcu kapacitu, ktorá je k dispozícii na vybitie a potrebnú energiu k vybitiu. Ako počiatočná hodnota sa berie kapacita s maximálnym stavom nabitia, ktorú zadá používateľ. Nasleduje porovnanie aktuálneho stavu nabitia s minimálnym stavom nabitia, aby nedošlo k prekročeniu vybitia dostupnej kapacity batérie. Ak by malo dôjsť k prekročeniu, aplikácia prepočíta maximálne možné množstvo energie na vybitie. Pre tento výpočet je potrebné zohľadnenie niekoľkých faktorov, ako je dĺžka časového intervalu, zostávajúca kapacita batérie a maximálny výkon batérie. Výsledná energia, ktorú je potrebné vybiť je obmedzená tak, aby neprekročila dostupnú kapacitu a maximálny výkon batérie.

Po výpočte energie potrebnej pre vybitie, nasleduje aktualizácia stavu nabitia batérie odčítaním vybitej energie od aktuálneho stavu nabitia. Táto aktualizácia zabezpečuje presné zobrazenie aktuálneho stavu nabitia batérie v čase. Množstvo vybitej energie sa zaznamenáva pre sledovanie celkového množstva odobranej energie z batérie počas procesu vybíjania. Následne je v každom kroku počítaný výkon siete, ktorý je aktualizovaný o množstvo energie vybitej z batériového úložiska a výkonu batérie.



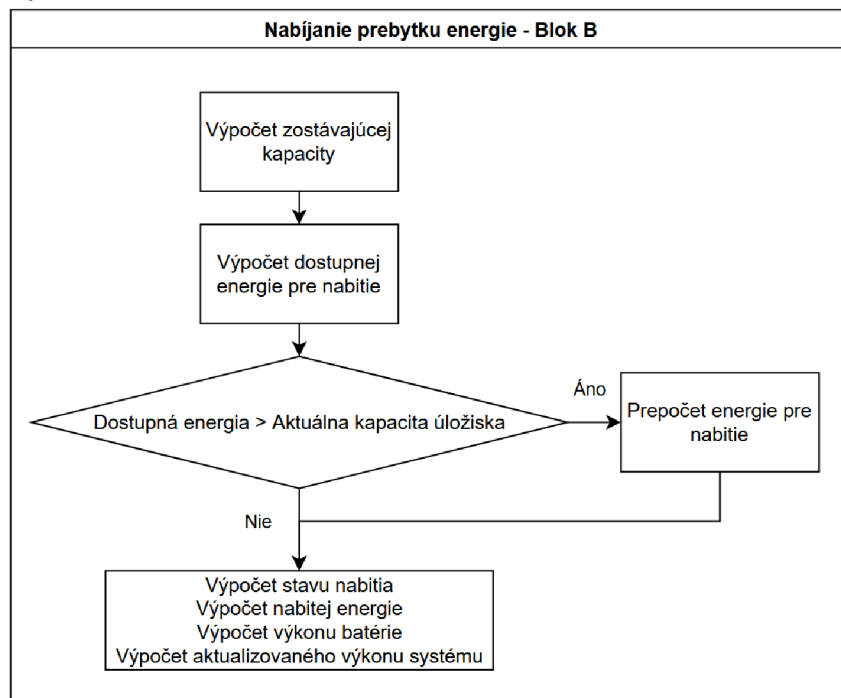
Obrázok 17: Vývojový diagram algoritmu pre riadenie vybíjania batériového úložiska

3.4 Proces akumulácie prebytku elektrickej energie

Proces akumulácie prebytku elektrickej energie je kľúčovým prvkom efektívneho využitia fotovoltaických zdrojov. Počas období, kedy je výroba elektrickej energie z fotovoltaickej elektrárne väčšia ako spotreba objektu je celkový výkon siete záporný. V čase, keď je tento výkon záporný, je možné prebytočnú energiu nabíjať do batériového úložiska. Prebytok energie vzniká najmä v slnečných obdobiach alebo počas zníženej spotreby elektrickej energie. Prvým krokom tohto procesu je výpočet dostupnej kapacity batérie na nabitie. Dostupná kapacita pre nabíjanie prebytku energie sa určí ako rozdiel medzi 100% stavom nabitia a aktuálnym stavom nabitia. Nabíjanie prebytkom z fotovoltaickej elektrárne je uprednostnené pred nabíjaním zo siete.

Program následne vypočíta množstvo energie, ktoré je potrebné nabiť do batérie, počas obdobia prebytku. Táto hodnota je limitovaná kapacitou a výkonom batériového úložiska. Ak by nabitie prebytočnej energie v danom čase malo prekročiť maximálny stav nabitia určený kapacitou batérie, uskutočnia sa potrebné úpravy. V tomto prípade sa prepočíta veľkosť energie, ktorú je možné nabiť do batérie, čím nedôjde k presiahnutiu limitov batérie. Prebytočná energia, ktorú nie je možné nabiť, je presmerovaná v rámci energetických tokov do distribučnej siete. Tento proces dodávky prebytočnej energie zvyšuje celkovú efektívnosť riadenia energetických tokov. Po dobití výkonu do batérie sa aktualizuje stav nabitia batérie a energetická bilancia systému.

Prebytočná energia, ktorá je nabitá do batériového úložiska, je následne využitá na pokrytie špičiek a znižuje tak potrebu nabíjania úložiska z distribučnej siete, čím sa znižujú náklady.



Obrázok 18: Vývojový diagram algoritmu pre riadenie nabíjania batériového úložiska z fotovoltaickej elektrárne

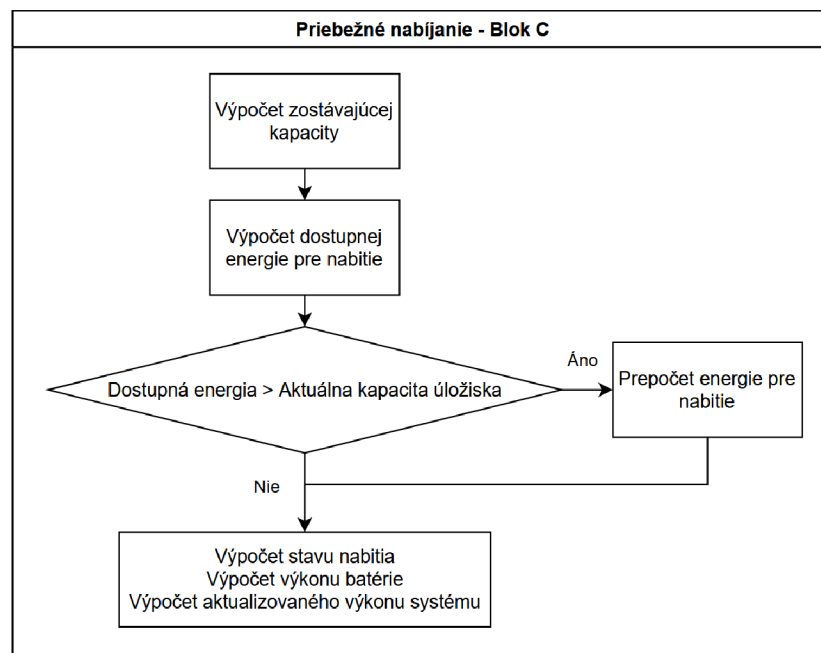
3.5 Stratégia priebežného nabíjania „Intermediate charging“

Používateľ si môže vybrať spôsob nabíjania batériového úložiska podľa vlastných preferencií. Na výber má z dvoch možných stratégií nabíjania. Prvou z nich je stratégia priebežného nabíjania. Táto stratégia nabíja batériové úložisko vždy, kedy to je možné.

Spustenie nabíjania nastáva vtedy, keď výkon siete klesne pod definovanú hodnotu orezávania špičiek a stav nabitia batérie je pod používateľom nastavenou hodnotou. Prvým krokom je vypočítanie aktuálnej dostupnej kapacity batérie. Následne sa vypočíta množstvo energie, ktoré je potrebné na základe aktuálneho deficitu. Veľkosť nabíjacieho výkonu, ktorý je potrebný pre nabitie batérie, je obmedzený rozdielom hodnoty orezávania špičky a veľkosťou výkonu siete. Dostupný výkon je následne obmedzený výkonom batérie, ktorý je nastavený prostredníctvom C-rate.

Ak by mala veľkosť energie prekročiť hodnotu maximálneho stavu nabitia zadanú používateľom, program prepočíta objem energie, ktorý je možné nabiť tak, aby nebolo prekročené maximum. Po určení vhodného množstva energie na nabitie sa aktualizuje stav nabitia batérie a výkon batérie. Keďže ide o nabíjanie batériového úložiska z distribučnej siete, upravuje sa aj veľkosť výkonu systému. Veľkosť výkonu systému je navýšená o odobraný výkon procesom nabíjania batérie.

Stratégia priebežného nabíjania má výhodu v udržiavaní čo najväčšieho stavu nabitia počas celého obdobia a možnosti pokrytia neočakávaných špičkových odberov. Nevýhodou tejto stratégie je nižšia dostupná kapacita pre nabíjanie prebytku energie z fotovoltaickej elektrárne. Nabíjanie batérie je zabezpečené tak, aby nedošlo k prekročeniu maximálneho výkonu batérie a aby nedošlo k prekročeniu rezervovanej kapacity.



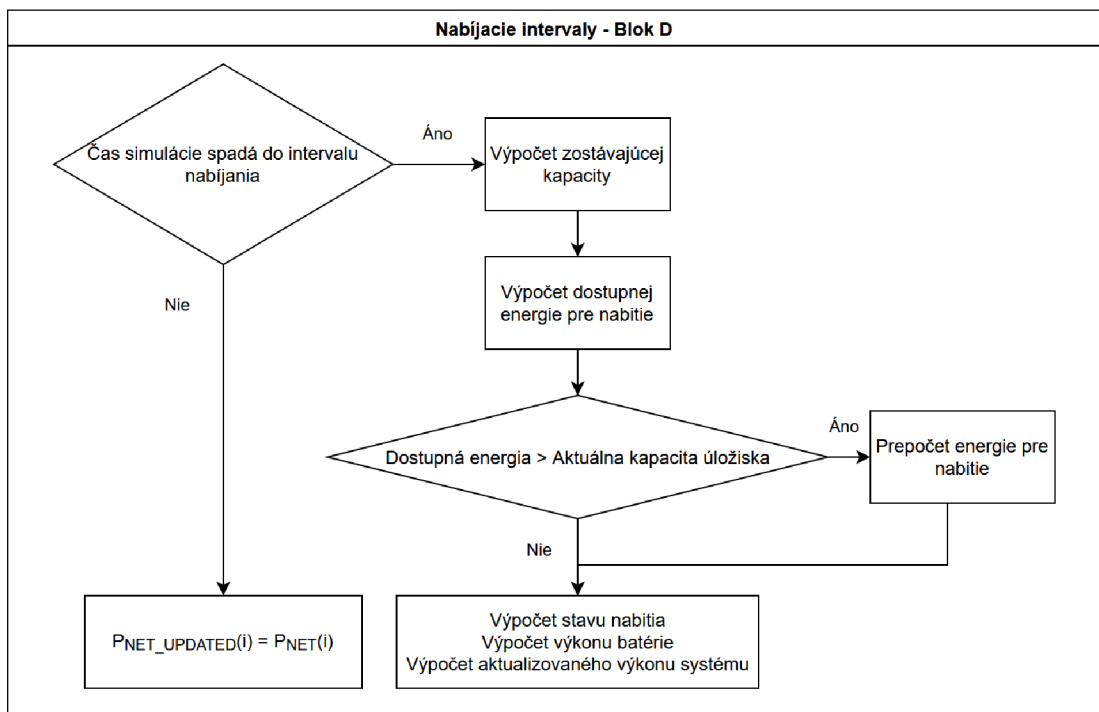
Obrázok 19: Vývojový diagram algoritmu pre riadenie nabíjania batériového úložiska stratégiou priebežného nabíjania

3.6 Stratégia nabíjacích intervalov „Charging intervals“

Druhou možnosťou je stratégia nabíjacích intervalov. Táto stratégia nabíja batériové úložisko vo vopred definovanom časovom období, ktoré sa opakuje každý deň počas celej doby simulácie. Používateľ si zvolí čas, kedy sa má batériové úložisko začať nabíjať a kedy má nabíjanie skončiť.

Proces nabíjania začína vyhodnotením aktuálneho času iterácie, v ktorej sa nachádza simulácia. Ak sa časová stopa simulácie zhoduje so začiatkom času nabíjania, ktorú zadal užívateľ, program vypočíta zostávajúcu kapacitu batériového úložiska rovnako ako pri iných stratégiách nabíjania. Energia, ktorá je dobíjaná do batérie je obmedzená veľkosťou dostupného výkonu tak, aby nedošlo k prekročeniu hodnoty rezervovanej kapacity. Ďalším obmedzením je nabíjací výkon batérie. Ak by malo dôjsť k prekročeniu maximálneho stavu nabitia, program vypočíta maximálne množstvo energie, ktoré je možné nabiť.

Po každom dobití sa aktualizuje stav nabitia batérie, výkon batérie a výkon systému. Ak dôjde k nabitiu batérie ešte pred skončením nabíjacieho intervalu, tak sa nabíjanie v tomto čase ukončí. V prípade, že sa batéria nedokáže nabiť na maximálnu hodnotu v nabíjacom intervale, je nabíjanie taktiež ukončené a batériové úložisko nebude mať maximálny možný stav nabitia. V prípade, že čas iterácie nie je v intervale nabíjania, dochádza ku koncu iterácie.

