

Česká zemědělská univerzita v Praze

Provozně ekonomická fakulta

Katedra systémového inženýrství



Bakalářská práce

Solární elektrárna z pohledu systémové dynamiky

Štěpán Maňhal

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Provozně ekonomická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Štěpán Maňhal

Systémové inženýrství

Název práce

Solární elektrárna z pohledu systémové dynamiky

Název anglicky

Solar power station from a system dynamics perspective

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je ekonomické vyhodnocení instalace malé solární elektrárny, která napájí rodinný dům. Simulační model sestavený na principech systémové dynamiky bude využit k analýze potenciálních scénářů vývoje elektrárny s důrazem na ekonomické indikátory.

Metodika

- Studium odborné literatury z oblasti systémové dynamiky
- Studium odborné literatury z oblasti fotovoltaiky
- Vytvoření smyčkového diagramu
- Vytvoření diagramu stavů a toků
- Testování simulačního modelu
- Tvorba a simulace scénářů
- Interpretace výsledků a diskuse

Doporučený rozsah práce

30-40 stran

Klíčová slova

Systémová dynamika, počítačová simulace, systémové archetypy, solární elektrárna, fotovoltaika

Doporučené zdroje informací

KREJČÍ, Igor; KVASNIČKA, Roman; ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. PROVOZNĚ EKONOMICKÁ FAKULTA. *Systémová dynamika I*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2014. ISBN 9788021324787.
LIBRA, Martin; POULEK, Vladislav. *Fotovoltaika : teorie i praxe využití solární energie*. Praha: ILSA, 2009. ISBN 978-80-904311-0-2.
MEADOWS, Donella H.; WRIGHT, Diana. *Thinking in systems : a primer*. White River Junction, Vt.: Chelsea Green Pub., 2008. ISBN 978-1-60358-055-7.
ŠUSTA, Marek. *Průvodce systémovým myšlením*. Praha: Proverbs, c2015. ISBN 978-80-260-7602-5

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – PEF

Vedoucí práce

Ing. Tereza Horáková, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra systémového inženýrství

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2024

doc. Ing. Tomáš Šubrt, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2024

doc. Ing. Tomáš Šubrt, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 03. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Solární elektrárna z pohledu systémové dynamiky" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 15.3 2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Tereze Horákové, Ph.D., Ing. Janu Rydvalovi, Ph.D. a doc. Ing. Igoru Krejčímu, Ph.D. za čas, ochotu a trpělivost, kterou mi při psaní práce věnovali. Během konzultací mi dokázali vždy vysvětlit všechny nejasnosti a nasměrovat mě správným směrem. Jsem vděčný za jejich pomoc, která byla bezpochyby nadstandardní.

Solární elektrárna z pohledu systémové dynamiky

Abstrakt

Bakalářská práce má za cíl ekonomické vyhodnocení instalace malé solární elektrárny, která napájí rodinný dům. K dosažení daného cíle bude použit simulační model sestavený na principech systémové dynamiky. Model následně bude využit k analýze potenciálních scénářů vývoje elektrárny s důrazem na ekonomické indikátory. Teoretická část obsahuje vývoj systémové dynamiky v průběhu času. Tato část popisuje principy a metody systémové dynamiky. Součástí této části je taky pohled do fotovoltaiky.

V druhé praktické části jsou popsány struktury systému elektrárny napájející rodinný dům a jeho jednotlivé hlavní elementy s využitím příčinně smyčkového diagramu. V diagramu jsou rozeznatelné zpětnovazebné smyčky, které mají vliv na celý systém. Diagram stavů a toků je tvořen za pomoci počítačového programu Vensim PLE a následně i daná simulace. Data použitá v modelu jsou brána z reálné solární elektrárny, která je používána v praxi.

Klíčová slova: systémová dynamika, počítačová simulace, systémové archetypy, solární elektrárna, fotovoltaika

Solar power plant from the perspective of system dynamics

Abstract

The bachelor thesis aims at the economic evaluation of the installation of a small solar power plant that powers a family house. In order to achieve this goal, a simulation model built on the principles of system dynamics will be used. The model will then be used to analyze potential scenarios for the development of the power plant with emphasis on economic indicators. The theoretical part includes the evolution of system dynamics over time. This section describes the principles and methods of system dynamics. This section also includes an insight into photovoltaics.

The second practical part describes the structure of the power plant system powering a single-family house and its main elements using a causal loop diagram. The diagram recognises feedback loops that affect the whole system. The state and flow diagram is created using the computer program Vensim PLE and then the given simulation. The data used in the model are taken from a real solar power plant that is used in practice.

Keywords: system dynamics, computer simulation, system archetypes, solar power plant, photovoltaics

Obsah

1 Úvod	11
2 Cíl a metodika práce.....	12
2.1 Cíl práce	12
2.2 Metodika	12
3 Teoretická východiska	14
3.1 Teorie systémové dynamiky	14
3.1.1 Historie systémové dynamiky	14
3.1.2 Teorie.....	15
3.1.3 Dynamická složitost	16
3.2 Základní pojmy systémové dynamiky	16
3.2.1 Systém	16
3.2.2 Politika.....	17
3.2.3 Komplexnost.....	17
3.2.4 Struktura systému	19
3.2.5 Systémové myšlení	19
3.2.6 Zpětná vazba.....	20
3.2.7 Časové zpoždění	21
3.3 Simulace	22
3.3.1 Příčinně smyčkový diagram	22
3.3.2 Zásoby a toky	24
3.3.3 Matematické vyjádření	26
3.4 Základy fotovoltaické technologie	27
3.4.1 Solární systém	27
3.4.2 Historie	27
3.4.3 Princip fungování přeměny světla v elektrickou energii	28
3.4.4 Křemíkové solární (fotovoltaické) články	28
3.4.5 Životnost solárních panelů	29
3.4.6 Dopad sluneční energie na povrch planety.....	29
3.4.7 Ekologie Solárních systémů	32
4 Praktická část.....	33
4.1 Podkladová data pro model	33
4.1.1 Zpracování dat	33
4.1.2 Zpracování dat z aplikace elektrárny.....	34
4.1.3 Zpracování dat z elektroměru bojleru.....	37
4.1.4 Zpracování dat parovodu (horkovodu).....	40
4.2 Vytváření modelu.....	41

4.2.1	Tvorba příčinně smyčkového diagramu	41
4.2.2	Fungování ohřevu bojlerů a tepla v domácnosti.....	43
4.2.3	Popis zpětnovazebných smyček	46
4.3	Diagram stavů a toků.....	47
4.3.1	Nastavení modelu	47
4.3.2	Diagram stavů a toků (SFD)	48
4.4	Ekonomické vyhodnocení jednotlivých scénářů	54
4.4.1	popis jednotlivých scénářů	54
4.4.2	Srovnání jednotlivých scénářů.....	62
5	Zhodnocení výsledků	65
5.1	Výsledky u první skupiny scénářů	65
5.2	Výsledky u druhé skupiny scénářů.....	67
6	Závěr	70
7	Seznam používaných zdrojů	72
8	Seznam obrázků, tabulek a rovnic	74
8.1	Seznam obrázků	74
8.2	Seznam tabulek.....	75
8.3	Seznam rovnic	75
9	Přílohy	76

1 Úvod

Systémová dynamika je věda, jejímž objektem zkoumání jsou komplexní systémy, jejich chování a následný vývoj v průběhu času. Bakalářská práce má za cíl ekonomické vyhodnocení instalace malé solární elektrárny, která napájí rodinný dům. K dosažení daného cíle bude použit simulační model sestavený na principech systémové dynamiky. Model následně bude využit k analýze potenciálních scénářů vývoje elektrárny s důrazem na ekonomické indikátory. Díky použití systémové dynamiky lze snadno poukázat na slabé stránky systému a následně je optimalizovat pro lepší efektivnost celé elektrárny.

Fungování solární elektrárny a jejích jednotlivých navazujících částí v rodinném domě lze poměrně dobře znázornit a pochopit její celé fungování. Na základě těchto informací lze dále optimalizovat její fungování a zaměřit se na poměr závislosti na veřejné síti či celkovou ekonomickou výhodnost v případě používání takovéto soustavy, jelikož se jedná o komplexní problematiku. Při využití programů pracujících na principech systémové dynamiky lze docílit stavu porozumění celému systému a udělat patřičná opatření, která v průběhu času mohou ovlivnit rentabilitu celé elektrárny v rámci daného časového horizontu.

První část je věnována teoretii, vysvětlení historie a metodiky systémové dynamiky, zohlednění odlišností lineárního a systémového myšlení a následné popsání nástrojů systémové dynamiky, a to CLD a SFD diagramů neboli příčinně smyčkového diagramu a diagramu stavů a toků. A následné základy fotovoltaiky potřebné k porozumění danému systému.

Praktická část je zaměřena na konstrukci příčinně smyčkového diagramu a jeho užití k identifikaci zpětnovazebných struktur a následnou konstrukci diagramu stavů a toků, jenž lze použít k počítačové simulaci. V závěrečné části jsou rozebrány a popsány potenciální scénáře.

2 Cíl a metodika práce

2.1 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je ekonomické vyhodnocení instalace malé solární elektrárny, která napájí rodinný dům. Mezi dílčí cíle je zařazena konstrukce simulačního modelu, který bude sestaven na principech systémové dynamiky. Tento model bude využit k analýze potenciálních scénářů vývoje elektrárny s důrazem na ekonomické indikátory. Dalším krokem bude vytvoření alternativních scénářů, které by mohly nastat vlivem změny okolí systému.

2.2 Metodika

1. Studium odborné literatury tematicky zaměřené na systémovou dynamiku

Pro plné pochopení problematiky je nezbytné pochopení principů systémové dynamiky a následné vytvoření diagramů, a to konkrétně příčinně smyčkového diagramu a diagramu stavů a toků.