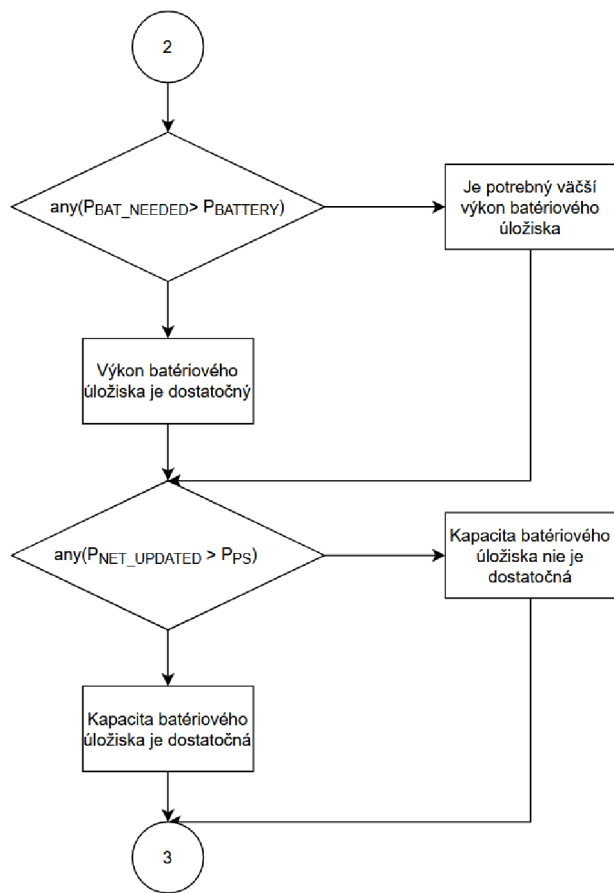


Obrázok 20: Vývojový diagram algoritmu pre riadenie nabíjania batériového úložiska stratégiou nabíjacích intervalov

3.7 Vyhodnotenie simulácie

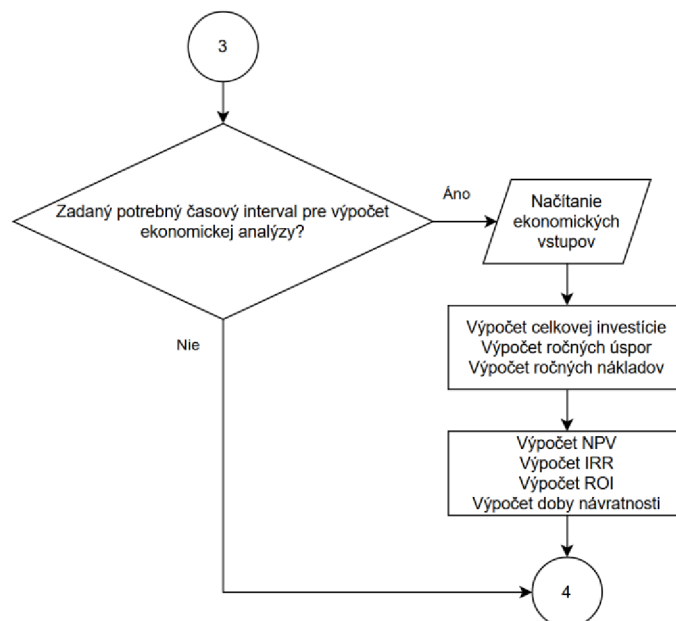
Po skončení všetkých iterácií simulácie, pre zvolené časové obdobie dochádza k vyhodnoteniu a vypísaniu výsledných hodnôt. Aplikácia vyhodnotí, či hodnoty výkonu systému po využití batériového úložiska prekračujú hodnotu novej rezervovanej kapacity. Tento výkon je reprezentovaný veličinou $P_{NET_UPDATED}$. V prípade, že sú všetky hodnoty výkonu $P_{NET_UPDATED}$ rovné, alebo menšie ako hodnota rezervovanej kapacity, batériové úložisko vyhovuje a dodávka elektrickej energie je zabezpečená. V prípade, že akýkoľvek výkon $P_{NET_UPDATED}$ je väčší, ako rezervovaná kapacita v danom čase, batériové úložisko nepokrýva dodávku. To môže byť spôsobené nedostatočným výkonom, alebo nedostatočnou kapacitou batériového úložiska. Ako prvé sa posudzuje, či má batériové úložisko dostatočný výkon pre vybíjanie. Ak je veľkosť výkonu batériového úložiska rovnaká alebo väčšia od požadovaného výkonu, zobrazí sa hlásenie o dostatočnom výkone batérie. Pre prípad nedostatočného výkonu batérie sa zobrazí varovné hlásenie. Toto hlásenie obsahuje aj údaj o maximálnom výkone, ktorý bol potrebný pre vybíjanie počas celej doby simulácie. Užívateľ môže podľa tohto údaju upraviť kapacitu alebo C-rate batérie na potrebnú veľkosť.

Ďalšie hlásenie informuje o celkovom pokrytí dodávky energie pre špičkové zaťaženie. Ak je spotreba pokrytá, zobrazí sa hlásenie o vyhovujúcej konfigurácii batériového úložiska. Toto hlásenie odporúča aj náhľad do karty s citlivosťou analýzou, kde si používateľ môže pozrieť, ako by vyhovovali iné kapacity batériového úložiska pre zvolenú konfiguráciu systému. Pri zobrazení varovného hlásenia o nepokrytí dodávky je potrebná kontrola výkonu pre vybíjanie batérie. V prípade, že dodávka nie je zabezpečená, ale výkon vybíjania je dostatočný, je potrebné zvýšiť kapacitu batériového úložiska alebo zvýšiť veľkosť rezervovanej kapacity pre obdobia, kedy došlo k jej prekročeniu. Používateľ sa môže rozhodnúť pomocou výsledných hodnôt a grafických zobrazení, čo je pre neho výhodnejšia voľba.



Obrázok 21: Vývojový diagram algoritmu pre vyhodnotenie simulácie

Po vyhodnotení, či batériové úložisko vyhovuje a výpise výsledkov nasleduje výpočet ekonomickej analýzy, ktorá je popísaná v kapitole 3.1.5.

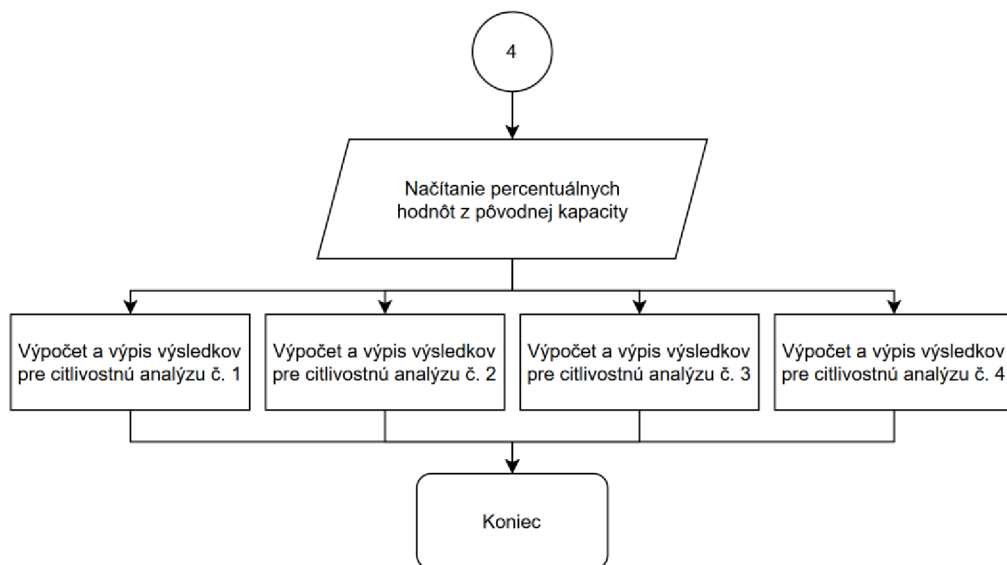


Obrázok 22: Vývojový diagram algoritmu pre ekonomickú analýzu

3.8 Citlivostná analýza

Citlivostná analýza vyhodnocuje možnosti využitia rôznych kapacít batériového úložiska. Používateľ si môže zvoliť štyri hodnoty pre citlivostnú analýzu, zadaním percentuálnej hodnoty z pôvodnej kapacity úložiska. V editačných poliach sú prednastavené hodnoty 70 %, 85 %, 115 % a 130 % z pôvodnej kapacity batériového úložiska. V citlivostnej analýze sú simulované batériové úložiská rovnakým spôsobom, ako pre užívateľom zadanú kapacitu. Pomocou analýzy si môže používateľ overiť, či znížením alebo zvýšením kapacity batériového úložiska bude dodávka elektrickej energie pre daný systém zabezpečená.

Významom citlivostnej analýzy je čo najefektívnejšie využitie batériového úložiska a nájdenie optimálnej kapacity. V rámci citlivostnej analýzy sú popísané najdôležitejšie parametre pre každú zo simulovaných kapacít. Používateľ si prostredníctvom hlásení môže overiť, či by rôzne kapacity vyhovovali nastaveným podmienkam. Výsledky citlivostnej analýzy a hlásenia sa nachádzajú na karte „Sensitivity analysis“.



Obrázok 23: Vývojový diagram algoritmu pre citlivostnú analýzu

3.9 Grafické užívateľské rozhranie aplikácie

Táto kapitola sa zaoberá návrhom, vývojom a funkcionalitami grafického užívateľského rozhrania v rámci aplikácie. Jednotlivé karty a polia sú navrhnuté tak, aby jednoducho a efektívne umožnili používateľovi zadávať čo najviac informácií o objekte pre simuláciu. Pre prehľadnosť je aplikácia členená do 9 kariet, na ktorých sa nachádzajú potrebné informácie o vstupoch a výstupoch simulácie. Pre vytvorenie grafického užívateľského rozhrania boli použité komponenty z knižnice programu MATLAB App Designer.

Pre zadávanie dát sú využívané editačné polia, rolovacie menu a výsledné dáta sú zobrazované pomocou textových polí a grafických závislostí. Tieto prvky umožňujú používateľovi interaktívne zadávať vstupné údaje a vizualizovať výsledky simulácie. Nasledujúce podkapitoly detailne popisujú jednotlivé karty a polia aplikácie, ktoré umožňujú používateľovi správne a efektívne používanie aplikácie. Údaje v jednotlivých kartách a paneloch sú len informatívne a nepredstavujú skutočné výsledky.

3.9.1 Panel s dátami o spotrebe

Panel „Consumption inputs“ na karte „Inputs“ umožňuje používateľovi zadávať vstupné údaje o spotrebe daného objektu. Používateľ si pomocou prepínača vyberie interval vzorkovania dát. Na výber je 15 minútový a hodinový interval. Pomocou prepínača zdroja dát si používateľ vyberie zdroj vstupných údajov pre spotrebu objektu. Typové diagramy dodávky s intervalom 15 minút sú uložené v súbore TDD15.xlsx a s hodinovým intervalom v súbore TDD.xlsx. Tieto súbory sú súčasťou programu. Ak je prepínač na hodnote TDD, odblokuje sa rolovacie menu pre výber jednej z kategórií TDD. Na výber sú štyri kategórie typových diagramov dodávok: TDD1, TDD2, TDD3 a TDD8. Prepnutím prepínača do polohy „TDD“ sa odblokuje editačné pole s maximálnym vzťažným výkonom počas roka.

Prepnutím prepínača do polohy „My own data“ sa zablokuje rolovacie menu kategórie TDD a editačné pole s maximálnym výkonom počas roka a odblokuje tlačidlo s ikonou .xlsx súboru. Stlačením tohto tlačidla sa otvorí dialógové okno, pomocou ktorého užívateľ vyberie súbor s vlastnými dátami o spotrebe objektu. Tieto dáta zadáva do predpripravených excelovských dokumentov, ktoré sú priložené k aplikácii.


Consumption data inputs

Data samples interval

15 minute 1 hour

Consumption data source

TDD My own data

Selected file 

TDD Category

Maximum Power During the Year (kW)

Obrázok 24: Panel pre zadávanie vstupných údajov o spotrebe

3.9.2 Panel s dátami o batériovom úložisku

Tento panel s názvom „Battery inputs“ na karte „Inputs“ slúži na zadávanie vstupných parametrov batériového úložiska. Je potrebné, aby používateľ zadal kapacitu batériového úložiska v kWh, C-rate batérie, maximálny a minimálny stav nabitia batérie v percentách.

V tomto paneli používateľ zadáva aj percentuálne hodnoty z pôvodnej kapacity batériového úložiska, pre ktoré chce, aby bola počítaná citlivostná analýza.

Ďalším vstupom je výber nabíjacej stratégie pomocou prepínača „Charging strategy“. Na výber sú dve možnosti nabíjajúcich stratégií. Stratégia okamžitého nabíjania „Intermediate charging“ a stratégia „Charging intervals“. Výberom stratégie nabíjajúcich intervalov sa odblokujú rolovacie menu, prostredníctvom ktorých užívateľ vyberie začiatok a koniec nabíjacieho intervalu.

Battery inputs			
Battery Capacity (kWh)	40	Max SoC (%)	80
Battery C-rate	1	Min SoC (%)	10
Enter Capacity Variations for Sensitivity Analysis Using % of Initial Capacity			
70	85	115	130
Charging strategy			
Intermediate charging	<input type="checkbox"/>	Charging intervals	
Charging start:	Hour	02 ▼	Minute 00 ▼
Charging end:	Hour	06 ▼	Minute 00 ▼

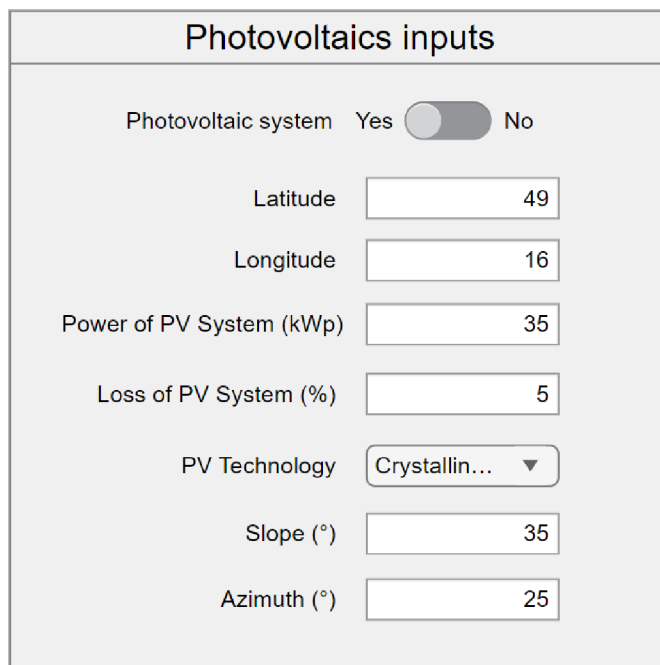
Obrázok 25: Panel pre zadávanie vstupných údajov o batériovou úložisku

3.9.3 Panel s dátami o fotovoltaickej elektrárni

Panel „Photovoltaics inputs“ lokalizovaný na karte „Inputs“ slúži na zadávanie údajov o fotovoltaickom systéme. Používateľ si pomocou prepínača „Photovoltaic system“ vyberie, či má simulácia počítať s výrobou energie z fotovoltaickej elektrárne. Prepnutím na stav „No“ sa zablokujú editačné polia a rolovacie menu. V simulácii nebude následne uvažovaná výroba elektrickej energie. Ak je prepínač v polohe „Yes“, editačné polia a rolovacie menu sa odblokujú.

Editačné polia slúžia na zadanie parametrov potrebných pre aplikačné programovacie rozhranie PVGIS. Používateľ zadá zemepisnú šírku a dĺžku lokality, kde sa daný fotovoltaický systém nachádza. Ďalej je potrebné vyplniť inštalovaný výkon a celkové straty systému. Technológiu fotovoltaických panelov je možné vybrať pomocou

rolovacieho menu. Na výber sú všetky technológie, pre ktoré PVGIS dokáže vypočítať solárnu energiu. Poslednými vstupnými parametrami sú uhol sklonu panelov a orientácia fotovoltaickej elektrárne.



Photovoltaics inputs	
Photovoltaic system	Yes <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Latitude	<input type="text" value="49"/>
Longitude	<input type="text" value="16"/>
Power of PV System (kWP)	<input type="text" value="35"/>
Loss of PV System (%)	<input type="text" value="5"/>
PV Technology	<input type="text" value="Crystallin..."/>
Slope (°)	<input type="text" value="35"/>
Azimuth (°)	<input type="text" value="25"/>

Obrázok 26: Panel pre zadávanie vstupných údajov o fotovoltaickej elektrárni

3.9.4 Panel s dátami o rezervovanej kapacite a orezávaní špičkovej spotreby

V paneli „Peak shaving inputs“ na karte „Inputs“ sa nastavujú hodnoty, kedy má dôjsť k orezávaniu špičiek a dodávke potrebnej energie z batériového úložiska. Ide teda o hodnoty novej rezervovanej kapacity, ktorú je možné dosiahnuť orezávaním špičiek prostredníctvom batériového úložiska. Používateľ má možnosť výberu konštantnej hodnoty pre celý rok simulácie alebo výberu hodnôt pre jednotlivé mesiace. Tento výber je možné uskutočniť pomocou prepínačov. Prepnutím na hodnotu „Yearly“ sa zablokujú editačné polia pre zadanie premenných k jednotlivým mesiacom a aplikácia bude počítat s konštantnou hodnotou pre celú dobu simulácie. Všetky hodnoty orezávania špičiek, respektíve rezervovanej kapacity, je potrebné zadávať v kW.

Na tomto paneli sa rovnakým spôsobom zadávajú aj pôvodné hodnoty rezervovanej kapacity objektu ešte pred inštaláciou batériového úložiska. Podľa týchto hodnôt sa počíta úspora získaná znížením rezervovanej kapacity objektu.