2. Studium odborné literatury se zaměřením na fotovoltaiku

Pro pochopení systému a principů fungování solární elektrárny v této práci je nezbytné mít základy fungování fotovoltaiky jako takové. Přeměnu slunečního záření na elektrickou energii a její potenciál.

3. Vytvoření příčinně smyčkového diagramu

Po sjednocení znalostí z oblastí systémové dynamiky a fotovoltaiky lze sestavit příčinně smyčkový diagram solární elektrárny. Příčinně smyčkový diagram znázorňuje podstatné proměnné a vazby mezi těmito proměnnými. Díky příčinně smyčkovému diagramu lze identifikovat případné zpětnovazebné struktury a odhalit jejich vliv na chování systému.

4. Konstrukce diagramu stavů a toků

Na základě příčinně smyčkového diagramu je vytvořen diagram stavů a toků, který používá matematické metody, díky kterým je následně vytvořena simulace. K provedení dané simulace budou použita reálná data z konkrétní rodinné elektrárny nacházející se v České republice. Na těchto datech bude model otestován.

5. Tvorba a simulace scénářů

Při tvorbě scénářů bude kladen důraz na realitu. První skupina scénářů bude simulovat možnosti využívání solární elektrárny v takovém stavu, jak je v současnosti zkonstruovaná. Druhá skupina scénářů bude simulovat průběh fungování elektrárny bez zdroje tepla z parovodu a její případnou úpravu. V obou skupinách scénářů bude kladen důraz na ekonomické indikátory.

6. Interpretace výsledků

Na základě daných scénářů jsou stanoveny možné vývoje s ohledem na stabilitu trhu s energiemi a jejich možnými výpadky.

3 Teoretická východiska

3.1 Teorie systémové dynamiky

3.1.1 Historie systémové dynamiky

Podle System dynamics (2023) se vznik systémové dynamiky datuje k začátku druhé poloviny 20. století. Jejím zakladatelem je Jay Wright Forrester, který v té době působil jako profesor na jedné z nejprestižnějších univerzit na světě, Massachusettský technologický institut (MIT). Forrester pracoval za druhé světové války na vývoji radarových systémů pro americkou armádu a při jejich vývoji se začali formulovat jeho první myšlenky ze světa systémové dynamiky zvláště pak jeho výzkum mechanismů zpětné vazby pro vojenskou techniku. Během druhé světové války Forrester pracoval na hydraulickém radarovém systému instalovaném na palubě letadlové lodi Lexington. V poválečném období jeho pozornost směřovala k leteckému simulátoru pro americké námořnictvo. Následně tyto zkušenosti z oblasti inženýrství a simulace zužitkoval pro základy pochopení složitých systémů. Od začátku definování systémové dynamiky jako vědy se zaměřuje její využití především na podnikové a manažerské problémy. Ale čas ukázal, že její aplikace je vhodná i jinde. V roce 1968 se Forrester náhodou seznámil se Johnem Collinsem a z jejich spolupráce vznikla kniha Urban Dynamics. Kniha popisuje neúčinnost některých známých politik měst nebo zhoršující se městské problémy. Kniha poukazuje na paradox, kdy se na první pohled nesprávné politiky časem ukážou být velmi efektivní. Jeden z příkladů je nízkopříjmové bydlení, které vytváří past chudoby, která způsobuje stagnaci města, zatímco politika bourání nízkopříjmového bydlení vytváří pracovní místa a zvyšuje životní úroveň obyvatel města. Systémová dynamika získala další pozornost v 70. letech. V té době byla vydána kniha „The Limits to Growth“, která za použití systémové dynamiky zkoumala dlouhodobé důsledky růstu populace s vyčerpáváním zdrojů, které sloužily k ekonomickému růstu. V té době si systémová dynamika vytvořila ve světě jméno a začala se aplikovat na spoustu komplexních problémů ve veřejném i soukromém sektoru.

Forrester (1995) píše, že Urban Dynamics byla první z jeho modelovacích prací, která vyvolala silné emociální reakce. Naznačovala, že všechny hlavní politiky, které Spojené státy provádějí, leží mezi neutrálním a vysoce škodlivým dopadem, ať z hlediska města jako instituce nebo z pohledu nezaměstnaných obyvatel s nízkými příjmy. Tvrdila,

že neškodlivější (bazální) řešení bylo stavět levné bydlení. V té době byla tato politika považována za zásadní pro oživení vnitřních částí měst. Levné bydlení bylo dvojsečným mečem, které zhoršovalo podmínky ve městech. Takové bydlení zabíralo prostor, kde mohla vzniknout pracovní místa a přitahovala by lidi, kteří potřebují práci. Budování levného bydlení bylo procesem pro vytváření chudoby, nikoliv její zmírňování.

Dizikes (2015) uvádí, že čas od času můžeme zjistit, jak lidé reagují na problém a myslí si, že vědí, jak ho mají řešit a co mají děla, avšak často si neuvědomují, že to, co dělají, vytváří další problémy. Dá se to označit, jako začarovaný kruh. Jak se věci zhoršují, tak lidem přibývá motivace něco s tím dělat, ale tím je situace horší a horší. Proto Forrester tvrdil, že jeho práce v systémech a systémové dynamice, je mnohem důležitější než cokoliv, co vytvořil na poli informačních technologií.

3.1.2 Teorie

Systémová dynamika je podle Stermana (2000) věda zabývající se komplexními systémy. „Je to metodika a technika matematického modelování pro formulování, pochopení a diskusi o složitých problémech a otázkách k nim patřících“.

Dle tvrzení Meadows (2008) systém není jen neurčitý soubor věcí. Systém je vzájemně propojený soubor prvků, který je koherentně uspořádán tak, aby něčeho dosáhl. Systém se musí skládat ze tří částí: prvků, vzájemně propojených vazeb a funkce nebo také účelu. Mezi prvky trávicí soustavy (systému) patří například zuby, enzymy, žaludek a střeva. Jsou vzájemně propojeny prostřednictvím fyzikálního toku potravy a souboru regulačních chemických signálů. Úkolem tohoto systému je rozložit potravu na základní živiny a tyto živiny předat do krevního oběhu (dalšího systému) a zároveň vyloučit nevyužitelné odpadní látky.

Sterman (2000) uvádí, že dnešní problémy často vznikají jako nezamýšlené důsledky včerejších řešení. Sociální systémy často trpí rezistencí vůči politice, což je tendence, že dobře míněné zásahy jsou zmařeny reakcí systému na samotnou jeho podstatu, jeho samotného.

Pokud chceme něco opravit, jsme nejprve povinni pochopit celý systém. Každá jeho změna může způsobit další problém.

Jak ale pochopit celý systém a vyhnout se politickému odporu? Podle mnohých je řešením systémové myšlení – schopnost vnímat svět jako komplexní systém. Mít na mysli, že vše souvisí se vším ostatním. Tvrdí se, že s holistickým pohledem na svět bychom se mohli učit rychleji a efektivněji, indikovat důležité body, vyhnout se politickému odporu a přijímat rozhodnutí v souladu s našimi dlouhodobými zájmy.

3.1.3 Dynamická složitost

Sterman (2000) uvádí, že jakkoliv je naše lidská mysl úžasná, složitost světa přesahuje naše dosavadní chápání. Naše modely jsou omezené, nekonzistentní a nespolehlivé. Naše schopnost pochopit vývoj a dopady našich rozhodnutí je nízká. Podnikáme kroky, které dávají smysl z našeho krátkodobého a úzce zaměřeného pohledu. Ale tato rozhodnutí se nám často v dlouhodobém horizontu vracejí, škodí nám a jsou v rozporu původně zamýšleným záměrům. Abychom porozuměli zdrojům politického odporu, musíme pochopit, jak složitost systémů, tak mentální podstatu těchto systémů, které používáme při rozhodování. Většina případů odporu vůči politice však vyplývá z dynamické složitosti, což je často neintuitivní chování složitých systémů, které vzniká na základě interakcí jednotlivých elementů v průběhu času.

3.2 Základní pojmy systémové dynamiky

3.2.1 Systém

Podle Krejčího a Kvasničky (2014, s. 4) se vědní disciplína, zabývající se systémy nazývá systémová dynamika a její podstatou je zkoumání chování komplexních systémů v čase. Zaobírá se strukturou systému, vazbami, zpožděním jednotlivých vazeb a nelineárními vztahy v systému. K lepšímu pochopení systému se používá počítačová simulace, s její pomocí lze snadněji pochopit proč problém nastal, kde vznikl (jeho příčiny) a proč jsou aplikované politiky částečně nebo zcela nefunkční a pomáhá navrhnout strukturu a politiky systému silnější a účinnější. Jako systém můžeme označit množinu prvků, které mají určitou strukturu, jsou nějakým způsobem organizovány a vzájemně propojeny vazbami. Daná struktura má nějaké specifické chování, které má daný určitý cíl anebo funkci a směřují k nim v průběhu času.

Meadows (2008) uvádí, že systémem v systémové dynamice rozumíme reálný objekt zkoumání, kterým může být například strom (kmen, kořeny listy atd.) nebo škola se studenty a pedagogy anebo zdravotní politika státu v čase. Vše zmíněné můžeme označit jako systém a podle toho je i zkoumat. Příkladem toho, co není systém je například hromada kamení, která neslouží k nějakému předem zamýšlenému účelu a nemá nějakou vlastnost, kterou by neměla žádná její část. Tudíž nelze hromadu kamení označit jako systém.

3.2.2 Politika

Dle Forrestra (1987) in Krejčí a Kvasnička (2014, s. 5) pojmu politika rozumíme jako pravidlu, podle něhož jsou prováděna daná pravidla. Politika je označení pro převod informačních zdrojů do permanentního toku rozhodnutí. Politikou můžeme rozumět i obecnější termín, nemusí se jednat o vazbu na dlouhodobé cíle a ani zde nemusí být soulad s danou strategií. V systémové dynamice je strategie podporou pro plnění cílů. Navrhování vhodnějších politik může zajistit to, že vynaložené úsilí a daná opatření, co nejvíce vyhovují zadaným cílům.