Peak shaving inputs					
Enter Values in kW					
New Reserved Capacity			Initial Reserved Capacity		
	Monthly	<input checked="" type="radio"/>	Yearly		<input type="radio"/>
	New	Initial		New	Initial
January	<input type="text" value="25"/>	<input type="text" value="30"/>	July	<input type="text" value="15"/>	<input type="text" value="25"/>
February	<input type="text" value="21"/>	<input type="text" value="28"/>	August	<input type="text" value="14"/>	<input type="text" value="25"/>
March	<input type="text" value="19"/>	<input type="text" value="25"/>	September	<input type="text" value="16"/>	<input type="text" value="25"/>
April	<input type="text" value="14"/>	<input type="text" value="25"/>	October	<input type="text" value="19"/>	<input type="text" value="25"/>
May	<input type="text" value="15"/>	<input type="text" value="23"/>	November	<input type="text" value="24"/>	<input type="text" value="30"/>
June	<input type="text" value="15"/>	<input type="text" value="23"/>	December	<input type="text" value="26"/>	<input type="text" value="35"/>
New Reserved Capacity		<input type="text" value="17"/>	Initial Reserved Capacity		<input type="text" value="35"/>

Obrázok 27: Panel pre zadávanie údajov o orezávaní špičkového výkonu

3.9.5 Panel s dátami pre výpočet ekonomickej analýzy

V paneli „Economics inputs“ používateľ zadá vstupné informácie potrebné pre výpočet ekonomických ukazovateľov. Ekonomická analýza je počítaná len v prípade, že je simulovaný celý rok. Medzi vstupné dáta patrí cena investície do batériového úložiska a fotovoltaickej elektrárne. Ide o celkové investičné náklady, ktoré zhrňajú všetky výdaje spojené s nákupom a inštaláciou systémov. Ďalšou položkou sú ročné náklady. Do tohto editačného poľa je potrebné zadať sumu za ročné náklady na údržbu batériového úložiska a fotovoltaickej elektrárne. Medzi vstupné údaje patrí aj cena za nákup a predaj elektrickej energie a cena za kW rezervovanej kapacity. Dĺžka životnosti batériového úložiska sa berie ako doba ekonomickej analýzy. Posledným údajom potrebným pre ekonomickú analýzu je diskontná sadzba v percentách. Diskontná sadzba zahŕňa faktor času a rizika a určuje požadovanú mieru návratnosti.

Economics inputs	
Cost of Battery Storage System (€)	<input type="text" value="13000"/>
Cost of Fotovoltaic System (€)	<input type="text" value="10000"/>
Operational Expenses (€/year)	<input type="text" value="500"/>
Buy Electricity Price (€/kWh)	<input type="text" value="0.15"/>
Sell Electricity Price (€/kWh)	<input type="text" value="0.1"/>
Old Reserved Capacity Price (€/kW)	<input type="text" value="7.2"/>
New Reserved Capacity Price (€/kW)	<input type="text" value="8"/>
Battery Lifetime (years)	<input type="text" value="15"/>
Discount Rate (%)	<input type="text" value="10"/>

Obrázok 28: Panel pre zadávanie údajov na výpočet ekonomickej analýzy

3.9.6 Panel pre nastavenie dĺžky simulácie a spustenie simulácie

Panel „Simulation interval“ slúži na nastavenie dĺžky simulácie. Používateľ má pomocou rolovacieho menu možnosť vybrať deň, mesiac, hodinu a minútu začiatku a konca simulácie. Do editačného poľa zadá rok, pre ktorý sú simulované dáta. V prípade použitia nameraných dát o spotrebe je potrebné, aby sa tento rok zhodoval s rokom, ktorý je zadaný v excelovskom dokumente. Na tomto paneli sa nachádza aj tlačidlo „Run“, ktorým sa spustí simulácia. Stlačením tlačidla „Run“ sa zároveň vymažú výsledky a grafické zobrazenie z predošlej simulácie.

The image shows a web interface titled "Simulation interval". It contains two main sections: "Start date" and "End date". Each section has four dropdown menus for Day, Month, Hour, and Minute. The "Start date" is set to Day: 01, Month: 01, Hour: 00, Minute: 00. The "End date" is set to Day: 31, Month: 12, Hour: 23, Minute: 45. Below the "End date" section, there is a text input field for "Year" with the value "2024" and a "Run" button with a lightning bolt icon.

Obrázok 29: Panel pre zadávanie dĺžky simulácie a jej spustenie

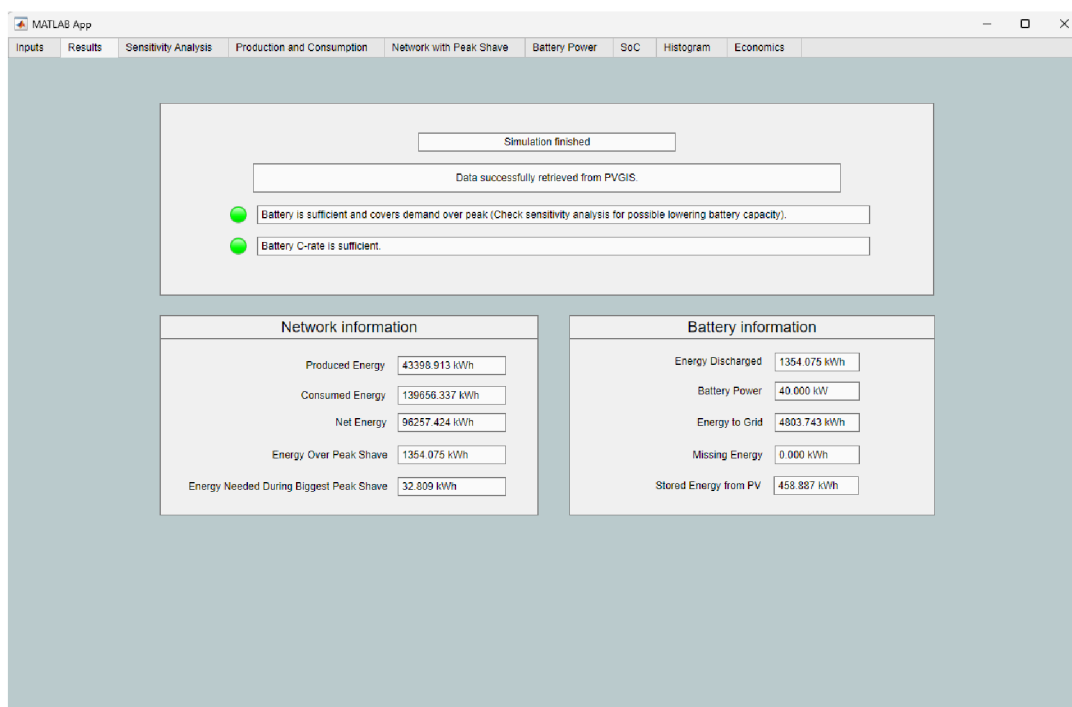
3.9.7 Karta s výsledkami simulácie

Na karte „Results“ sú zobrazené výsledky simulácie pre zadanú kapacitu batériového úložiska. Nachádzajú sa tam tri panely. Prvý panel informuje o stave simulácie, odpovedi zo serveru PVGIS a o tom, či batériové úložisko dokáže pokryť špičkové zaťaženie. Prvé textové pole zobrazuje informáciu o začiatku a konci simulácie. Druhé textové pole informuje o úspešnom alebo neúspešnom prevzatí dát zo serveru PVGIS. Ďalšie hlásenia zobrazujú vyhodnotenie simulácie, ktoré je popísané v kapitole 3.7 a zobrazené pomocou algoritmu na obrázku 21. Tieto hlásenia sú pre lepšiu vizualizáciu indikované aj LED kontrolkami. Zelená farba označuje optimálny stav a červená farba označuje nedostatočné parametre batériového úložiska.

Ďalší panel s názvom „Network information“ zobrazuje informácie o energetických bilanciách systému. Používateľovi sú zobrazené údaje o množstve vyprodukovanej a spotrebovanej energie. Rozdiel týchto dvoch energií je zobrazený v poli s celkovou energiou systému. Ďalej na tomto paneli má používateľ informáciu o celkovom množstve energie potrebnej na pokrytie spotreby nad hodnotou orezávania špičiek, teda celkovú energiu, ktorú musí batériové úložisko poskytnúť pre zvolené časové obdobie. Poslednou

informáciou na tomto paneli je množstvo energie počas najväčšej špičky, ktorú musí batériové úložisko poskytnúť vo zvolenom intervale.

Tretí panel s názvom „Battery information“ informuje o energetických bilanciách batériového úložiska počas simulovaného obdobia. Používateľ má k dispozícii dáta o celkovej energii, ktorú batériové úložisko dodalo, čo môže porovnať s hodnotou potrebnej energie v čase špičiek z druhého panelu. Ďalšou informáciou je výkon batériového úložiska, čo je dôležitý indikátor v prípade, že dodávka nie je zabezpečená z dôvodu nízkeho výkonu batériového úložiska. Pole s hodnotou prebytku energie informuje o energii, ktorú nebolo možné nabiť do batériového úložiska z dôvodu plného stavu nabitia a táto energia je braná ako pretok do distribučnej sústavy. Chýbajúca energia slúži ako informácia používateľovi o celkovej energii, ktorú batériové úložisko nedokázalo poskytnúť systému z dôvodu nízkej kapacity alebo dosiahnutia minimálneho stavu nabitia v čase potreby dodávky. V poslednom poli je zobrazená energia, ktorá sa nabila z fotovoltickej elektrárne do batériového úložiska, čím sa znížila potreba nabíjania úložiska z distribučnej siete.



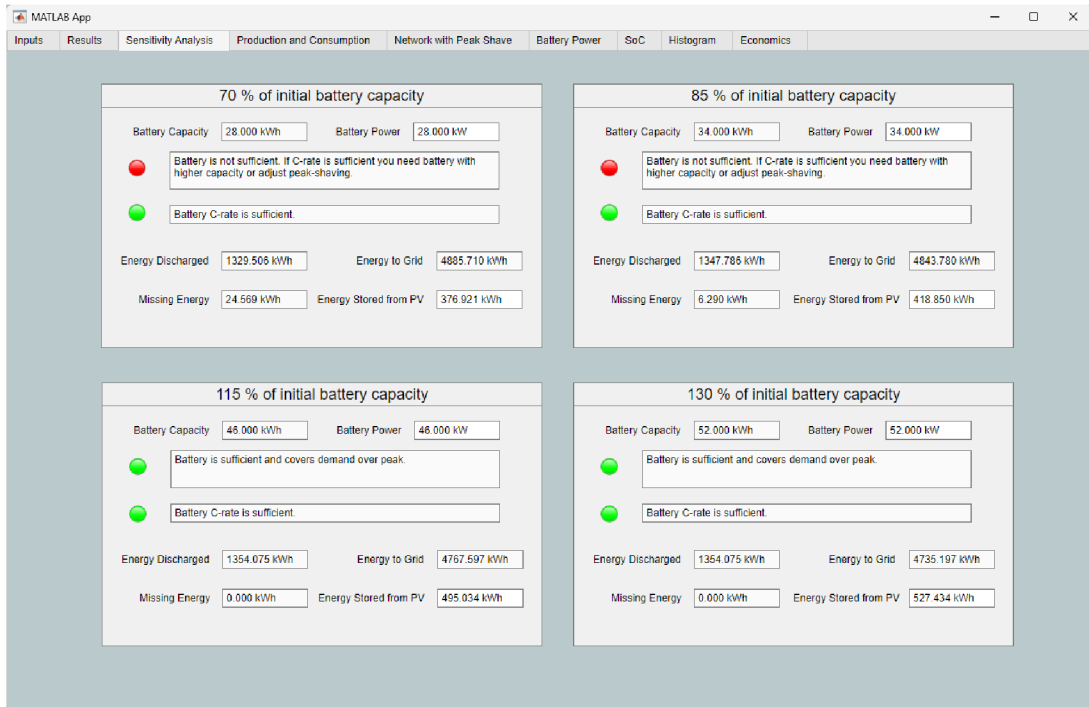
Obrázok 30: Rozloženie karty s výsledkami simulácie

3.9.8 Karta s výsledkami citlivostnej analýzy

Karta s názvom „Sensitivity analysis“ slúži na zobrazenie výsledkov citlivostnej analýzy pre používateľom zadané percentuálne hodnoty z pôvodne zadanej kapacity batériového úložiska. Karta je rozdelená do štyroch panelov, z ktorých každý slúži pre výpis výsledkov pre konkrétnu hodnotu. Používateľovi sú zobrazené najdôležitejšie informácie pre rôzne kapacity batériového úložiska. V každom paneli je informácia

o kapacite a výkone batérového úložiska. To, či daná kapacita úložiska vyhovuje, je zobrazené LED indikátormi a textovými poľami.

Keďže je citlivostná analýza počítaná pre rovnaké parametre priemyselného objektu, ďalšie textové polia obsahujú len informácie o batérovom úložisku pre konkrétne kapacity. Sú tam dostupné informácie o vybitej energii, pretoku energie do distribučnej siete, chýbajúcej energii, ktorú nebolo možné poskytnúť a energii nabitej z fotovoltaiickej elektrárne.

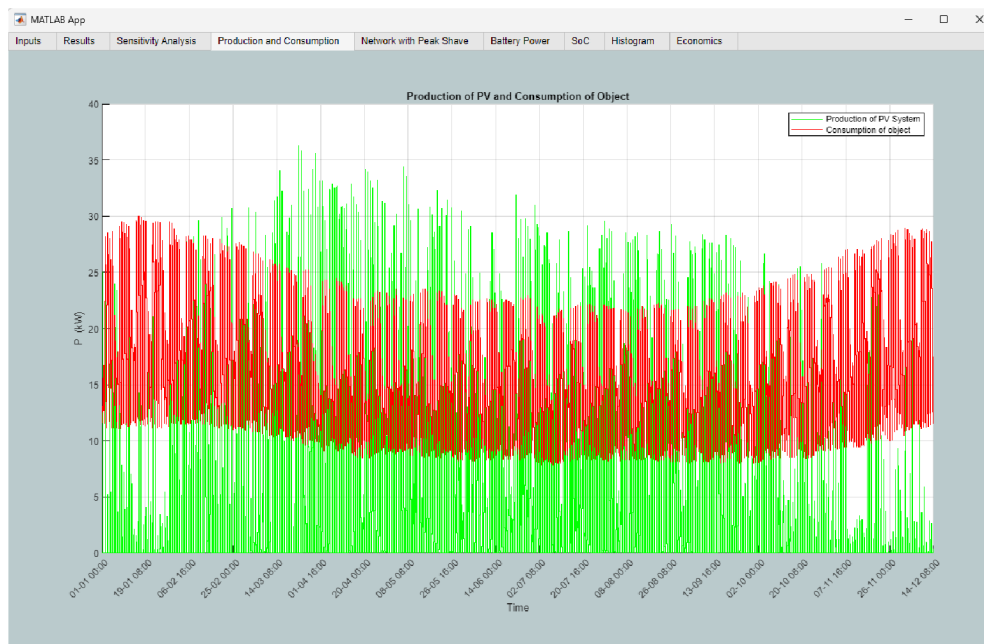


Obrázok 31: Karta s výsledkami citlivostnej analýzy

3.9.9 Zobrazenie výsledkov pomocou grafických závislostí

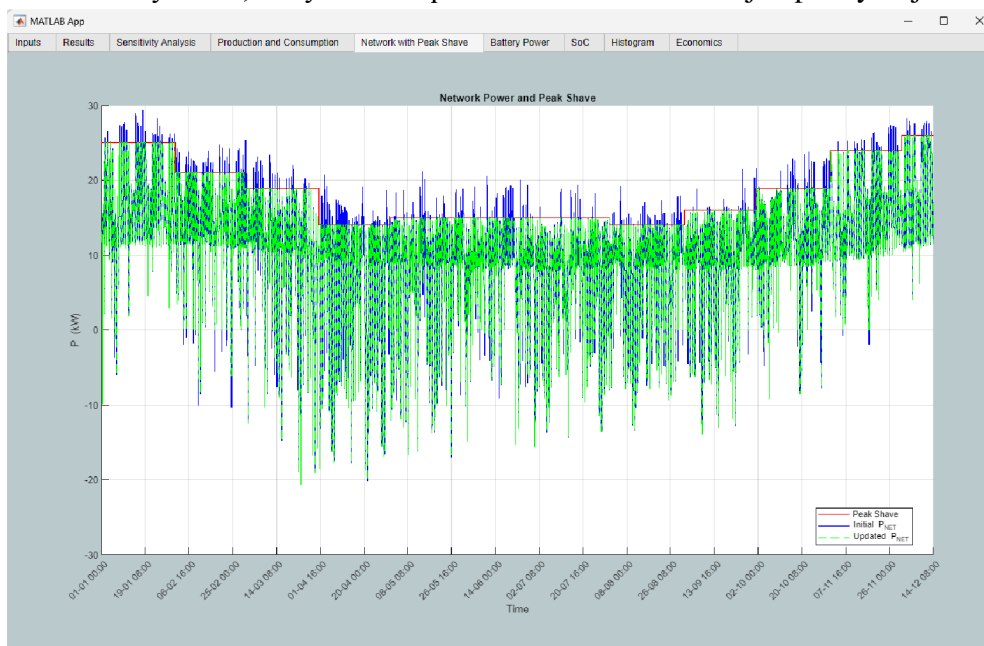
Výsledky simulácie batérového úložiska sú zobrazované aj pomocou grafov, ktoré sú pre lepšiu prehľadnosť rozložené do osobitných kariet. Jednotlivé grafy je možné interaktívne približovať a zobrazovať presné hodnoty. Zároveň je možné tieto grafické závislosti uložiť a kopírovať ako obrátok alebo vektorovú grafiku.