3.2.3 Komplexnost

Krejčí a Kvasnička (2014, s. 6) uvádí, že komplexnost v systémové dynamice vyjadřuje složitost propojenosti prvků v systému. Jedná se o složitosti vazeb v systému. Všechno je propojeno se vším a každá změna může mít vliv na každý prvek v systému neboli všechno souvisí se vším.

Sterman (2000, s. 14-23) uvádí, že v dynamické komplexnosti je větší důraz kladen na smyčkový nelineární charakter systému, ve kterém se objevuje řada zpoždění mezi příčinnou a následkem potažmo důsledkem. Příčina je interakce probíhající mezi aktéry a dalšími prvky v daném systému v průběhu času.

Dynamická složitost vzniká proto, že systémy jsou podle Stermana (2000) následující:

- a) **Neustále se mění:** Hérakleitos řekl: "Vše je změna." To, co se zdá být neměnné, se v delším časovém horizontu mění. Ke změnám v systémech dochází v mnoha časových úsecích a tyto úseky se někdy vzájemně ovlivňují. Hvězda se vyvíjí miliardy let, když spaluje vodíkové palivo, a pak může během okamžiku explodovat jako supernova. Býčí trhy (růst) mohou trvat roky a pak se zhroutit během několika hodin.

- b) Těsně spojené:** Aktéři v systému jsou v silné interakci mezi sebou navzájem. Vše je propojeno se vším ostatním.
- c) Řídí se zpětnou vazbou:** Vzhledem k těsným vazbám mezi prvky se naše činy vrací zpět. Naše rozhodnutí mění stav světa, vyvolávají změny v přírodě a podněcují ostatní k jednání, čímž dávají vzniknout nové situaci, která pak ovlivňuje naše další rozhodnutí. Z těchto zpětných vazeb vzniká dynamika.
- d) Nelineární:** To, co se děje lokálně v systému (v blízkosti aktuálního pracovního bodu), často neplatí ve vzdálených oblastech (v jiných částech systému). Nelinearita často vyplývá ze základní fyziky systémů: Nedostatečné zásoby mohou způsobit zvýšení výroby, ale výroba nikdy nemůže klesnout pod nulu bez ohledu na to, kolik nadbytečných zásob máte. Nelinearita vzniká také v důsledku interakce více faktorů při rozhodování: Tlak nadřazeného na dosažení většího úspěchu zvyšuje vaši motivaci a úsilí až do bodu, kdy cíl považujete za nemožný. Frustrace pak převládne nad motivací, a vy to vzdáte nebo si najdete nového vedoucího či novou práci.
- e) Závislé na historii:** Vydání se jednou cestou často vylučuje možnost vydat se jinou a určuje, kde skončíme (závislost na cestě). Mnoho akcí je nevratných (druhý termodynamický zákon). Zásoby a toky (akumulace) a dlouhé časové prodlevy často znamenají, že konání a rušení mají zásadně odlišné časové konstanty: Během 50 let závodů ve zbrojení v době studené války jaderné státy vyprodukovaly (konání) více než 250 tun plutonia pro výrobu zbraní (^{239}Pu). Poločas rozpadu (^{239}Pu) je přibližně 24 000 let (rušení).
- f) Samoorganizující se:** Dynamika systémů vzniká spontánně z jejich vnitřní struktury. Malé náhodné poruchy jsou často zesilovány a formovány zpětnovazebnou strukturou a vytvářejí vzory v prostoru a čase. Rytmičké stahování srdce, trvalé cykly na trhu s nemovitostmi vznikají spontánně ze zpětných vazeb mezi činiteli a prvky systému.
- g) Adaptivní:** Schopnosti a rozhodovací pravidla agentů ve složitých systémech se v průběhu času mění. Evoluce vede k selekci a šíření některých agentů, zatímco jiní vymírají. K adaptaci dochází také v důsledku učení se ze zkušeností, zejména když se lidé učí novým způsobům, jak dosáhnout svých cílů navzdory překážkám. Učení však není vždy prospěšné.
- h) Charakteristické substitučními vztahy:** Časové zpoždění zpětnovazebních kanálů znamená, že dlouhodobá odezva systému na změnu se často liší od jeho krátkodobé odezvy. Politiky s vysokým pákovým efektem často způsobují chování, které se

zhoršuje, zatímco politiky s nízkým pákovým efektem často přinášejí přechodné zlepšení, než se problém zhorší.

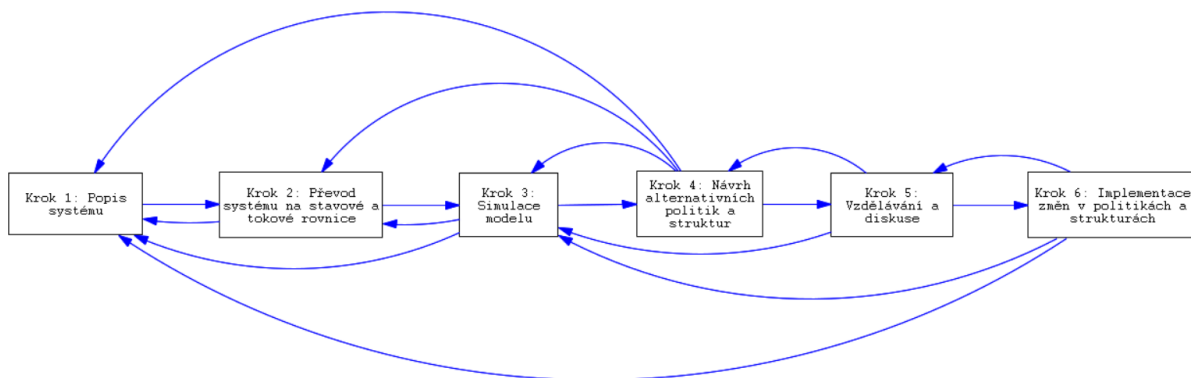
- i) **Protichůdné:** V komplexních systémech je příčina a následek vzdálené v čase a prostoru, zatímco my máme tendenci hledat příčiny v blízkosti událostí, které se snažíme vysvětlit. Naše pozornost se upíná spíše k příznakům potíží než k jejich příčině. Politiky s vysokým pákovým efektem často nejsou zřejmé.
- j) **Odolná politika:** Složitost systémů, v nichž jsme zakotveni, převyšuje naši schopnost jim porozumět.

Výsledek: Mnohá zdánlivě zřejmá řešení selhávají nebo problém ještě zhoršují (Sterman 2000).

3.2.4 Struktura systému

Podle Krejčího a Kvasničky (2014, s. 6-7) vnitřní uspořádání systému tvoří jeho struktura, která představuje vazby mezi jednotlivými prvky, jejich zpětnovazebné smyčky, a to kde se v systému vyskytují a na jakých místech způsobují zpoždění. Označuje i jednotlivé prvky, a to tím způsobem, že rozlišuje, které prvky označují stav, a které označují tok.

Obrázek 1 Proces systémové dynamiky



Zdroj: vlastní zpracování, podle Forrestera (1994)

3.2.5 Systémové myšlení

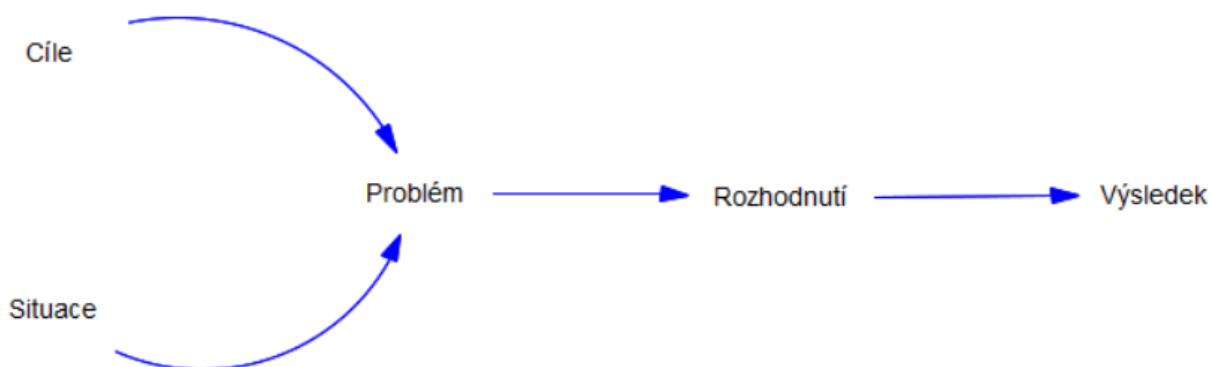
Dle Krejčího a Kvasničky (2014, s. 8) lze systémové myšlení popsat procesem přechodu od lineárního myšlení k nelineárnímu způsobu myšlení. Lineárním myšlením je obvykle

příčinnou resistance vůči navrženým politikám. Systémové myšlení v rámci systémové dynamiky lze označit jako opuštění lineárního pohledu na svět.

3.2.6 Zpětná vazba

Sterman (2000) uvádí, že jednou z příčin odporu vůči politice je naše tendence interpretovat zkušenosti jako sérii událostí. Například, když jsou zásoby příliš vysoké, nebo když prodeje minulém měsíc klesly. Učíme se, že každá událost má svou příčinu, která je následkem nějaké dřívější události: Zásoby jsou příliš vysoké, protože prodeje nečekaně poklesly. Prodeje klesly, protože konkurence snížila cenu. Konkurence snížila cenu, protože.... Posuzujeme stav věcí a porovnáváme ho s našimi cíli. Rozdíl mezi situací, kterou si přejeme, a situací, kterou vnímáme, definuje náš problém. Můžeme zařadit různé změny ke zlepšování procesů, abychom zvýšili produktivitu, počet produktů nebo prodeje. Oznámit propuštění, abychom snížili náklady. Problém je vyřešen, nebo nám to tak alespoň připadá. Neuvažujeme totiž o existenci zpětných vazeb.

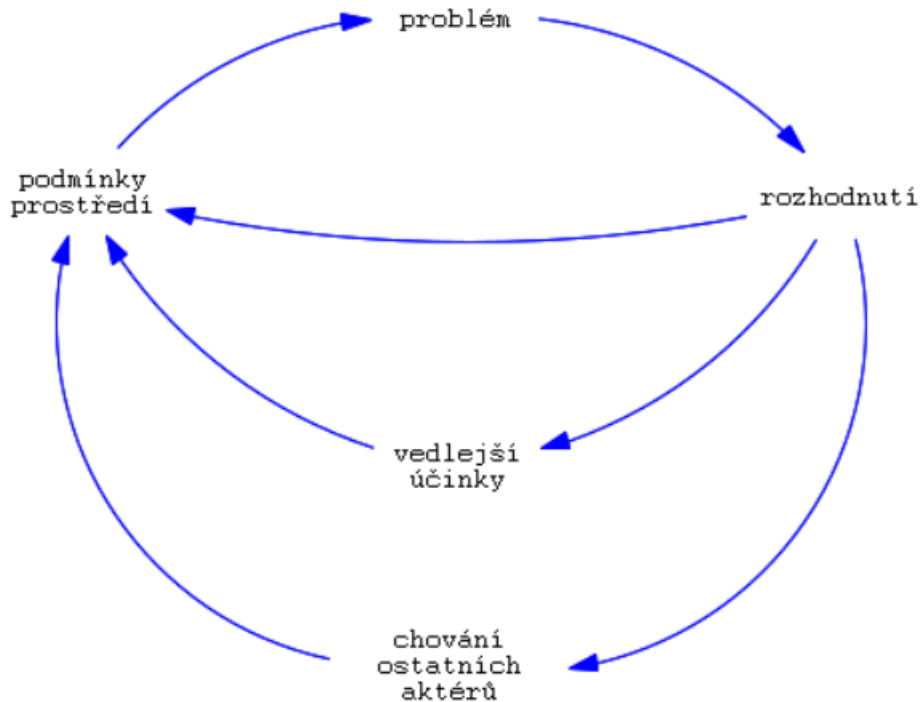
Obrázek 2 Lineární pohled na svět



Zdroj: zpracování vlastní, podle Stermana (2000)

Podle Stermana (2000) je třeba si uvědomit, že reálný systém reaguje na naše změny. Neboli uvědomit si existenci zpětných vazeb. Naše rozhodnutí, která provádíme v daný moment budou mít následky do budoucna. A tyto výsledky můžou mít pro nás nečekané následky. Bez uvědomění si zpětnovazebných smyček, které reagují na naše rozhodnutí, budeme výsledky systému vnímat jako součástí světa, který je nepředvídatelný a neovlivnitelný.

Obrázek 3 Působení zpětných vazeb



Zdroj: zpracování vlastní, podle Stermana (2000)

3.2.7 Časové zpoždění

Sterman (2000) tvrdí, že časové prodlevy mezi přijetím rozhodnutí a jeho dopadem na stav systému jsou běžné a obzvláště problematické. Zpoždění ve zpětnovazebních smyčkách způsobí nestabilitu a zvyšují tendenci systému ke kolísání. Stavba nové továrny na polovodičové destičky zahrnuje časové prodlevy mezi zahájením akce, zrychlením, bržděním, rozhodováním o dalším vývoji nové továrny a následné dopady na stav systému (stavby). Výsledkem je, že rozhodovací orgány často pokračují v zásazích k nápravě zjevných nesrovnalostí mezi požadovaným a skutečným stavem systému ještě dlouho poté, co byly přijaty dostatečná nápravná opatření, aby se obnovila rovnováha systému. Výsledkem je cyklus boomu a poklesu v polovodičovém průmyslu. Výzkumy přesvědčivě ukazují, že lidé běžně ignorují časové zpoždění, i když je existence a obsah zpoždění znám, což vede k omylům a nestabilitě.

3.3 Simulace

Krejčí a Kvasnička (2014, s. 10) uvádějí, že díky počítačové simulaci se snažíme zjistit vlastnosti zkoumaného systému. Tyto systémy se často zaměřují především na statistická data a jejich zpracovávání a z nich nadále vyvozují tížené výsledky. V systémové dynamice se simulace odlišuje. Nezaměřuje se na individuální rozhodnutí, ale na politiky neboli na pravidla, na základě, kterých jsou tyto rozhodnutí prováděna. Proto ani nejsou přesné výsledky hodnot většinou rozhodující. Teorie stochastických procesů $X(T,e)$ se třídí podle toho, zda T nebo náhodná veličin e jsou spojité nebo diskrétní. V simulaci, která je prováděna v systémové dynamice, se primárně pracuje se všemi proměnnými včetně času, jako se spojitými proměnnými. To ve výsledku znamená, že model je vyjádřen soustavou diferenciálních rovnic. Ale v modelech se můžou objevit i diskrétní proměnné, které jsou následně formulovány jako spojité. To lze aplikovat třeba u počtu živočichů nebo počtu zaměstnanců.

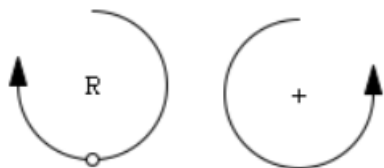
3.3.1 Příčinně smyčkový diagram

Podle Krejčího a Kvasničky (2014, s. 12) je příčinně smyčkový diagram jeden ze základních diagramů v systémové dynamice. Daný diagram znázorňuje proměnné, které jsou vzájemně propojené šipkami, které mají dané vlastnosti podle charakteru proměnných neboli jaký vliv má jedna proměnná na tu druhou. Používá se pro jeho jednoduchost a přehlednost.

Krejčí a Kvasnička (2014, s. 12) uvádějí podle polarity vazeb mezi jednotlivými proměnnými v uzavřené zpětnovazebné smyčce rozeznáváme typ zpětnovazebné smyčky.

- 1) Sebeposilující smyčka (pozitivní smyčka) je znázorněna symboly „+“ nebo „R“ jako „Reinforcing“). Používá se k vyjádření toho, když původní hodnota proměnné má přes několik vazeb na další proměnné posilující vliv na hodnotu té samé proměnné. Jako příklad lze uvést, čím více peněz posíláme na účet, tím větší budou připisovány úroky a tím větší objem peněz bude na účtu. Někdy jsou sebeposilující smyčky také vyjadřovány symbolem z kopce valící se sněhové koule.

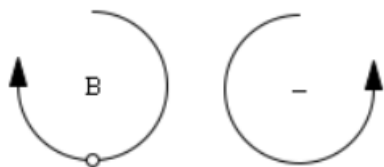
Obrázek 4 Sebeposilující/posilující smyčka



Zdroj: zpracování vlastní, podle Krejčího a Kvasničky (2014, s. 13)

- 2) Vyvažující smyčka (negativní smyčka nebo cíl hledající smyčka) je znázorněna symboly „-“, nebo „B“ jako „Balancing“, a naopak zachycuje situaci, kdy zvýšená hodnota proměnné má v rámci smyčky snižující účinek na sebe samou a naopak, například čím nižší je teplota v pokoji, tím více termostat zvyšuje vytápění a tím vyšší je teplota v pokoji (Krejčí a Kvasnička, s. 12,2014).

Obrázek 5 Vyvažující/negativní/cíl hledající smyčka



Zdroj: zpracování vlastní, podle Krejčího a Kvasničky (2014, s. 13)

- 3) Za jinak neměnných podmínek, při růstu x roste y nad úroveň, na které by bylo v případě konstantního x . V případě, že y je stavová proměnná (akumulace): x přibývá k y .

Obrázek 6 Kladná polarita vazeb



Zdroj: zpracování vlastní, podle Krejčího a Kvasničky (2014, s. 13)

- 4) Za jinak neměnných okolností při růstu x klesá y pod úroveň, na které by bylo v případě konstantního x . V případě, že y je stavová proměnná (akumulace): x ubývá z y .

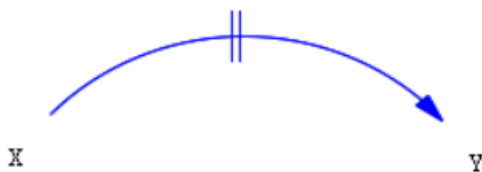
Obrázek 7 Negativní polarita vazeb



Zdroj: zpracování vlastní, podle Krejčího a Kvasničky (2014, s. 13)

- 5) Značka zpoždění

Obrázek 8 Značka zpoždění



Zdroj: zpracování vlastní, podle Krejčího a Kvasničky (2014, s. 13)

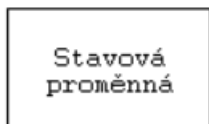
3.3.2 Zásoby a toky

Krejčí a Kvasnička (2014, s. 14) uvádí, že diagram stavů a toků je způsob, kterým můžeme znázornit zásoby a toky v systému. Díky nim lze přesněji vyjádřit fungování systému a lze je také snadno převést do matematického modelu. Zpětnovazebné smyčky jsou v nich méně patrné. Diagram stavů a toků obsahuje stejné znaky jako příčinně smyčkový diagram, ale vazby, které jsou znázorněné obyčejnou šipkou vyjadřují informační neboli příčinnou vazbu. Stavů a toků mají své speciální symboly.

1. Stavová proměnná

Stavová proměnná znázorňuje akumulaci, úroveň nebo stav. Jako příkladě může být vana napuštěná vodou. Můžeme ji vyjádřit pomocí určitého integrálu.

Obrázek 9 Stavová proměnná



Zdroj: zpracování vlastní, podle Krejčího a Kvasničky (2014, s. 13)

2. Toková proměnná

Toková proměnná znázorňuje tok, který vstupuje nebo vystupuje z akumulace. Příklad je například přítok vody do vany z kohoutku nebo odtok vany do odpadu.