V karte „Production and Consumption“ sú zobrazené dáta výroby z fotovoltaiickej elektrárne získané zo stránky PVGIS a údaje o spotrebe objektu pre zvolený časový interval.



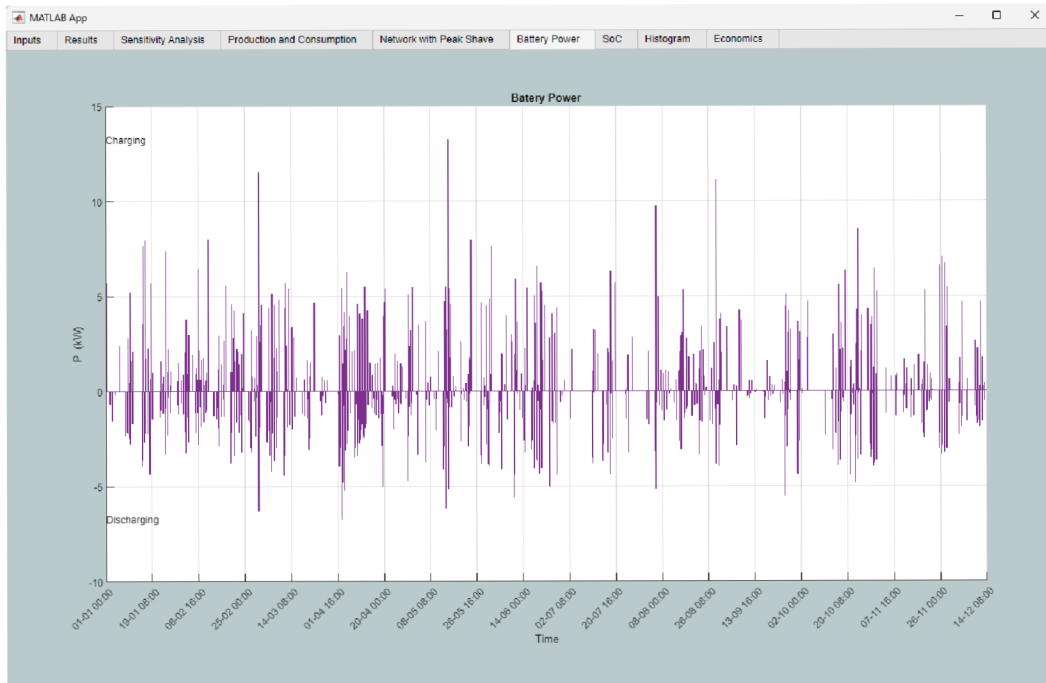
Obrázok 32: Grafické zobrazenie výroby fotovoltaickej elektrárne a spotreby objektu v čase

Karta „Network with Peak Shave“ zobrazuje výsledný výkon systému v čase pred orezávaním špičiek. Tieto hodnoty sú vykreslené modrou čiarou a označené ako P_{NET} . Na tomto grafe je zobrazená aj hodnota, kedy má dôjsť k orezaniu špičiek. Výsledná hodnota výkonu systému po zavedení batériového úložiska $P_{NET_UPDATED}$ je označená čiarkovanou zelenou čiarou. V prípade, že batériové úložisko nevyhovuje, používateľ môže podľa tejto charakteristiky zistiť, kedy došlo k prekročeniu rezervovanej kapacity objektu.



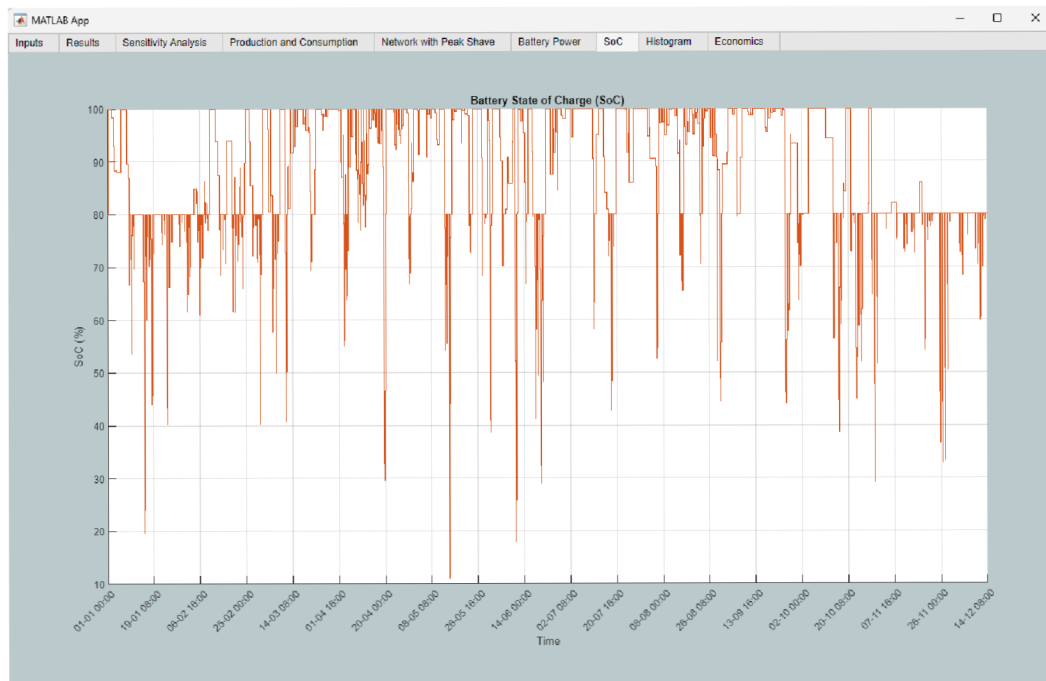
Obrázok 33: Grafické zobrazenie výkonu systému s vyznačením orezávania špičkovej záťaže v čase

Na karte s názvom „Battery Power“ je zobrazený priebeh výkonu batériového úložiska. V grafe sú zobrazené výkony, kedy došlo k nabíjaniu a vybíjaniu. Z grafu je možné odčítať aký veľký výkon bol v danom čase potrebný na pokrytie dodávky špičkového zaťaženia.



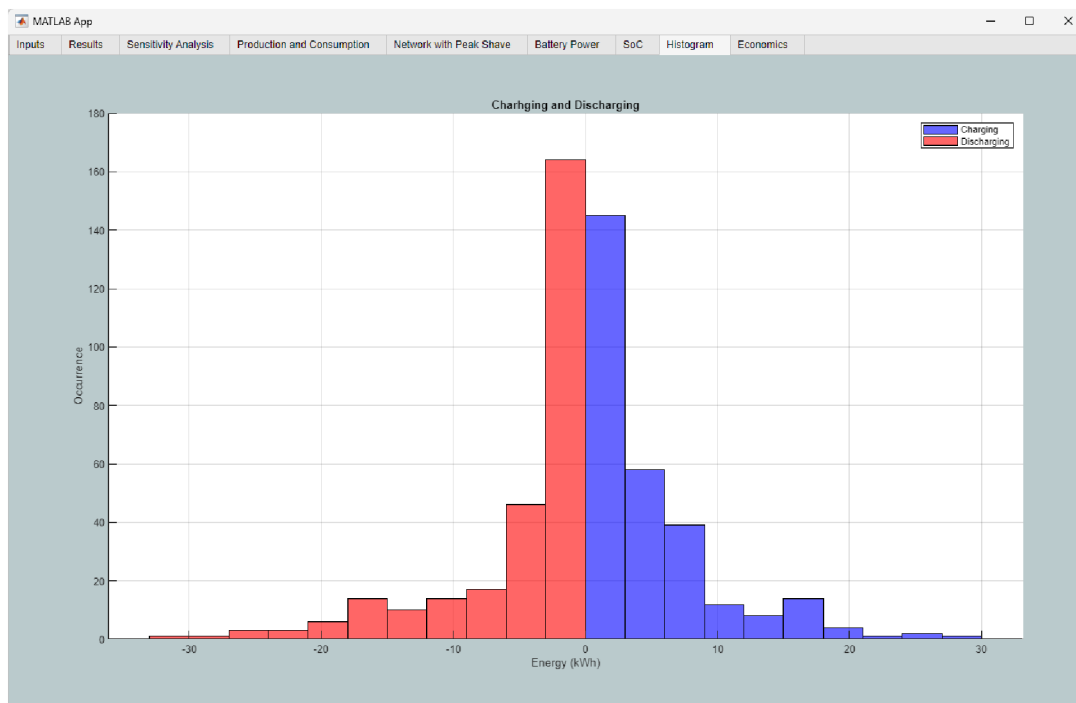
Obrázok 34: Grafické zobrazenie výkonu batériového úložiska v čase

Karta s názvom „SoC“ zobrazuje stav nabitia batériového úložiska v čase.



Obrázok 35: Grafické zobrazenie stavu nabitia batériového úložiska v čase

Histogram slúži na zobrazenie počtu výskytov nabíjania a vybíjania batériového úložiska. Tento histogram môže slúžiť ako informácia o využití kapacity batériového úložiska a ako nástroj pre ďalšiu optimalizáciu.



Obrázok 36: Histogram nabíjania a vybíjania batériového úložiska

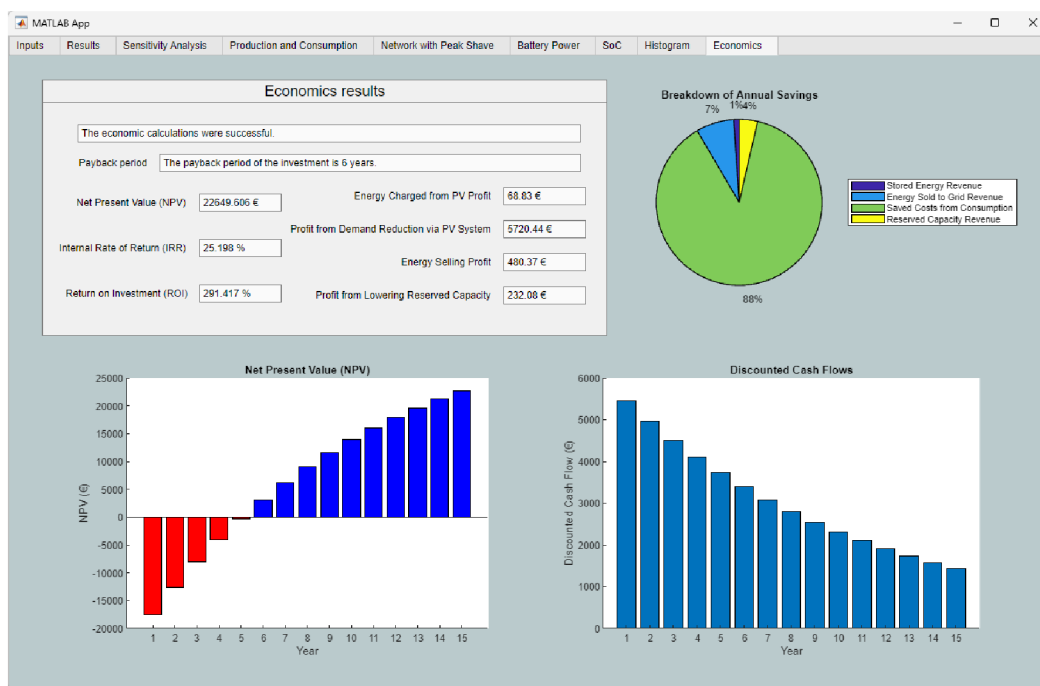
3.9.10 Karta s výsledkami ekonomickej analýzy

Karta „Economics“ obsahuje údaje o výsledkoch ekonomickej analýzy. V textovom poli sa vypíše informácia o úspešnom výpočte ekonomickej analýzy. V prípade voľby kratšieho obdobia ako je jeden rok, nie je ekonomická analýza počítaná. V tomto prípade sa objaví hlásenie o zadaní potrebného časového intervalu pre výpočet ekonomickej analýzy. Na tomto paneli sa ďalej nachádza informácia o dobe návratnosti investície a ekonomických ukazovateľoch NPV, IRR a ROI, ktoré sú popísané v kapitole 3.1.5.

V ďalších editačných poliach sú vypísané výsledky jednotlivých úspor, ktoré vzniknú inštaláciou fotovoltaickej elektrárne a batériového úložiska. Výsledné hodnoty reprezentujú ročnú úsporu. Vypočítaná je úspora, ktorá vznikne nabíjaním batériového úložiska z fotovoltaickej elektrárne, čím sa zníži potreba odberu energie z distribučnej siete. Ďalší profit vzniká tým, že fotovoltaická elektráreň sa priamo podieľa na znížení spotreby objektu a znižovaní celkového výkonu systému. Ak fotovoltaická elektráreň dokáže vyprodukovať dostatočné množstvo elektrickej energie, predáva sa tento prebytok do distribučnej siete. V poslednom poli je zobrazená úspora, ktorá vznikne znížením rezervovanej kapacity objektu.

Na tejto karte sa nachádzajú aj grafické zobrazenia výstupov ekonomickej analýzy. Jedným z nich je vývoj čistej súčasnej hodnoty v čase. Ak dôjde k návratnosti investície

je možné vidieť v akom roku. Ďalším grafickým zobrazením je hodnota diskontovaného peňažného toku v čase. Jednotlivé úspory, ktoré vznikli inštalovaním batériového úložiska alebo fotovoltajickej elektrárne sú zobrazené v koláčovom grafe s podielom na celkovej úspore v percentách.