Obrázek 10 Toková proměnná



Zdroj: zpracování vlastní, podle Stermana (2000)

3. Symbol mraku

Symbol mraku znázorňuje stavovou proměnnou za hranicí modelu.

Obrázek 11 Symbol mraku

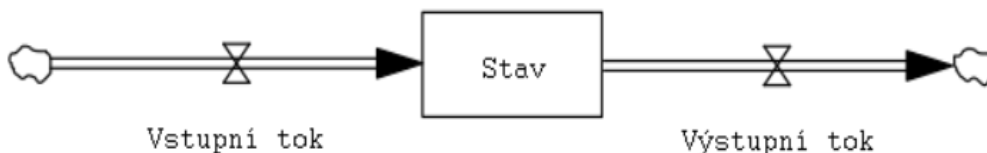


Zdroj: zpracování vlastní, podle Stermana (2000)

3.3.3 Matematické vyjádření

1. Příklad diagramu stavů a toků (obecná struktura)

Obrázek 12 Zobrazení stavů a toků



Zdroj: zpracování vlastní, podle Sterman (2000)

2. Pomocí integrálu

$$Stav_T = \int_{T_0}^T (Vstupní tok_t - Výstupní tok_t) dt + Stav_{T_0}$$

Rovnice 1

3. Pomocí diferenciální rovnice

$$\frac{d(Stav)}{dt} = \text{čistá změna stavu} = Vstupní tok_t - Výstupní tok_t$$

Rovnice 2

Krejčí a Kvasnička (2014, s. 16) tvrdí, že rozlišení stavových a tokových proměnných je kvůli odlišným vlastnostem a chování i rozdílně matematicky interpretováno. Stavová proměnná se měří k určitému okamžiku, toková proměnná a její hodnota se zachycuje za určité časové období. Modely systémové dynamiky jsou tvořeny soustavami obyčejných diferenciálních rovnic, které jsou často nelineární. Analytické řešení těchto soustav je obtížné, a je proto nutné použít numerické metody. Mezi běžně používané metody patří Eulerova metoda a metody Runge-Kutta. Eulerova metoda je do značné míry jednodušší, ale méně přesná. Tato metoda předpokládá, že hodnota je po daný časový krok neměnná.

Následně je k ní najednou přičten rozdíl vstupního a výstupního toku v daném čase. Metoda Runge-Kutta je rozdílná v tom, že počítá hodnoty i uvnitř časového kroku za pomoci Taylorova rozvoje a rekurentního vzorce.

Podle Richmonda (1994) jsou zásoby a toky stavebními kameny systému. Předcházejí smyčkám neboli zpětným vazbám. Zásoby a toky tvoří infrastrukturu systému. Na jejich základě vznikají zpětnovazebné smyčky. Lze použít přirovnání jako míchy a kostry poskytující rámec, ve kterém se nacházejí svaly a orgány, které dávají vzniknout zpětnovazebným signálům probíhající skrz nervovou soustavu a jsou jimi stimulovány. Bez infrastruktury nemůže existovat žádný systém zpětné vazby.

3.4 Základy fotovoltaické technologie

3.4.1 Solární systém

Podle Office Energy Efficiency & Renewable Energy (2023) je množství slunečního světla, které dopadne na zemský povrch za hodinu a půl, stačí na to, aby zvládlo pokrýt celosvětovou spotřebu energie za celý rok. Solární technologie přeměňují sluneční světlo na elektrickou energii buď prostřednictvím fotovoltaických (PV) panelů, nebo prostřednictvím zrcadel, která koncentrují sluneční záření. Tato energie může být použita k výrobě elektřiny nebo může být uložena v bateriích nebo v tepelných zásobnících. Sluneční záření neboli elektromagnetické záření je forma energie, kterou vyzařuje slunce. Tuto energii dokáže absorbovat povrch naší planety. Na každou část naší planety dopadá sluneční záření pod jiným úhlem a s tím také souvisí její velikost, potažmo její možnosti přeměny na elektrickou energii nebo jiný druh energie, který může sloužit ku prospěchu člověka.

3.4.2 Historie

Office Energy Efficiency & Renewable Energy (2023) uvádí, že fotovoltaika (zkráceně PV) dostala svůj název podle procesu, při kterém dochází k přeměně světla (fotonů) na elektrickou energii (napětí). Tento proces se nazývá fotovoltaický efekt. Tento jev byl poprvé využitý v Bell Laboratories v roce 1954. Vědci zde vyrobili první funkční solární článek, který byl na bázi křemíku. Při vystavení slunečnímu záření začal generovat elektrický proud. Solární články našly využití především ve vesmírných satelitech, které

byly jimi napájeny. Následovaly hodinky nebo kalkulačky. Díky následnému poklesu ceny se v dnešní době fotovoltaické články staly konkurenceschopnými alternativami v mnoha regionech naší planety. Používají se ve velkém množství, aby napájely veřejnou síť a zároveň se jedná o obnovitelný zdroj elektrické energie.

3.4.3 Princip fungování přeměny světla v elektrickou energii

The National Renewable Energy Laboratory (2023) tvrdí, že když světlo svítí na fotovoltaický článek také nazývaný solární článek – může se světlo odrážet, absorbovat nebo procházet přímo skrz daný článek. FV článek je složen z polovodičového materiálu; „polo“ znamená, že může vést elektřinu lépe než izolant, ale ne tak dobře jako dobrý vodič jako kov. Ve fotovoltaických článcích se používá několik různých polovodičových materiálů, ale křemík se používá v drtivé většině z nich kvůli dostupnosti, jelikož se jedná o druhý nejčastější prvek na Zemi.

Office Energy Efficiency & Renewable Energy (2023) tvrdí, že když je polovodič vystaven světlu, absorbuje energii světla a přenáší ji na záporně nabitě částice v materiálu zvaném elektrony. Tato dodatečná energie umožňuje elektronům proudit materiálem jako elektrický proud. Tento proud je extrahován vodivými kovovými kontakty (čarami) podobnými mřížce na solárních článcích a lze jej pak použít k napájení elektrické sítě. Účinnost FV článku je jednoduše množství elektrické energie vycházející z článku ve srovnání s energií ze světla, které na něj svítí, což ukazuje, jak efektivní je článek při přeměně energie z jedné formy na druhou. Množství elektřiny vyrobené z fotovoltaických článků závisí na charakteristikách jako je intenzita vlnové délky, sklon světla a na výkonnostních atribtech článku. Důležitou vlastností FV polovodičů je bandgap, který udává, jaké vlnové délky světla může materiál absorbovat a přeměnit na elektrickou energii. Pokud se bandgap polovodiče shoduje s vlnovými délkami světla svítícího na fotovoltaický článek, pak tento článek může efektivně využít veškerou dostupnou energii.

3.4.4 Křemíkové solární (fotovoltaické) články

Podle The National Renewable Energy Laboratory (2023) je většina dnešních solárních článků je vyrobena z křemíku. Jsou dostupné pro větší množství lidí, díky poklesu jejich ceny. Mají také dobrou účinnost. Tyto články jsou obvykle sestaveny do větších modulů, které lze instalovat na střechy obytných nebo komerčních budov nebo rozmístit po zemi

a vytvořit tak obrovské systémy, které mají potenciál být podstatným zdrojem elektrické energie v dané síti.

Office Energy Efficiency & Renewable Energy (2023) uvádí, že křemík je zdaleka nejběžnějším polovodičovým materiálem používaným v solárních článcích a představuje přibližně 95 % dnes prodávaných fotovoltaických článků (FV). Je to také druhý nejrozšířenější materiál na Zemi (po kyslíku) a nejběžnější polovodič používaný v počítačových čipech. Krystalické křemíkové články jsou vyrobeny z atomů křemíku, které jsou navzájem spojeny a tvoří tak krystalovou mřížku. Tato mřížka poskytuje organizovanou strukturu, která zefektivňuje přeměnu světla na elektrickou energii. Fotovoltaické články vyrobené z křemíku v současnosti poskytují kombinaci vlastností jako jsou vysoká účinnost, nízké ceny a dlouhou životnost. Předpokládá se, že fotovoltaické články vydrží přibližně 25 let anebo více a po této době budou schopny stále produkovat více než 80 % původního výkonu.

3.4.5 Životnost solárních panelů

Podle Solar Power Simplified (2023) se životnost do značné míry odvíjí od typu a značky solárních panelů. V současnosti se prodávané solární panely vyznačují zárukou výkonu 25 let. Toto nelze však označit jako záruku na produkt (která obecně bývá 10 let). Jedná se o odhadovanou životnost výroby solárních panelů. Záruční výkon vyjadřuje předpokládanou dobu v letech, po kterou budou solární panely fungovat a produkovat alespoň 80 % jejich výkonu. Nejlepší dostupné solární panely na trhu mohou dosáhnout 30 let výkonu a přitom mají 15 let záruku na produkt.

3.4.6 Dopad sluneční energie na povrch planety

Fotovoltaika Budovy jako zdroj proudu (2011) uvádí, že výkon sluneční energie a roční energie ozáření (rovnice číslo 3), se vztahují na plochu, na kterou dopadá sluneční záření. Normují se na metr čtvereční. Výkon slunečního záření, který dopadá svisle na plyný obal země, je v průměru 1367 Wattů na metr čtvereční. Tato hodnota vytváří takzvanou solární konstantu. Když sluneční energie prochází plyným obalem Země (atmosférou), tak se sluneční výkon zmenšuje, protože průchod omezují molekuly vzduchu, vodní páry, které sluneční energii odrážejí, pohlcují nebo rozptylují. Při slunečném počasí dosahuje intenzita slunečního záření na povrchu země přibližně 1000 Wattů na metr čtvereční, a to nezávisle

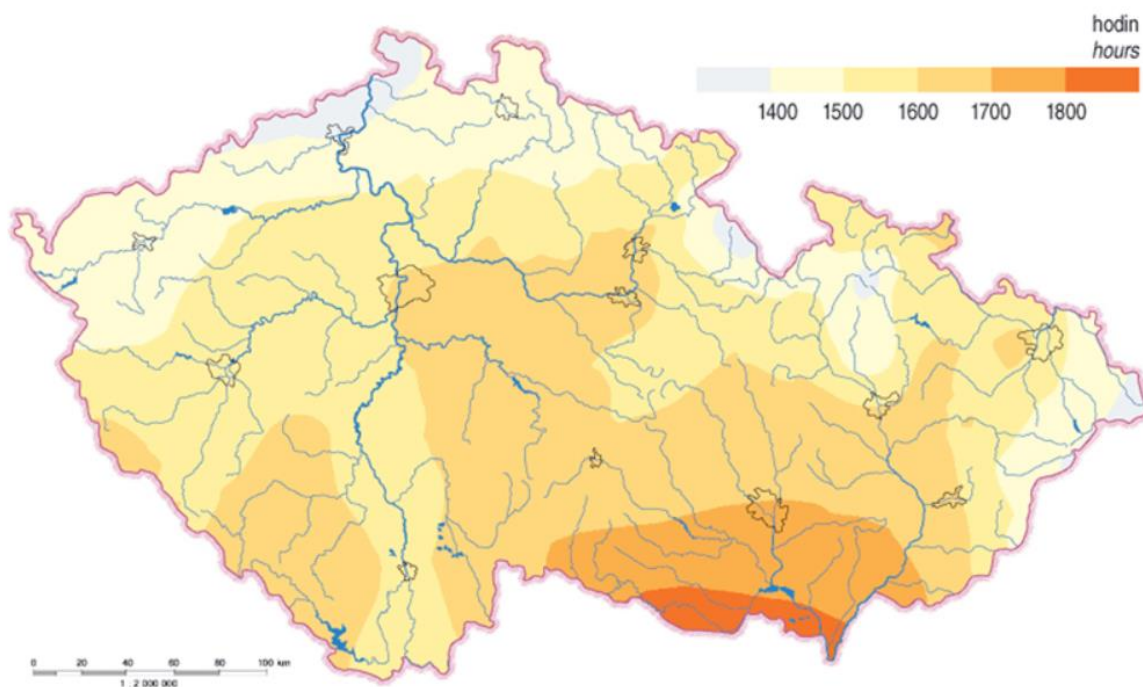
na stanovišti. Tato hodnota se využívá při určení jmenovitého výkonu solárních panelů. Teoreticky se dá vyjádřit pravidlem, že z 1 kW nainstalovaného výkonu lze za rok získat 800 až 1100 kWh elektrické energie. Sluneční záření se skládá ze dvou složek. Z difuzního a přímého záření. Při jasném počasí nastává převážně přímé záření, které přichází se sluncem a vytváří ostré stíny. Při zatažené obloze, kdy slunce není z povrchu země vidět, je sluneční světlo filtrováno nebo vychylováno skrz mraky na obloze nebo skrz ozonové nebo prachové vrstvy. Vytváří potom takzvané difuzní záření bez předem daného vektoru (směru). Při této situaci může klesnout hodnota pod 1000 W/m^2 . Složení a intenzita slunečního záření je proto závislá na počasí, ale také na roční době, denní době a v neposlední řadě zeměpisné šířce. Když se sečtou jednotky přímého a difuzního záření ze slunce v průběhu všech hodin v roce, vyjde ozáření Sluncem během roku neboli celkové ozáření v kilowatthodinách na 1 metr čtvereční plochy a roku. Jedná se o hodnotu, která je regionálně odlišná a uvádí se pro horizontální plochu. V České republice dosahuje tato hodnota 950 až 1340 kWh/m². Tato hodnota klesá směrem od jihu k severu, ale na základě mikroklimatu dochází k odchýlkám. V oblasti České republiky připadá $\frac{3}{4}$ dopadající sluneční energie na letní polovinu roku, tedy od dubna do září.

Výpočet sluneční energie:

$$\text{Energie} = \text{výkon} * \text{čas}$$

Rovnice 3

Obrázek 13 Průměrný roční součet trvání slunečního svitu v ČR



Zdroj: <http://www.isofenenergy.cz/>

Dle Fotovoltaické systémy energetická příručka (2017) je intenzita slunečního záření mimo zemskou atmosféru ovlivněna také vzdáleností mezi Zemí a Sluncem. Tato vzdálenost se v průběhu roku mění a pohybuje se v rozmezí 147-152 milióny kilometrů. To má za následek kolísání intenzity slunečního záření, které dopadá na plyný obal země, a to svisle k němu. Intenzita osvitů se tedy pohybuje v rozmezí 1325 W/m až 1420 W/m. Průměrná roční hodnota je označována jako solární konstanta.

Výpočet solární konstanty:

$$E_0 = 1367 \frac{W}{m^2}$$

Rovnice 4

3.4.7 Ekologie Solárních systémů

Fotovoltaiické systémy energetická příručka (2017) uvádí, že při výrobě křemíkových článků se používají speciální plyny. Fluorid sírový a fluor dusík. Oba plyny mají velmi vysoký skleníkový potenciál a mohou tedy přispívat celkovému oteplování planety. Při recyklaci se řeší otázky celkové energetické amortizaci solárních panelů, ta se dokáže snížit v návaznosti s množstvím použitého recyklovatelného materiálů. Kromě křemíkových článků se dají recyklovat i další části jako jsou části vyrobené ze stříbra skla, hliníku. Při výrobě dochází k používání podobně škodlivých látek jako v polovodičovém průmyslu, ale jelikož zůstávají v uzavřeném okruhu, nedochází k jejich úniku. Hotové solární články obsahují ze ekologicky škodlivých materiálů jen oxid olovnatý. Jsou ale i výrobci, kteří olovo při výrobě křemíkových článků nepoužívají.

4 Praktická část

4.1 Podkladová data pro model

Cílem práce bylo vytvořit model fotovoltaické elektrárny napájející rodinný dům, který měl znázorňovat jednotlivá využívání elektrické energie s následným přidáním dalších zdrojů vytápění. Na základě tohoto modelu a reálných dat z jednotlivých elektroměrů a dalších měřičů v domácnosti byl sestaven scénář, který co nejdříve znázorňuje skutečnost a následně potencionální scénáře, které by mohly nastat nebo které by mohly přinést nové optimum do budoucna. Měřené období obsahovalo jeden rok od 1.5. 2022 do 30.4. 2023. Data byla z existující soustavy solární elektrárny, které se nacházejí na území České republiky. Tato časová osa byla zvolena na základě fungování soustavy a chování počasí v dané zeměpisné délce a šířce. Jelikož přes léto bylo obvykle mnohem více slunečních dní, tak si tato soustava vyrobila dostatek energie pro spotřebu domácnosti a následně přeposílala velké množství energie do virtuální baterie. Virtuální baterie funguje na principech, které si zákazník domluvil se svým poskytovatelem elektrické energie. V tomto případě virtuální baterie fungovala na základě přeposílání přebytečné energie do veřejné sítě a následně v době nedostatku elektrické energie si brala tuto vyrobenou energii z veřejné sítě zpět za poloviční cenu oproti normálnímu tarifu. Takže je to výhodnější než samostatný odběr z veřejné sítě za plnou cenu ale méně výhodné než energie vyrobená ze soustavy, která je po pořízení a instalaci elektrárny prakticky zadarmo. Data byla čerpána z aplikace RCT Power Portal.

4.1.1 Zpracování dat

Data byla sesbírána z fyzických elektroměrů, které byly umístěny v řídicí jednotce a byla tedy součástí centrály elektrárny umístěné v domácnosti a dostupná z aplikace dodávané výrobcem elektrárny. Další měřiče byly umístěny u jednotlivých spotřebičů, které měli velký odběr, v tomto případě u bojlerů na ohřev teplé vody. Data, které byla stažena z aplikace výrobce elektrárny byla potřeba zpracovat. Pro potřeby modelu byla data zpracována do intervalů trvajících jeden týden. Celkově tedy 52 hodnot u každého sledovaného elementu, tak aby bylo obsažené celé sledované období jednoho roku.

Ze samotné aplikace, která je spojená s řídicí jednotkou elektrárny, se daly vyčíst tyto druhy dat vysvětlené v tabulce 1.

4.1.2 Zpracování dat z aplikace elektrárny

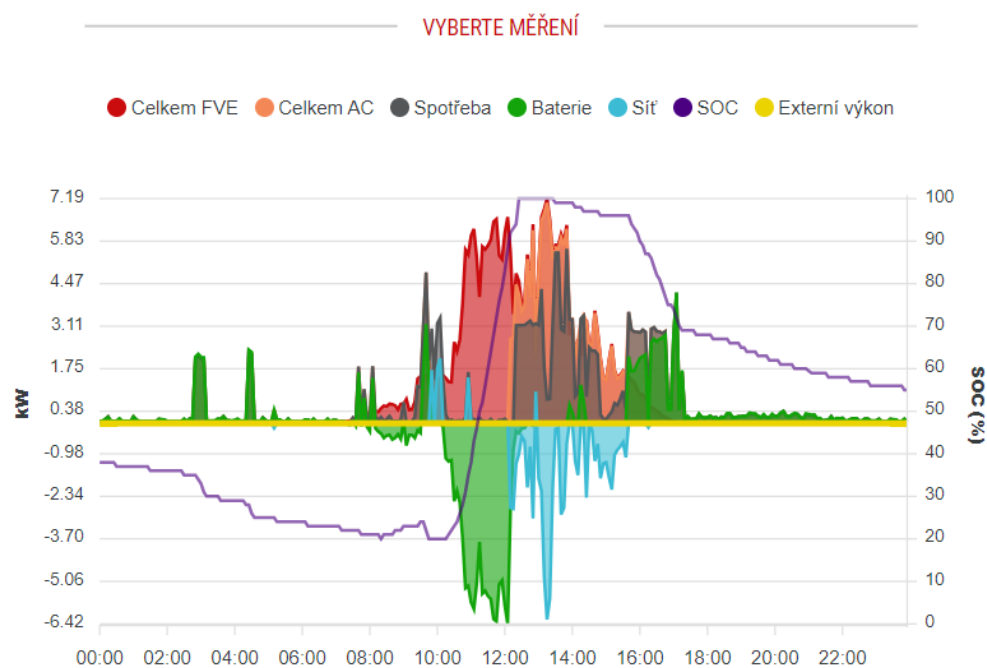
Druhy dat z obrázku 14 na kterém je graf znázorňující průběh jednoho dne. Vyjadřuje výrobu a spotřebu elektrické energie v soustavě. Jednotlivé proměnné jsou vysvětleny v tabulce 1.