Obrázok 37: Karta s výsledkami ekonomickej analýzy

3.10 Systémové požiadavky na spustenie aplikácie

Na zabezpečenie spustenia vyvinutej aplikácie pomocou MATLAB App Designer je potrebná inštalácia programu MATLAB Runtime. MATLAB Runtime je kolekcia zdieľaných knižníc, kódu MATLABu a ďalších súborov, ktoré umožňujú spúšťanie skompilovaných aplikácií na systémoch bez nainštalovanej verzie MATLAB. Koncoví používatelia, ktorí chcú spustiť túto aplikáciu, musia nainštalovať MATLAB Runtime alebo zadať umiestnenie sieťovej inštalácie. Inštalácia programu MATLAB Runtime sa spustí kliknutím na ikonu. Aplikáciu je možné spustiť na platformách Windows, Linux a macOS. Presný postup inštalácie aplikácie MATLAB Runtime pre jednotlivé platformy je popísaný na stránke <https://www.mathworks.com/help/compiler/install-the-matlab-runtime.html> [34].

Pre správnu funkciu aplikácie a počítanie výkonu solárnej energie pre konkrétne územie, teda komunikáciu so serverom PVGIS je potrebné, aby zariadenie, na ktorom je spustená aplikácia bolo pripojené k stabilnému internetovému pripojeniu.

Keďže aplikácia bola kompilovaná vo verzii MATLAB 2022b, jej systémové požiadavky sú:

Tabuľka 8: Systémové požiadavky na spustenie MATLAB Runtime pre Windows [35]

Názov	Špecifikácia
Operačný systém	Windows 11, Windows 10 (verzia 20H2 alebo vyššia) Windows Server 2019 Windows Server 2022
Processor	Minimum: Intel alebo AMD x86–64 procesor so štyrmi logickými jadrami a AVX2
RAM	Minimum: 4 GB Odporúčané: 8 GB Pre Polyspace sa odporúča 4 GB na jadro
Disk	4.0 GB a viac
Grafika	Nevyžaduje sa žiadna špecifická grafická karta, ale odporúča sa hardvérovo akcelerovaná grafická karta podporujúca OpenGL 3.3 s 1 GB pamäte GPU

Tabuľka 9: Systémové požiadavky na spustenie MATLAB Runtime pre Linux [36]

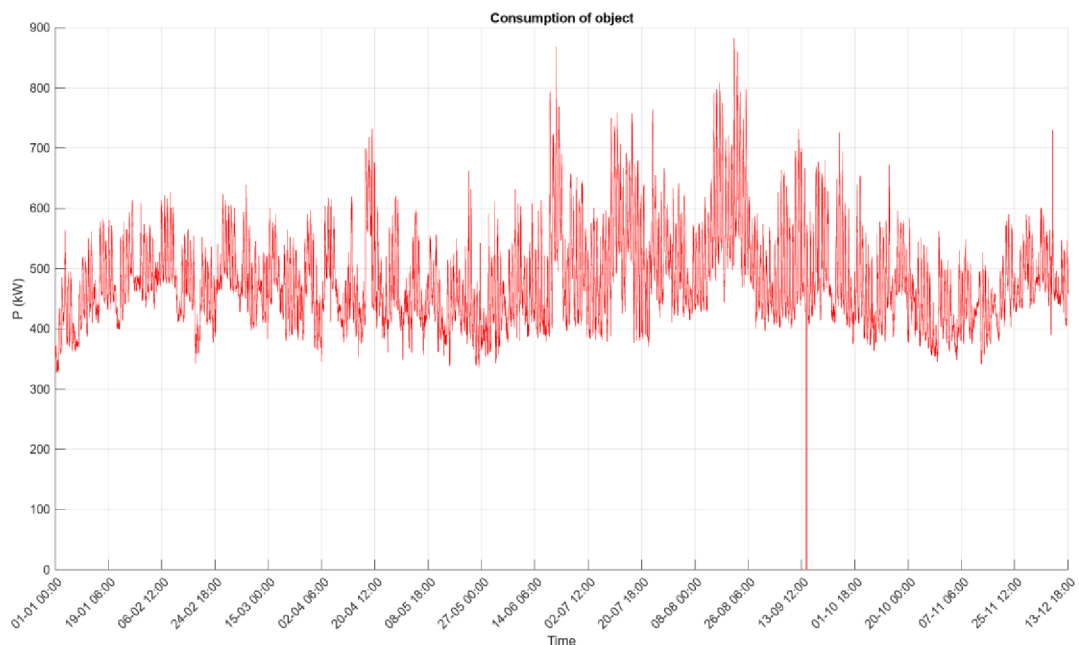
Názov	Špecifikácia
Distribúcia	Ubuntu 22.04 LTS, Ubuntu 20.04 LTS, Ubuntu 18.04 LTS Debian 11, Debian 10 Red Hat Enterprise Linux 9, Red Hat Enterprise Linux 8 (minimum 8.4), Red Hat Enterprise Linux 7 (minimum 7.9) SUSE Linux Enterprise Desktop 15, SUSE Linux Enterprise Server 12 (minimum SP2), SUSE Linux Enterprise Server 15
Processor	Minimum: Intel alebo AMD x86-64 procesor so štyrmi logickými jadrami a AVX2
RAM	Minimum: 4 GB Odporúčané: 8 GB Pre Polyspace sa odporúča 4 GB na jadro
Disk	4.0 GB a viac
Grafika	Nevyžaduje sa žiadna špecifická grafická karta, ale odporúča sa hardvérovo akcelerovaná grafická karta podporujúca OpenGL 3.3 s 1 GB pamäte GPU

Tabuľka 10: Systémové požiadavky na spustenie MATLAB Runtime pre Mac [37]

Názov	Špecifikácia
Operačný systém	macOS Ventura (13), macOS Monterey (12), macOS Big Sur (11.6)
Procesor	<p>Intel: Minimum: Intel x86-64 procesor Odporúčané: Intel x86-64 procesor so štyrmi logickými jadrami a AVX2</p> <p>Apple Silicon: Minimum: M-series chip Poznámka: Na počítačoch Apple Silicon Mac beží MATLAB pomocou Rosetta 2</p>
RAM	<p>Minimum: 4 GB Odporúčané: 8 GB Pre Polyspace sa odporúča 4 GB na jadro</p>
Disk	4.0 GB a viac
Grafika	<p>Každý Mac, na ktorom je možné spustiť macOS Big Sur, má GPU, ktorý dokáže spustiť MATLAB. Akcelerácia GPU pomocou Parallel Computing Toolbox nie je dostupná v systéme macOS</p>

4. PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA

Táto kapitola je zameraná na prípadovú štúdiu, ktorá bola vykonaná za účelom verifikácie navrhnutého riešenia a zároveň na prezentáciu funkčnosti vyvinutej aplikácie. Prípadová štúdia je rozdelená na dve časti. Prvou časťou je simulácia objektu bez výroby z fotovoltaickej elektrárne a v druhej časti je pridaná fotovoltaická elektráreň. Pre prípadovú štúdiu bol zvolený priemyselný objekt, pre ktorý boli k dispozícii 15 minútové dáta o spotrebe za rok 2023. Ide o priemyselný objekt, ktorý je v prevádzke 6 dní v týždni a v nedeľu je vykonávaná údržba a kontrola systémov. K špičkovým zaťaženiám dochádza najčastejšie v pracovných hodinách od 7:00 do 18:00. V tomto prípade boli údaje o spotrebe skopírované do predpripraveného dokumentu ConsumptionData15min a v ňom zadaný rok simulácie 2023.



Obrázok 38: Profil spotreby priemyselného objektu v roku 2023

Z profilu spotreby priemyselného objektu je možné vidieť, že dochádza k špičkovým odberom niekoľkokrát za rok a spotreba objektu teda nie je rovnomerne rozložená počas celého roka. Priemyselný objekt je pripojený na prípojku vysokého napätia a nachádza sa v Juhomoravskom kraji, kde je prevádzkovateľom distribučnej sústavy EG.D, a. s. Tento objekt mal maximálny výkon počas sledovaného obdobia 882,844 kW a rezervovanú ročnú kapacitu 1 100 kW. Vzhľadom na vysokú hodnotu rezervovanej kapacity objektu k profilu spotreby, je po väčšinu roka rezerva k dosiahnutiu rezervovanej kapacity viac ako 50 %. Ceny za rezervovanú kapacitu jednotlivých prevádzkovateľov sú zobrazené v tabuľke 11. Tieto ceny sú z dôvodu zadávania hodnôt do aplikácie v € prepočítané z pôvodných Kč/MW/mesiac na €/MW/mesiac.

Tabuľka 11: Ceny za rezervovanú kapacitu prevádzkovateľa distribučnej sústavy [38]

Prevádzkovateľ distribučnej sústavy	Hladina napätia	Mesačná cena za ročnú rezervovanú kapacitu (€/MW/mesiac)	Mesačná cena za mesačnú rezervovanú kapacitu (€/MW/mesiac)
ČEZ Distribuce, a. s.	VVN	3 187,09	3 492,75
	VN	8 198,74	8 985,07
EG.D, a. s.	VVN	2 846,27	3 184,84
	VN	7 141,01	7 990,47
PREdistribuce, a. s.	VVN	3 277,6	3 627,83
	VN	8 106,34	8 972,70
UCED Chomutov s.r.o.	VN	8 644,61	9 589,44
SV servisní, s.r.o.	VN	7 585,48	8 192,33

Keďže mal objekt pôvodne ročnú tarifu za rezervovanú kapacitu s cenou 7 141,01 €/MW/mesiac, ročný poplatok bol 94 261,33 €. Cieľom inštalácie batériového úložiska je zmena tarifu z ročnej na mesačnú rezervovanú kapacitu a jej zníženie.

4.1 Zníženie rezervovanej kapacity inštaláciou batériového úložiska

Pre daný objekt bol zvolený batériový systém s parametrami zobrazenými v tabuľke 12. Tieto parametre boli zadané v aplikácii do panelu s názvom „Battery inputs“.

Tabuľka 12: Parametre zvoleného batériového úložiska zadané do programu

Názov	Špecifikácia
Kapacita	204 kWh
C-rate	0,98
Výkon batérie	199,92 kW
Maximálny stav nabitia	100 %
Minimálny stav nabitia	20 %
Hĺbka vybitia	80 %
Stratégia nabíjania	Priebežné nabíjanie

K dispozícii sú dáta o spotrebe pre celý rok, čím je možné vypočítať aj ekonomickú analýzu. Pre výpočet ekonomickej analýzy bol v programe nastavený interval simulácie od 01/01-00:00 do 31/12-23:45 pre rok 2023. Vstupné údaje pre výpočet ekonomickej analýzy boli zadané do panelu s názvom „Economics inputs“. Pri investičných nákladoch na batériové úložisko sa vychádzalo z niekoľkých štúdií, ktoré sa zaoberali cenami

batériových úložísk. Z týchto údajov bola vybraná priemerná hodnota a k nej pripočítaných 50 %, ako ďalšie náklady na systémy a inštaláciu. Odhadované investičné náklady na batériové úložisko sú teda 711,75 €/kWh. Pre určenie nákladov na ročnú údržbu bola zvolená cena 10,25 €/kW.

Tabuľka 13: Prehľad investičných nákladov batériových úložísk

Položka	Cena	Zdroj
Investičné náklady na batériové úložisko	575 €/kWh	[4]
	450 €/kWh	[39]
	370 €/kWh	[40]
	503 €/kWh	[41]
Ročné náklady na údržbu	10 €/kW	[41]
	7-14 €/kW	[40]

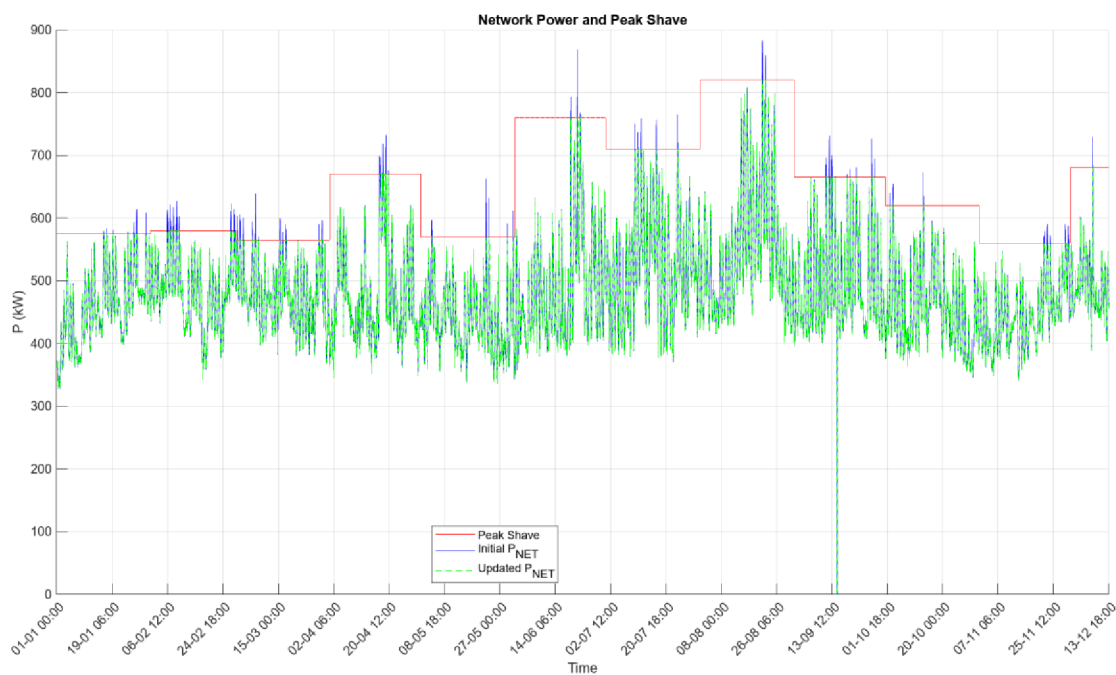
Tabuľka 14: Ekonomické vstupy pre výpočet ekonomickej analýzy

Položka	Cena
Investičné náklady na batériové úložisko	145 197 €
Náklady na údržbu	2 049,18 €/rok
Náklady na pôvodnú rezervovanú kapacitu	7,141 €/kW
Náklady na novú rezervovanú kapacitu	7,990 €/kW
Životnosť batérie	15 rokov
Diskontná sadzba	4,25 %

Po inštalácii batériového úložiska bolo možné znížiť veľkosť mesačnej rezervovanej kapacity. Tieto hodnoty sú zvolené tak, aby batériové úložisko dokázalo pokryť dodávku špičkového zaťaženia. Táto konfigurácia teda zabezpečuje dodávku elektrickej energie pre pokrytie špičkového zaťaženia. Citlivostná analýza pre zadané parametre bola nastavená na 70 %, 85 %, 115 % a 130 %. Z nej vyšlo, že batériové úložisko s nižšou kapacitou 173,4 kWh by nevyhovelo nastavenej konfigurácii z dôvodu nedostatočnej kapacity a dosiahnutia minimálneho stavu nabitia. V tomto prípade by nebola zabezpečená dodávka špičkového zaťaženia úložiskom nad hodnotou rezervovanej kapacity.

Tabuľka 15: Prehľad nových hodnôt mesačnej rezervovanej kapacity

Mesiac	Rezervovaná kapacita (kW)
Január	575
Február	580
Marec	565
Apríl	670
Máj	570
Jún	760
Júl	710
August	820
September	665
Október	620
November	560
December	680

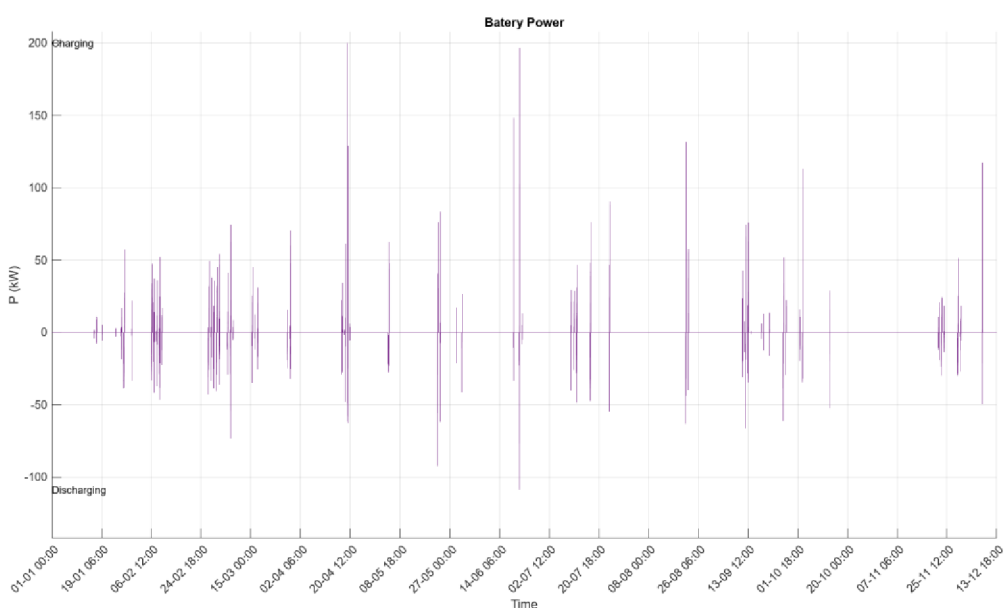


Obrázok 39: Výkon objektu v čase po znížení rezervovanej kapacity a inštalácii batériového úložiska

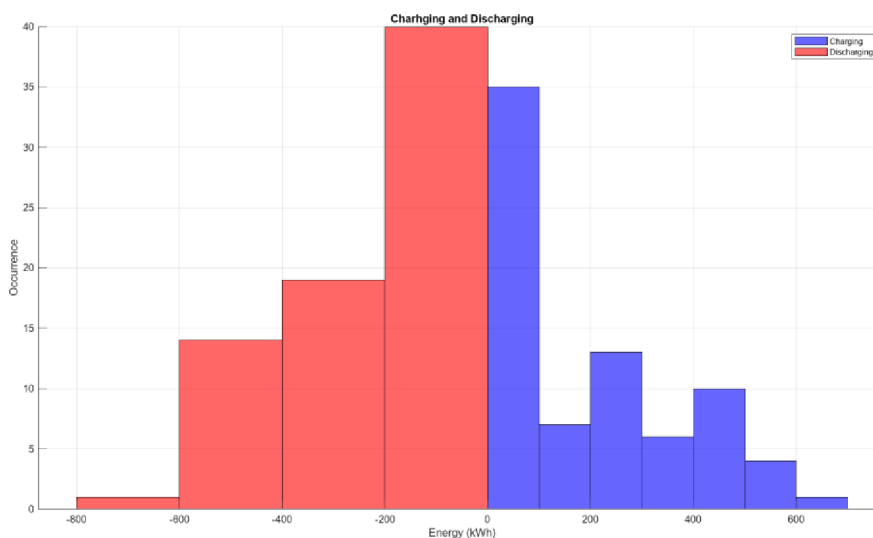
V nasledujúcej tabuľke 16 sú vypísané energetické bilancie pre daný objekt za simulované obdobie. Z nich je možné vidieť, že batériové úložisko pokrylo potrebnú energiu špičkového zaťaženia a zvolená kapacita bola dostatočná.

Tabuľka 16: Výpis energetických bilancií za simulované obdobie

Názov	Špecifikácia
Spotrebovaná energia	4 179 044,066 kWh
Energia systému	4 179 044,066 kWh
Energia potrebná na pokrytie špičkového zaťaženia	3 623,997 kWh
Energia potrebná počas najväčšej špičky	153,586 kWh
Energia vybitá z batériového úložiska	3 623,997 kWh

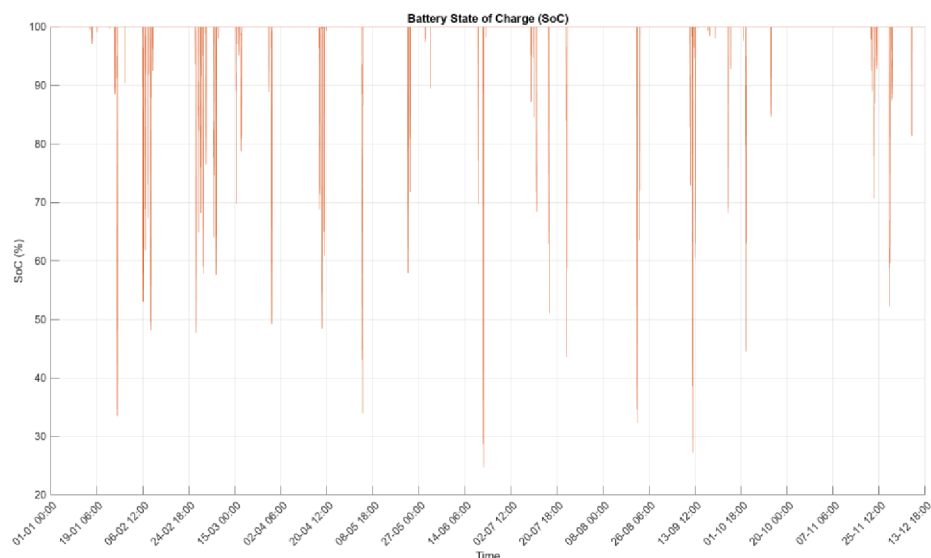


Obrázok 40: Priebeh výkonu batériového úložiska v čase



Obrázok 41: Histogram nabíjania a vybíjania batériového úložiska

Počas simulovaného obdobia nastalo klesnutie stavu nabitia batérie pod 30 % dvakrát. Najnižší stav nabitia nastal 21. júna o 15:00, kedy hodnota klesla na 24,713 % a 12. septembra o 15:15, kedy hodnota bola 27,342 %. Voľbou vyššej kapacity batérového úložiska by sa zabezpečila väčšia rezerva v čase neočakávaných špičiek zaťaženia.

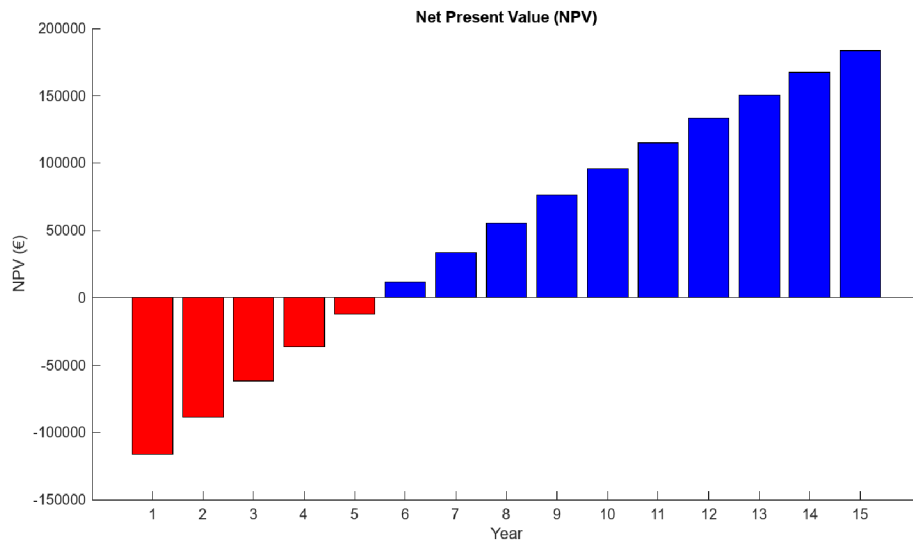


Obrázok 42: Pribeh stavu nabitia batérového úložiska v čase

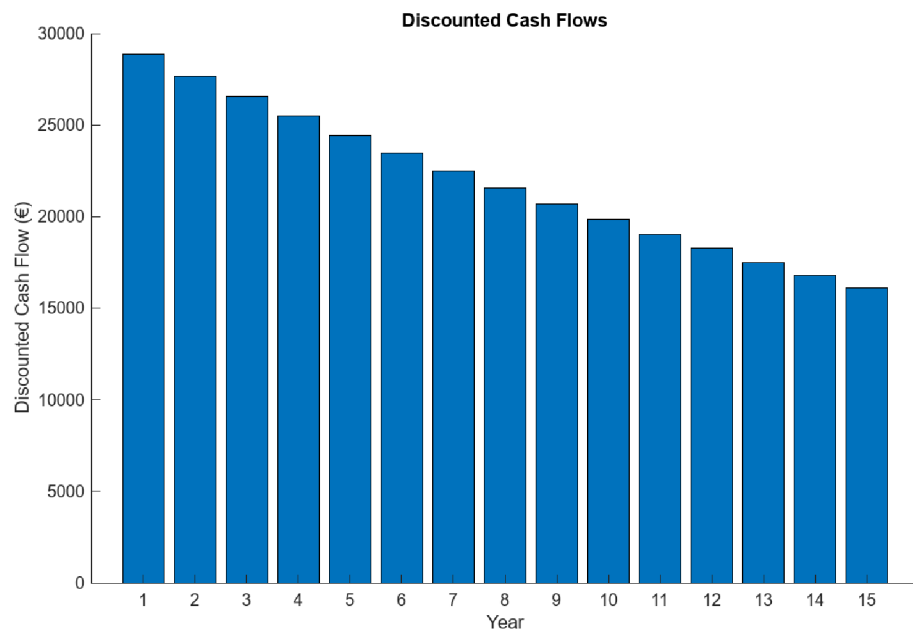
Investíciou do batérového úložiska a jeho následnou inštaláciou pre daný priemyselný objekt došlo k zníženiu a zmene rezervovanej kapacity z ročnej na mesačnú. Aj napriek vyššiemu mesačnému poplatku za mesačnú rezervovanú kapacitu sa celkové ročné náklady znížili na 32 138,95 €. Táto investícia sa na základe ekonomickej analýzy uvažuje ako výhodná a jednotlivé výsledky a úspory sú vypísané v tabuľke 17 a zobrazené na obrázkoch 43 a 44.

Tabuľka 17: Výsledky ekonomickej analýzy

Názov	Špecifikácia
Doba návratnosti	6 rokov
Čistá súčasná hodnota (NPV)	183 579,553 €
Vnútoraná miera návratnosti (IRR)	19.245 %
Návratnosť investície (ROI)	210,851 %
Profit zo zníženia rezervovanej kapacity	32 138,95 €/rok



Obrázok 43: Vývoj čistej súčasnej hodnoty v čase



Obrázok 44: Diskontovaný peňažný tok v čase

4.2 Zníženie rezervovanej kapacity inštaláciou batériového úložiska a fotovoltaickej elektrárne

V druhej časti prípadovej štúdie bola prevedená simulácia s pridaním výroby elektrickej energie z fotovoltaickej elektrárne s inštalovaným výkonom 35 kWp. Pridaním fotovoltaickej elektrárne bolo potrebné zadať ďalšie vstupné údaje. Do panelu „Photovoltaics inputs“ bola zadaná lokalizácia elektrárne a jej technické parametre.

Tabuľka 18: Vstupné údaje o fotovoltaickej elektrárni

Parameter	Špecifikácia
Zemepisná šírka	49,2332 °
Zemepisná dĺžka	16,5748 °
Inštalovaný výkon	35 kWp
Straty systému	10 %
Technológia	Kryštalický kremík
Uhol sklonu	35 °
Azimut	0 °

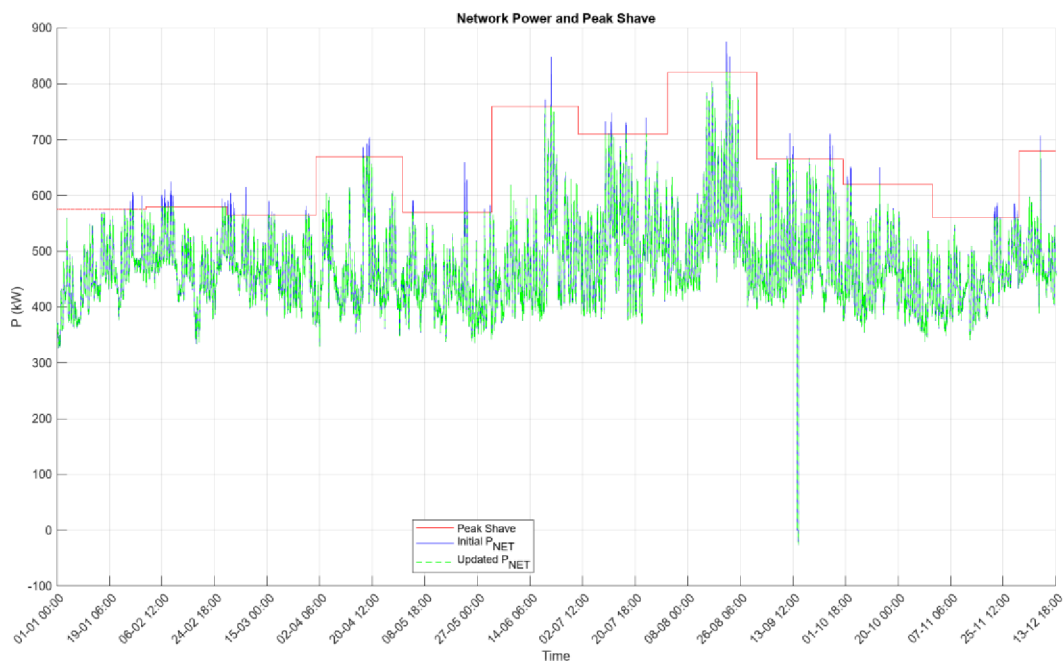
Prostredníctvom citlivostnej analýzy bolo zistené, že by pre danú konfiguráciu vyhovelo aj batériové úložisko s kapacitou 142,8 kWh, čo predstavuje 70 % z pôvodnej kapacity. Znížením tejto kapacity sa znížili aj investičné a prevádzkové náklady.

Ďalším vstupom boli investičné náklady a náklady na údržbu fotovoltaickej elektrárne. Podľa [41] a [42] boli určené priemerné investičné náklady na 1 775 €/kW a náklady na údržbu 16,92 €/kW.

Poslednými upravenými parametrami sú maximálna a minimálna hodnota stavu nabitia batériového úložiska. Maximálna hodnota bola znížená na 90 % z dôvodu nabitia prebytočnej energie z fotovoltaickej elektrárne. Pre zachovanie rovnakej hĺbky vybitia batériového úložiska 80 %, bola upravená hodnota minimálneho stavu nabitia na 10 %.