Tabulka 1 Měřené proměnné v aplikaci elektrárny

Celkem FVE	Celkové množství vyrobené energie
Celkem AC	Celkový objem vyrobeného střídavého proudu
Spotřeba	Spotřeba domácnosti
Baterie	Využití baterie
Síť	Elektrická energie poslaná do veřejné sítě
SOC	Kapacita baterie
Externí výkon	Množství energie přeposlané z baterie do sítě

Zdroj: vlastní zpracování

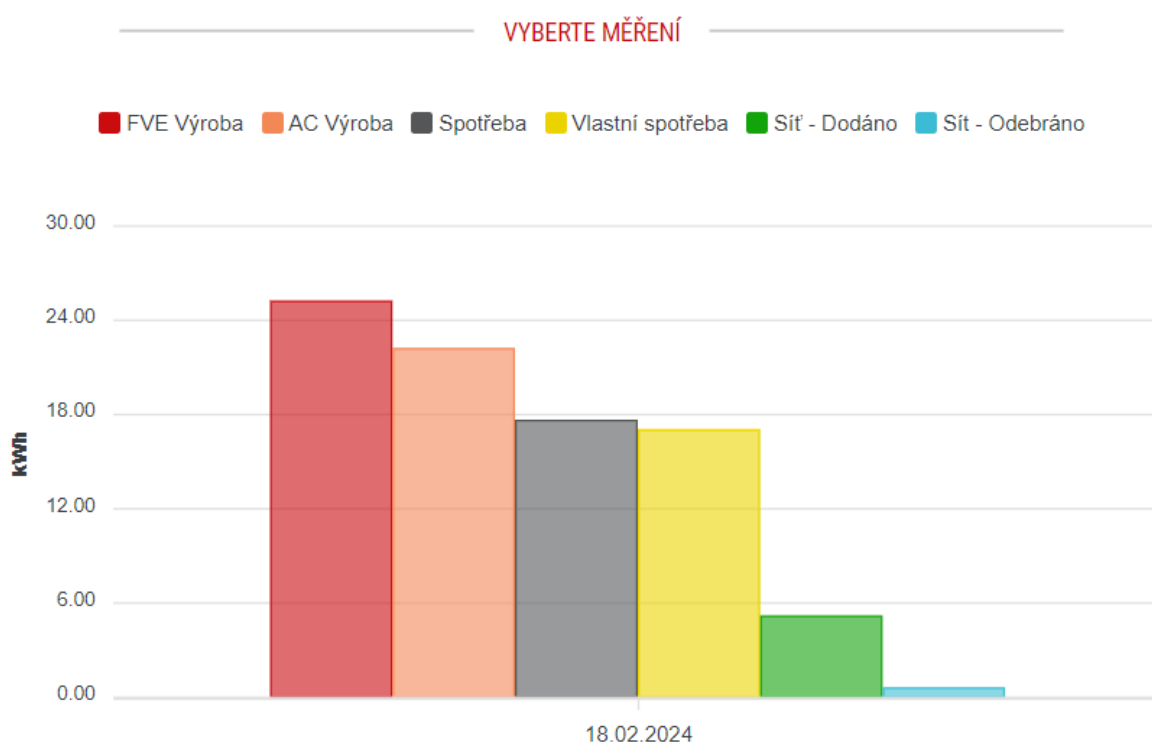
Obrázek 14 Průběh výroby a spotřeby během jednoho dne



Zdroj: <https://rct-portal.com/cs>

Z tohoto grafu šel vyčíst průběh výroby a spotřeby energie v polojasném zimním dnu. Z grafu se dalo vyčíst, že nejprve došlo ke spotřebě energie a využívání baterie a s tím i úbytek její kapacity. Se začínajícím dopadem slunečního svitu na panely se začala pokrývat spotřeba domácnosti a zároveň se začala dobíjet baterie. Při pokrytí spotřeby domácnosti, nabití baterie a ohřátí teplé vody v bojleru, se přebytečná energie začala posílat do veřejné sítě. S tím, jak poklesl sluneční svit se zároveň zvedla spotřeba elektrické energie z baterie a došlo k poklesu její kapacity.

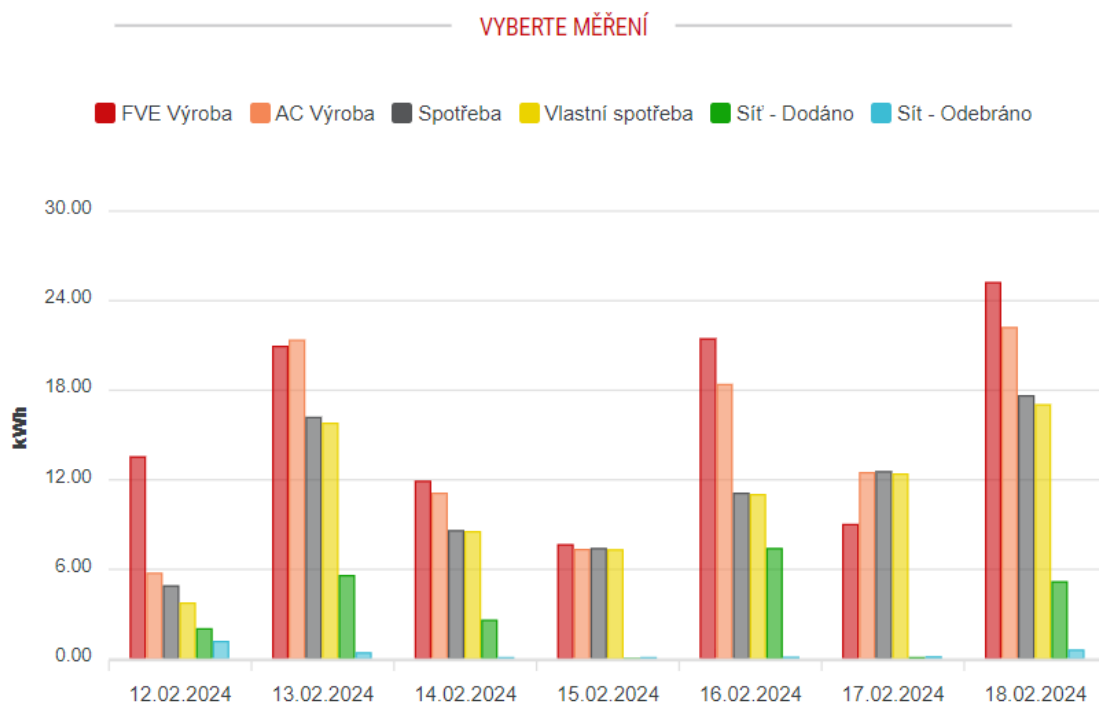
Obrázek 15 Průběh jednoho dne celkové výroby a spotřeby elektřiny



Zdroj: <https://rct-portal.com/cs>

Na sloupcovém grafu, který je znázorněn na obrázku 15, jsou zobrazeny hodnoty v absolutním množství za jeden den.

Obrázek 16 Týdenní průběh fungování elektrárny



Zdroj: <https://rct-portal.com/cs>

Tento graf, na obrázku 16, znázorňuje týdenní průběh fungování elektrárny. S tímto časovým úsekem bylo také uvažováno v modelu. Graf je tvořen několika sloupci, které vyjadřují absolutní množství jednotlivých proměnných během jednoho týdne, tyto hodnoty se následně sečetly a vytvořily samostatné hodnoty, které vyjadřovaly týdenní průběh.

Dalším elektroměrem, který zaznamenával spotřebu, je elektroměr u bojleru. Jeho spotřeba se v rámci elektrárny počítala do spotřeby domácnosti, ale pro fungování modelu bylo potřeba tyto data oddělit a rozlišovat. Následující obrázek znázorňuje graf s neupravenými daty z elektroměru. V jednotlivých bodech je znázorněn celkový odběr energie za jeden den.

Aplikace elektrárny zaznamenávala dané hodnoty uvedené v tabulce č.1 v rozmezí časového úseku 5 minut. Toto časové rozmezí bylo pro model těžko zpracovatelné, jelikož byl počítán průběh celého roku, byla použita data v rozmezí týdnů. Obrázek č. 17 znázorňuje datový soubor před úpravami.