Tabuľka 19: Ekonomické vstupy pre výpočet ekonomickej analýzy

Položka	Cena
Investičné náklady na batériové úložisko	101 637,9 €
Investičné náklady na fotovoltaickú elektráreň	62 125 €
Náklady na údržbu	2 026,626 €/rok
Náklady na nákup elektrickej energie	0.13 €/kWh
Náklady na pôvodnú rezervovanú kapacitu	7,141 €/kW
Náklady na novú rezervovanú kapacitu	7,990 €/kW
Životnosť batérie	15 rokov
Diskontná sadzba	4,25 %

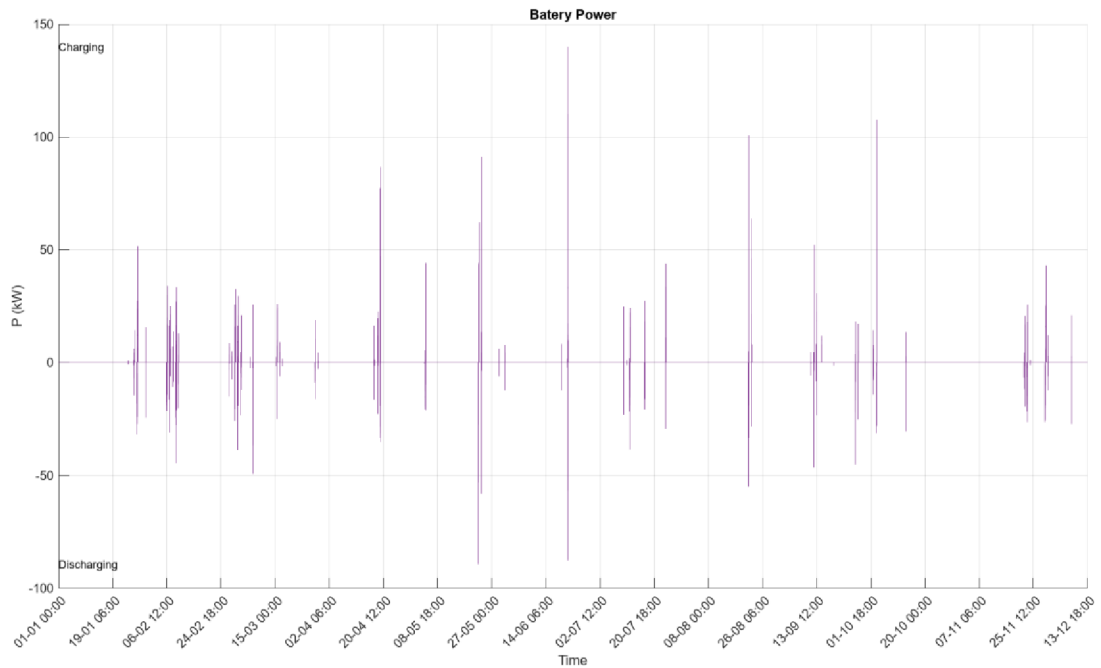


Obrázok 45: Výkon objektu v čase po inštalácii fotovoltaickej elektrárne a batériového úložiska s nižšou kapacitou

Z energetických bilancii je vidieť, že došlo k zníženiu celkovej energie systému ako aj energie potrebnej k vybitiu a batériové úložisko dokázalo pokryť dodávku špičkového odberu. Keďže išlo o fotovoltaickú elektráreň s malým výkonom, bolo možné nabiť do batériového systému len 14,28 kWh za celé sledované obdobie.

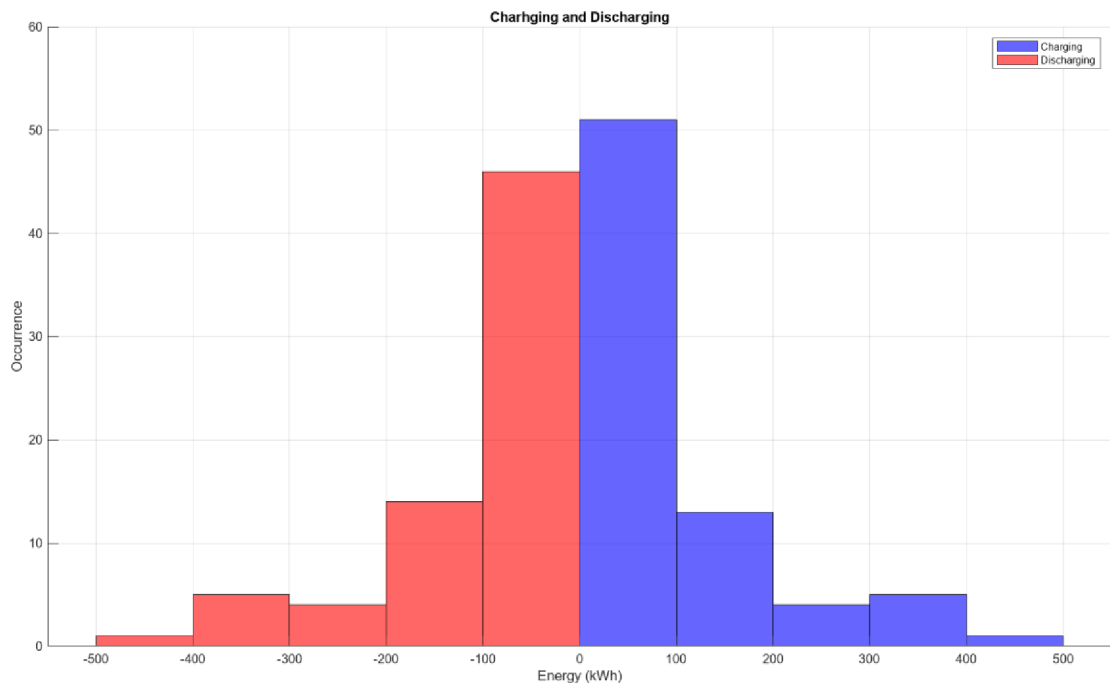
Tabuľka 20: Výpis energetických bilancii za simulované obdobie

Názov	Špecifikácia
Vyrobená energia	42 512,458 kWh
Spotrebovaná energia	4 179 044,066 kWh
Energia systému	4 136 531,608 kWh
Energia potrebná na pokrytie špičkového zaťaženia	1 588,233 kWh
Energia potrebná počas najväčšej špičky	105,543 kWh
Energia vybitá z batériového úložiska	1 588,233 kWh
Prebytok energie nabitej do úložiska	14,280 kWh



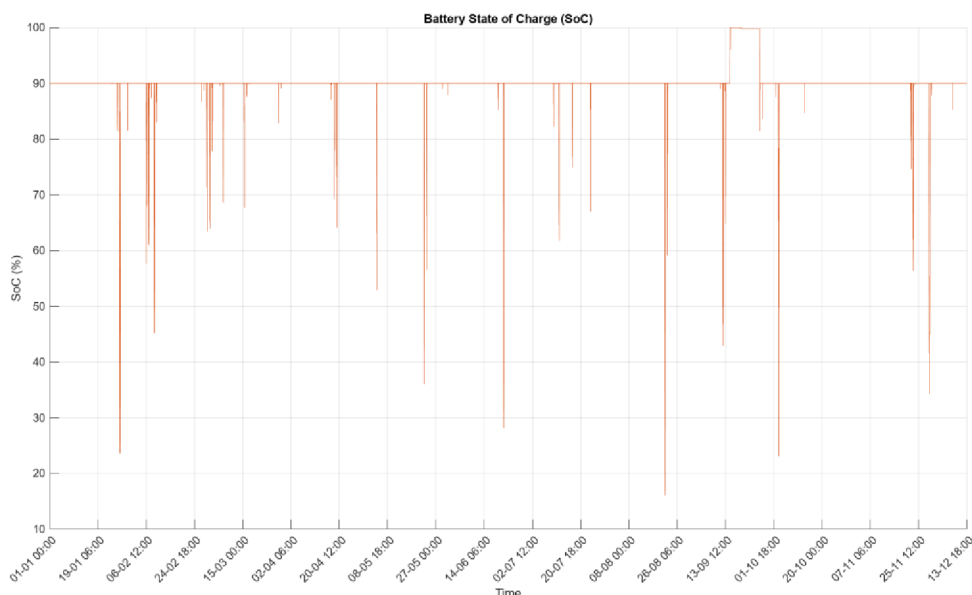
Obrázok 46: Priebeh výkonu batériového úložiska v čase

Z priebehu výkonu batériového úložiska a histogramu je vidieť, že nebolo potrebné nabíjať a vybíjať také množstvo energie ako v scenári bez fotovoltaickej elektrárne. Znížil sa zároveň aj počet výskytov nabíjania a vybíjania úložiska.



Obrázok 47: Histogram nabíjania a vybíjania batériového úložiska

Na základe grafického zobrazenia stavu nabitia v čase je vidieť, že batériové úložisko nekleslo pod nastavenú hodnotu minimálneho stavu nabitia, teda 10 %. Najnižší stav nabitia nastal 21. augusta o 13:45, kedy táto hodnota klesla na úroveň 16,09 %. K nabitiu prebytku energie z fotovoltaickej elektrárne nad maximálny stav nabitia 90 % došlo len raz v roku a to v období výpadku dodávky z distribučnej siete.

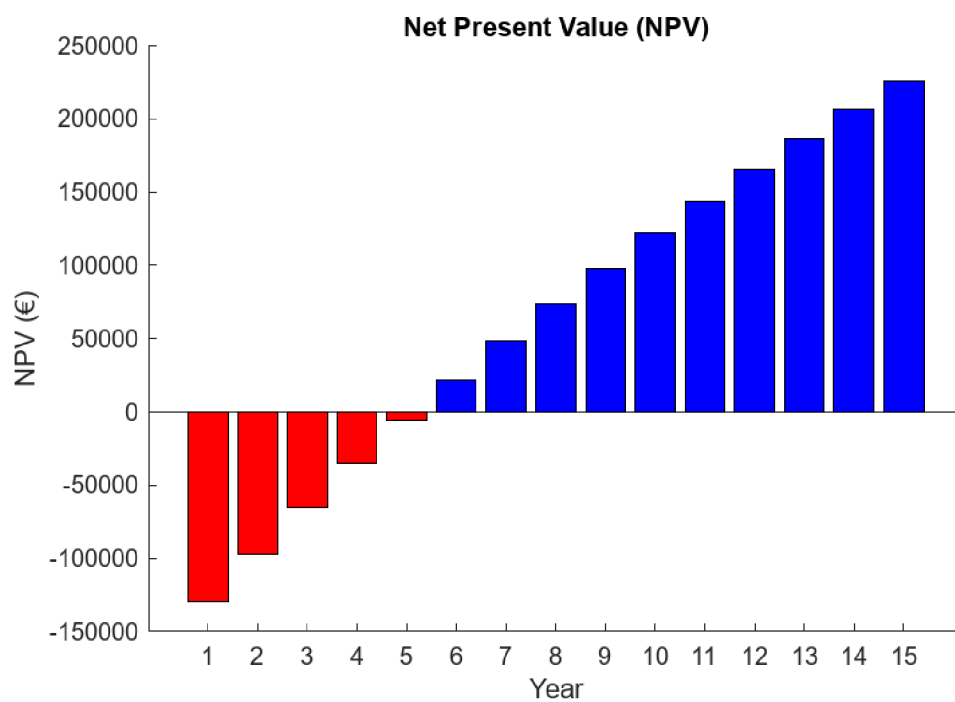


Obrázok 48: Priebeh stavu nabitia batériového úložiska v čase

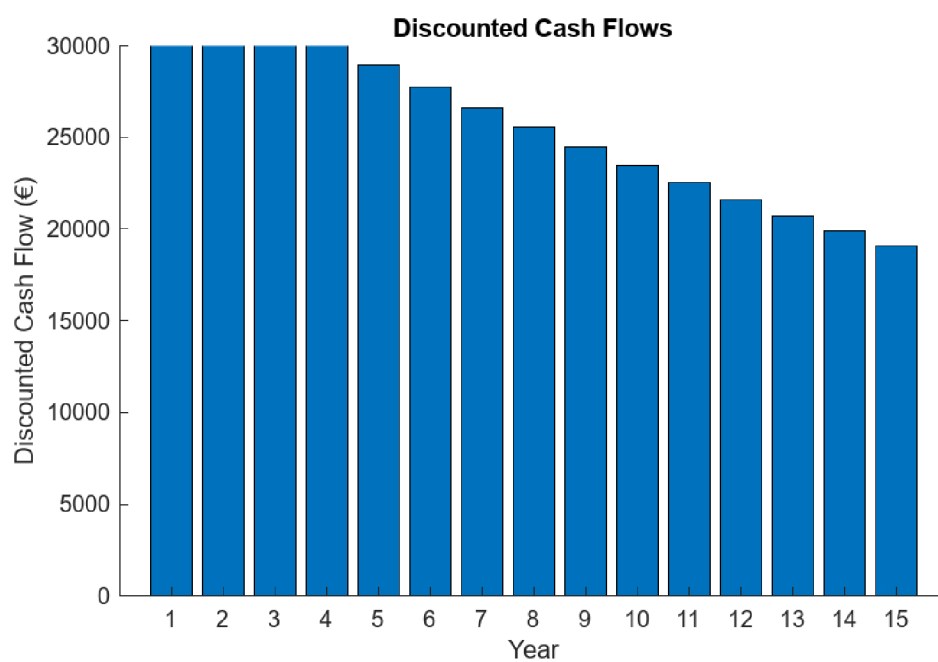
Z výsledkov ekonomickej analýzy pre verziu s fotovoltaickou elektrárnou je vidieť, že doba návratnosti je 6 rokov. Návratnosť investície je však vyššia oproti scenáru, kde sa uvažovala len inštalácia batériového úložiska. Keďže nedošlo k zmene rezervovanej kapacity oproti stavu bez fotovoltaickej elektrárne, nezmenili sa ani úspory za jej zníženie. Pribudli úspory, ktoré vznikli znížením spotreby elektrickej energie systému. Táto úspora bola dosiahnutá dodávaním energie z fotovoltaickej elektrárne priamo do objektu. Ročná úspora znížením odberu elektrickej energie zo siete bola 5 517,73 €. Nabíjaním prebytku elektrickej energie z výroby do batériového úložiska by sa v tomto prípade ušetrilo len 1,86 € ročne. Podrobné výsledky ekonomickej analýzy sú zobrazené v tabuľke 21 a na obrázkoch 49 a 50.

Tabuľka 21: Výsledky ekonomickej analýzy s fotovoltaickou elektrárnou

Názov	Špecifikácia
Doba návratnosti	6 rokov
Čistá súčasná hodnota (NPV)	225 570,151 €
Vnútoraná miera návratnosti (IRR)	20,418 %
Návratnosť investície (ROI)	226,374 %
Profit zo zníženia rezervovanej kapacity	32 138,95 €/rok
Profit nabíjania z PV	1,86 €/rok
Profit zo zníženia spotreby systému	5 517,73 €/rok



Obrázok 49: Vývoj čistej súčasnej hodnoty v čase



Obrázok 50: Diskontovaný peňažný tok v čase

ZÁVER

Diplomová práca sa zaoberá tvorbou aplikácie na optimalizáciu batériového úložiska pre priemyselný objekt s možnosťou integrácie obnoviteľných zdrojov v podobe fotovoltajickej elektrárne. Aplikácia sa primárne zameriava na orezávanie špičkovej spotreby a zmeny rezervovanej kapacity objektu. Prostredníctvom simulácie je možné optimalizovať veľkosť batériového úložiska s cieľom zníženia rezervovanej kapacity.

V prvej kapitole diplomovej práce sú zmapované technológie akumulácie energie so zameraním na elektrochemickú akumuláciu prostredníctvom batériových úložísk. Popísané sú dôležité parametre, ktoré boli následne využité pri výbere vhodného batériového úložiska a návrhu aplikácie. Táto kapitola je zameraná na popis jednotlivých druhov batériových akumuláčnych systémov a ich technológie. Medzi tieto technológie patria lítium-iónové, olovené, vysokoteplotné, niklové a prietokové batériové úložiská. Pre jednotlivé druhy batériových systémov je popísaný ich základný princíp funkčnosti, parametre, výhody a nevýhody.

Druhá kapitola diplomovej práce je zameraná na možnosti využitia batériových systémov v priemysle, so zameraním na stacionárne aplikácie. Jednotlivé služby, ktoré je možné poskytovať batériovým úložiskom sú rozdelené do piatich hlavných kategórií. Medzi tieto kategórie patria služby podpory výroby a ukladania energie, podporné služby, služby na podporu prenosovej infraštruktúry, služby na podporu distribučnej infraštruktúry a služby energetického manažmentu zákazníkov.

Tretia kapitola sa zaoberá algoritmicizáciou navrhnutého riešenia pre návrh batériového úložiska a tvorbou aplikácie. Aplikácia je vytvorená pomocou programu MATLAB App Designer a verziou MATLAB 2022b. V tejto kapitole sú zároveň popísané vstupné údaje, potrebné pre simuláciu batériového úložiska. Aplikácia využíva normalizované typové diagramy dodávky, namerané dáta spotreby priemyselného objektu a údaje o výrobe fotovoltajickej elektrárne z PVGIS prostredníctvom aplikačného programovacieho rozhrania. V aplikácii sú simulované energetické toky a bilancie daného systému, ktorých hodnoty sú vypísané a vykreslené pomocou grafického užívateľského rozhrania. Aplikácia zároveň počíta aj ekonomickú a citlivostnú analýzu. Na základe týchto výsledkov je možné zvoliť optimálnu veľkosť batériového úložiska.

Vo štvrtej kapitole je vypracovaná prípadová štúdia, ktorá má verifikovať funkčnosť aplikácie a prínosy navrhnutého softvérového riešenia. Pre prípadovú štúdiu bol zvolený priemyselný objekt s nameranými 15 minútovými údajmi o spotrebe. Tento objekt mal pôvodne ročnú rezervovanú kapacitu a cieľom simulácie bola zmena rezervovanej kapacity na mesačnú a zároveň aj jej zníženie. Prípadová štúdia je vypracovaná pre dva scenáre. Pre prvý scenár je uvažovaná len investícia do batériového úložiska. Znížením rezervovanej kapacity objektu vyšla návratnosť 210,851 % za celú dobu životnosti úložiska, ktorá bola uvažovaná na 15 rokov. Doba návratnosti by bola v tomto prípade v šiestom roku. Ročné úspory znížením rezervovanej kapacity by boli 32 138,95 €.

V druhom scenári bola k batériovému úložisku pridaná fotovoltaická elektrárň. Prostredníctvom citlivostnej analýzy bolo zistené, že inštaláciou fotovoltaickej elektrárne sa zníži celkový výkon a spotreba objektu, čím by bolo možné aj zníženie kapacity batériového úložiska. Pri nezmenených hodnotách rezervovanej kapacity a aktualizovaných investičných nákladoch do batériového úložiska a fotovoltaickej elektrárne vyšla návratnosť investície 226,374 % za dobu životnosti batérie, ktorá bola opäť uvažovaná na 15 rokov. Doba návratnosti by v tomto prípade bola tiež v priebehu šiestich rokov.

Na základe prípadovej štúdie bola overená funkčnosť aplikácie. Táto aplikácia slúži ako vhodný nástroj pre určenie optimálnej veľkosti batériového úložiska s cieľom zníženia rezervovanej kapacity objektu. Prostredníctvom simulácie sú používateľovi zobrazené dôležité informácie o spotrebe objektu a výrobe z fotovoltaickej elektrárne. Tieto údaje je možné zobrazit' pomocou grafických závislostí. Pomocou ekonomickej analýzy môže používateľ posúdiť investíciu do batériového úložiska a fotovoltaickej elektrárne.

Po preskúmaní danej problematiky a navrhnutí aplikácie je ďalším možným pokračovaním tejto práce rozšírenie aplikácie. Aplikáciu by bolo možné rozšíriť o ďalšie z možností využitia batériového úložiska alebo stratégie nabíjania, z ktorých by mal používateľ na výber. Ďalším vylepšením je možné využitie predikčných modelov a umelej inteligencie na určovanie výroby z fotovoltaickej elektrárne a spotreby priemyselného objektu.

LITERATÚRA

- [1] ALEM KEBEDE, Abraham; KALOGIANNIS, Theodoros; VAN MIERLO, Joeri a BERECIBAR, Maitane. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022, roč. 2022, č. 159. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122001368?via%3Dihub>. [cit. 2023-11-20].
- [2] ABDI, Hamdi; MOHAMMADI-IVATLOO, Behnam; JAVADI, Saeid; REZA KHODAEI, Amir a DEHNAVI, Ehsan. Energy Storage System. Online. *Distributed Generation Systems*. 2017, s. 333-368. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804208-3.00007-8>. [cit. 2023-12-02].
- [3] DATTA, Ujjwal; KALAM, Akhtar a SHI, Juan. A review of key functionalities of battery energy storagesystem in renewable energy integrated power systems. Online. *Energy Storage*. 2020, roč. 3, č. 5. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/est2.224>. [cit. 2023-12-02].
- [4] ELECTRICITY STORAGE AND RENEWABLES: COSTS AND MARKETS TO 2030. Online. *International Renewable Energy Agency*. 2017, roč. 2017. Dostupné z: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf. [cit. 2023-11-22].
- [5] *Energy Storage: Key Metrics for Success*. Online. Greentech Renewables. 2018. Dostupné z: <https://www.greentechrenewables.com/article/energy-storage-key-metrics-success>. [cit. 2023-11-20].
- [6] *Key Metrics and Definitions for Energy Storage*. Online. Dutton Institute. 2023. Dostupné z: <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/803>. [cit. 2023-11-20].
- [7] GHAFARI, Aliakbar; BAYAT, Vahid; AKBARI, Saieed a GHASEMI YEKLANGI, Akbar. Current and future prospects of Li-ion batteries: A review. Online. *Journal of NanoScience Technology*. 2023, roč. 2023, č. 8. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/372181951_Current_and_future_prospepts_of_Li-ion_batteries_A_review. [cit. 2023-11-20].
- [8] STAN, Ana-Irina; SWIERCZYNSKI, Maciej; STROE, Daniel-Ioan; TEODORESCU, Remus a ANDREASEN, Søren Juhl. Lithium ion battery chemistries from renewable energy storage to automotive and back-up power applications — An overview. Online. *International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*. 2014, roč. 2014. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2014.6850936>. [cit. 2023-11-20].
- [9] Lithium-Ion Battery. Online. *Electrochemical Energy Storage*. 2023, roč. 2023. Dostupné z: <https://ease-storage.eu/energy-storage/technologies/>. [cit. 2023-11-20].

- [10] ZUBI, Ghassan; DUFO-LÓPEZ, Rodolfo; CARVALHO, Monica a PASAOGU, Guzey. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, roč. 2018, č. 89, s. 292-308. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-lithium-ion-battery%3A-State-of-the-art-and-Zubi-Dufo-L%C3%B3pez/ab76463cba756d36fbc38d0b7cc6647df106352e>. [cit. 2023-11-20].
- [11] ZHANG, Jianan; ZHANG, Lei; SUN, Fengchun a WANG, Zhenpo. An Overview on Thermal Safety Issues of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicle Application. Online. *Overview on Thermal Safety Issues of Lithium-ion Batteries*. 2018, roč. 2018. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2824838>. [cit. 2023-11-21].
- [12] BU-205: Types of Lithium-ion. Online. Battery university. 2021. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>. [cit. 2023-11-22].
- [13] VANGAPALLY, Naresh; TIRUPATHI, Rao Penki; ELIAS, Yuval; MUDULI, Sadananda; MADDUKURI, Satyanarayana et al. Lead-acid batteries and lead-carbon hybrid systems: A review. Online. *Journal of Power Sources*. 2023, roč. 2023, č. 579. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233312>. [cit. 2023-11-22].
- [14] Lead Acid Batteries. Online. Pveducation. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/lead-acid-batteries>. [cit. 2023-11-22].
- [15] Nickel-Cadmium Battery. Online. *Electrochemical Energy Storage*. 2023. Dostupné z: <https://ease-storage.eu/energy-storage/technologies/>. [cit. 2023-12-10].
- [16] Nickel-Metal Hydride Battery. Online. *Electrochemical Energy Storage*. 2023. Dostupné z: <https://ease-storage.eu/energy-storage/technologies/>. [cit. 2023-12-10].
- [17] SKYLLAS-KAZACOS, Maria; CHAKRABARTI, Mohammed H.; HAJIMOLANA, Yashar S.; MJALLI, Farouq Sabri a SALEEM, Mohsin. Progress in Flow Battery Research and Development. Online. *Journal of The Electrochemical Society*. 2011, roč. 2011, č. 8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1149/1.3599565>. [cit. 2023-11-23].
- [18] CREADY, Erin; LIPPERT, John; PIHL, Josh; WEINSTOCK, Irwin; SYMONS, Phillip et al. *Technical and Economic Feasibility of Applying Used EV Batteries in Stationary Applications*. Online. Roč. 2003. Dostupné z: <https://doi.org/10.2172/809607>. [cit. 2023-11-23].
- [19] Services to Support Generation and Services to Support Bulk Storage. Online. *Energy Storage Applications Forms*. 2020. Dostupné z: <https://ease-storage.eu/energy-storage/applications/>. [cit. 2023-11-23].

- [20] Ancillary Services. Online. *Energy Storage Applications Forms*. 2021. Dostupné z: <https://ease-storage.eu/energy-storage/applications/>. [cit. 2023-11-24].
- [21] FITZALDGER, Garrett; MANDEL, James a MORRIS, Jesse. *The Economics of Battery Energy Storage*. Online. 2015. Dostupné z: <https://rmi.org/insight/economics-battery-energy-storage/>. [cit. 2023-11-24].
- [22] Akhil, Abbas Ali, Huff, Georgianne, Currier, Aileen B., Kaun, Benjamin C, Rastler, Dan M., Chen, Stella Bingqing, Cotter, Andrew L., Bradshaw, Dale T., and Gauntlett, William D. *DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*. United States: N. p., 2015. Web. doi:10.2172/1170618. [cit. 2023-11-25].
- [23] OUDALOV, Alexandre; CHARTOUNI, Daniel; OHLER, Christian a LINHOFER, G. *Value Analysis of Battery Energy Storage Applications in Power Systems*. Online. In: . Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4076076>. [cit. 2024-05-12].
- [24] *Avoid high peak loads in heavy industry*. Online. INTILION. Dostupné z: <https://intilion.com/en/peak-shaving/>. [cit. 2024-05-12].
- [25] *Typový diagram odberu*. Online. VSIDS. 2023. Dostupné z: <https://www.vsids.sk/edso/domov/technicke-info/tdo>. [cit. 2023-12-11].
- [26] *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. Online. European Commission. 2023. Dostupné z: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en. [cit. 2023-12-11].
- [27] *PVGIS user manual*. Online. European Commision. Dostupné z: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual_en. [cit. 2024-05-07].
- [28] *Změna rezervované kapacity*. Online. PREDistribuce. 2024. Dostupné z: <https://www.predistribuce.cz/cs/potrebuji-zaridit/zakaznici/zmena-rezervovane-kapacity/>. [cit. 2024-05-07].
- [29] *Discount Rate*. Online. Corporate Finance Institute. Dostupné z: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/valuation/discount-rate/>. [cit. 2024-05-07].
- [30] *Net Present Value (NPV): What It Means and Steps to Calculate It*. Online. Investopedia. 2024. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/terms/n/npv.asp>. [cit. 2024-05-07].
- [31] *Internal Rate of Return (IRR): Formula and Examples*. Online. Investopedia. 2024. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/terms/i/irr.asp>. [cit. 2024-05-07].
- [32] *ROI: Return on Investment Meaning and Calculation Formulas*. Online. Investopedia. 2024. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/articles/basics/10/guide-to-calculating-roi.asp>. [cit. 2024-05-07].

- [33] *Payback Period Explained, With the Formula and How to Calculate It*. Online. Investopedia. 2024. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/terms/p/paybackperiod.asp>. [cit. 2024-05-07].
- [34] *Install and Configure MATLAB Runtime*. Online. MathWorks. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/compiler/install-the-matlab-runtime.html>. [cit. 2024-05-07].
- [35] *System Requirements – Release 2022b – Windows*. Online. MathWorks. 2023. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/support/sysreq/files/system-requirements-release-2022b-windows.pdf>. [cit. 2024-05-07].
- [36] *System Requirements – Release 2022b – Linux*. Online. MathWorks. 2023. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/support/sysreq/files/system-requirements-release-2022b-linux.pdf>. [cit. 2024-05-07].
- [37] *System Requirements – Release 2022b – Mac*. Online. MathWorks. 2023. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/support/sysreq/files/system-requirements-release-2022b-macintosh.pdf>. [cit. 2024-05-07].
- [38] *Energetický regulační věstník 7/2023: Energetický regulační úřad*. 2023, roč. 2023, č. 7. 2023.
- [39] Siraganyan, Karni & Perera, A.T.D. & Scartezzini, Jean-Louis & Mauree, Dasaraden. 2019. *Eco-Sim: A Parametric Tool to Evaluate the Environmental and Economic Feasibility of Decentralized Energy Systems*. *Energies*. 12. 776. 10.3390/en12050776.
- [40] MONGIRD, Kendall; VISWANATHAN, Vilayanur; ALAM, Jan; VARTANIAN, Charlie a SPRENKLE, Vincent. 2020 *Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment*. Online. In: 2020. Dostupné z: <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Final%20-%20ESGC%20Cost%20Performance%20Report%2012-11-2020.pdf>. [cit. 2024-05-10].
- [41] Brinsmead, Thomas & Graham, Paul & Hayward, Jennifer & Ratnam, Elizabeth & Reedman, Luke. Online. 2015 *Future energy storage trends: An assessment of the economic viability, potential uptake and impacts of electrical energy storage on the NEM 2015–2035*. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/282737404_Future_energy_storage_trends_An_assessment_of_the_economic_viability_potential_uptake_and_impacts_of_electrical_energy_storage_on_the_NEM_2015-2035#fullTextFileContent. [cit. 2024-05-10].

- [42] RAMASAMY, Vignesh; FELDMAN, David; DESAI, Jal a MARGOLIS, Robert. *U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks: Q1 2021*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/80694.pdf>. [cit. 2024-05-11].

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbols:

C	kapacita	(Wh)
C_0	kapacita pri plnom nabití	(Wh)
C_{rate}	C-rate batérie	(-)
CF_t	peňažný tok v časovom období	(€)
DoD	hĺbka vybitia	(%)
i	diskontná sadzba	(%)
IN	celková počiatočná investícia	(€)
IRR	vnútorná miera návratnosti	(%)
$MaxSoC$	maximálny stav nabitia	(%)
$MinSoC$	minimálny stav nabitia	(%)
n	počet časových období	(-)
NPV	čistá súčasná hodnota	(€)
P_{BAT}	výkon batérie	(W)
P_{LOAD}	výkon spotreby objektu	(W)
P_{NET}	výkon systému	(W)
$P_{NET_UPDATED}$	aktualizovaný výkon systému	(W)
P_{PS}	referenčný výkon orezávania špičiek	(W)
P_{PV}	výkon výroby fotovoltaickej elektrárne	(W)
ROI	návratnosť investície	(%)
SoC	stav nabitia	(%)
t	časové obdobie	(rok)

Skratky:

DoD	Depth of discharge (hĺbka vybitia)
FCR	Frequency Control Reserve (primárna regulácia frekvencie)
FRR	Frequency Restoration Reserve (proces obnovenia frekvencie a výkonovej rovnováhy)
IRR	Internal Rate of Return (vnútorná miera návratnosti)
LCO	Lithium Cobalt Oxide
LFP	Lithium Iron Phosphate
LMO	Lithium Manganese Oxide
LTO	Lithium Titanium Oxide
NCA	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide
NMC	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide
nn	Nízke napätie

NPV	Net Present Value (čistá súčasná hodnota)
OTE	Operátor trhu s elektrinou
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System (fotovoltaický geografický informačný systém)
RR	Replacement Reserve (proces náhrady záloh)
ROI	Return on Investment (návratnosť investície)
SoC	State of charge (stav nabitia)
TDD	Typový diagram dodávky
vn	Vysoké napätie
vvn	Veľmi vysoké napätie

ZOZNAM PRÍLOH

Elektronické prílohy sú uložené v súbore *Program.zip*

Súčasťou prílohy sú:

- Priečinko Runtime Installer
 - *MyAppInstaller_web MyAppInstaller_web.exe*
- Priečinko PSBattOp
 - *inštrukcie.txt*
 - *PSBattOp.exe*
 - *readme.txt*
 - *splash.png*
- Priečinko Consumption Data
 - *ConsumptionData15min.xlsx*
 - *ConsumptionData15min_LY.xlsx*
 - *ConsumptionData1hour.xlsx*
 - *ConsumptionData1hour_LY.xlsx*