Obrázek 17 Ukázka dat z elektrárny v 5minutovém časovém úseku

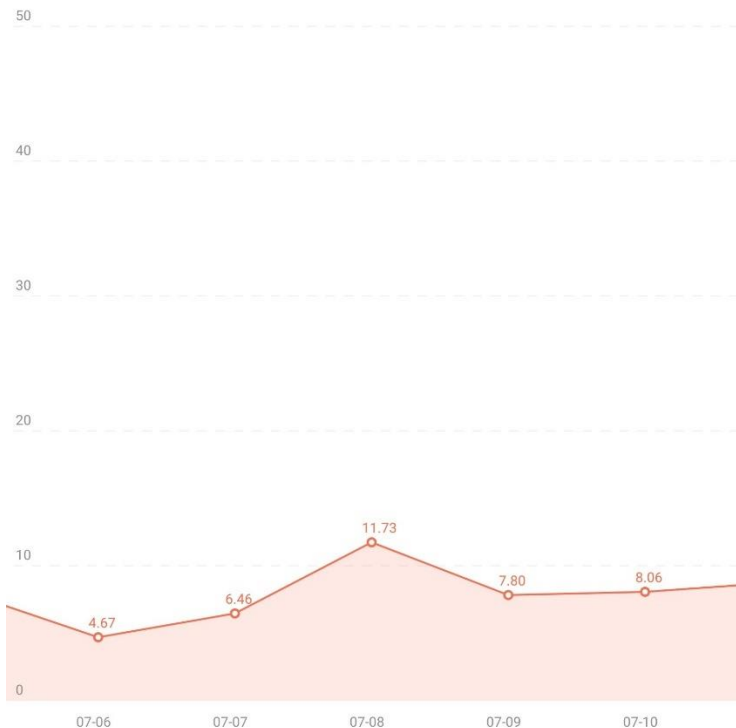
	A	B	C	D	E	F	G
1	category,Celkem FVE,Celkem AC,Spotřeba,Baterie,Sít,SOC,Externí výkon						
2	17.02.2024 00:00	0,0.08	0.08	0.09	0.01	79,	
3	17.02.2024 00:05	0,0.08	0.08	0.09	0,79,		
4	17.02.2024 00:10	0,0.06	0.06	0.08	0,79,		
5	17.02.2024 00:15	0,0.06	0.06	0.08	0,79,		
6	17.02.2024 00:20	0,0.14	0.14	0.15	0,79,		
7	17.02.2024 00:25	0,0.05	0.05	0.08	0,78,		
8	17.02.2024 00:30	0,0.05	0.05	0.08	0,78,		
9	17.02.2024 00:35	0,0.12	0.12	0.13	0,78,		
10	17.02.2024 00:40	0.01	0.22	0.22	0.22	0,78,	
11	17.02.2024 00:45	0,0.05	0.05	0.07	0,78,		
12	17.02.2024 00:50	0,0.05	0.05	0.07	0,78,		
13	17.02.2024 00:55	0,0.05	0.05	0.08	0,78,		
14	17.02.2024 01:00	0,0.05	0.05	0.07	0,78,		
15	17.02.2024 01:05	0,0.14	0.14	0.15	0,78,		
16	17.02.2024 01:10	0,0.05	0.05	0.08	0,78,		

Zdroj: <https://rct-portal.com/cs>

4.1.3 Zpracování dat z elektroměru bojleru

Následující kapitola popisuje zpracování dat z elektroměru, který měřila spotřebu elektrické energie. Tato energie vždy pocházela z vlastní výroby a nebylo tedy možné, aby byl bojler napájen z veřejné sítě. Zpracovaná data jsou sledována v průběhu jednoho roku od 1.5 2022 do 30.4 2023.

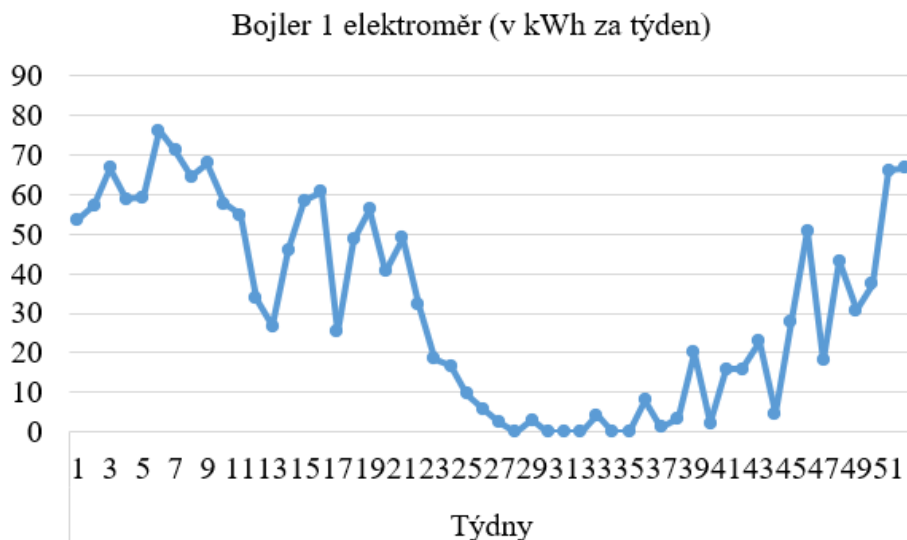
Obrázek 18 Ukázka dat z elektroměru Bojleru 1



Zdroj: <https://nedis.cz/cs-cz/smartlife>

Obrázek č. 15 znázorňuje datový soubor před úpravami. Data z tohoto grafu byla potřeba upravit tak, aby znázorňovala týdenní průběh spotřeby, který je optimální pro použití v modelu.

Obrázek 19 Graf měřených dat spotřeby elektřiny Bojleru 1



Zdroj: vlastní zpracování

Na obrázku 19 je graf spotřeby elektroměru bojleru 1. Na ose x jsou znázorněny jednotlivé týdny a na ose y jsou jednotky v kWh. Když se data z elektroměru, která měřila spotřebu energie bojleru promítla do grafu, šlo pozorovat průběh spotřeby vyrobené elektrické energie během celého měřeného období (1.5.2022–30.4.2023). Na začátku a na konci grafu jsou vyjádřeny zimní týdny, a tudíž nižší úroveň slunečního záření, které také svítí pod menším úhlem a kratší dobu, vzhledem k naší zeměpisné šířce a délce. Maxima dosahuje graf během letních týdnů, a to zejména v červenci a srpnu, ačkoliv v srpnových týdnech lze vidět propad, který je způsoben tím, že dům nikdo v té době neobýval, a tudíž bylo nevhodné bojler vytápět. Výkyvy nebyly dány jen intenzitou slunečního záření, ale také množstvím spotřebované vody. Tyto výkyvy ve výsledku nenesou na domácnost žádné následky, jelikož se bojler ohřál pomocí parovodu (horkovodu).

4.1.4 Zpracování dat parovodu (horkovodu)

Aby bylo možné pracovat s hodnotami tepla z parovodu, které byla vedené v MG, bylo nutné tyto hodnoty převést na kWh. Roční spotřeba činila 25 MG.

$$1 kWh = 3,6 MJ$$

Rovnice 5

$$\frac{25000}{3,600} = 6945 kWh$$

Rovnice 6

Při výrobě tepla z elektřiny bylo zapotřebí si uvědomit ztráty, protože zde nebyla 100% účinnost. Při výrobě tepla z elektřiny docházelo asi k 98,5 % účinnosti, ale při převodu byla tato skutečnost zanedbána, jelikož distribuované teplo skrze parovod mělo od svého měřiče až do bojleru, distribuci skrze měděné trubky v místnosti, která nebyla standardně vytápěna a docházelo tak také ke ztrátám. Výsledné účinnosti byly tedy zanedbány.

Při výpočtu množství tepla z parovodu bylo zapotřebí znát jednotlivé týdenní hodnoty během celého roku. Takovýmto elektroměrem, který by tyto hodnoty měřil domácnost nedisponovala, jelikož toto zařízení je v kompetenci poskytovatele tepla. Proto byl vypočítán průměr tohoto množství spotřebovaného tepla za týden na základě informací o roční spotřebě tepla a na základě používání parovodu. Jelikož bylo přes léto elektrické energie dostatek, nebylo za potřebí mít parovod puštěn. Ten byl puštěn od října až do konce dubna, podle potřeby. Systém fungoval na principu toho, že když energii nedodala do bojlerů během dne elektrárna, tak během 19-21 hodiny se bojler 1 ohřál z parovodu. Z letních hodnot byl vypočítán průměr bojleru 1 a ten činil 55,06 kWh za týden jako spotřebu pro ohřev užitkové vody v bojleru 1. Takže v období mezi říjnem 2022 a dubnem 2023 byla každý týden tato hodnota ponížena o hodnoty z elektroměru, který byl navázán na bojler 1 a skrze něho i napájen, o tom samém týdnu.

Bojler 2 byl vyhříván především parovodem, jelikož má přes zimu mnohem větší spotřebu než bojler 1. Přes léto zase minimální, protože se v domácnosti topí minimálně. Při jeho

výpočtu byl použit odpočet celkového množství použitého tepla a množství tepla spotřebovaném v bojleru 1. Tato hodnota činila 5 698 kWh. Tuto hodnotu bylo nutné převést do používaného období. Byl zde použit průměr, který činí 203,5 kWh za týden.

Obrázek 20 Ukázka zpracovaných dat z elektroměrů elektrárny a bojlerů 1 a 2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	týden	Celkem FVE	AC výroba	Spotřeba	Vlastní spotřeba	Sít dodáno	Sít odebráno	boiler 1 elektroměr	boiler 1 parovod	boiler 2 parovod			
2	1	75,66	35,46	74,92	53,2	12,99	21,61	7,94	47,12			203,5	
3	2	18,51	16,28	58,44	14,06	2,22	44,39	1,21	53,85			203,5	
4	3	27,22	21,93	47,86	20,48	1,45	27,38	3,45	51,61			203,5	
5	4	18,52	14,79	47,51	14,74	0,05	32,76	20,03	35,03			203,5	
6	5	6,01	3,96	66,94	3,95	0,01	62,99	2,09	52,97			203,5	
7	6	38,8	26,55	71,46	25,73	0,82	45,73	15,79	39,27			203,5	
8	7	101,41	95,7	78,86	70,33	25,37	8,52	15,79	39,27			203,5	
9	8	78,52	74,22	61,26	60,65	13,57	0,61	22,79	32,27			203,5	
10	9	171,57	166,91	102,01	92,76	74,15	9,25	4,6	50,46			203,5	
11	10	62,75	57,39	76,78	42,27	15,12	34,51	27,96	27,1			203,5	
12	11	177,56	164,98	151,45	141,89	23,09	9,55	50,85	4,21			203,5	

Zdroj: vlastní zpracování

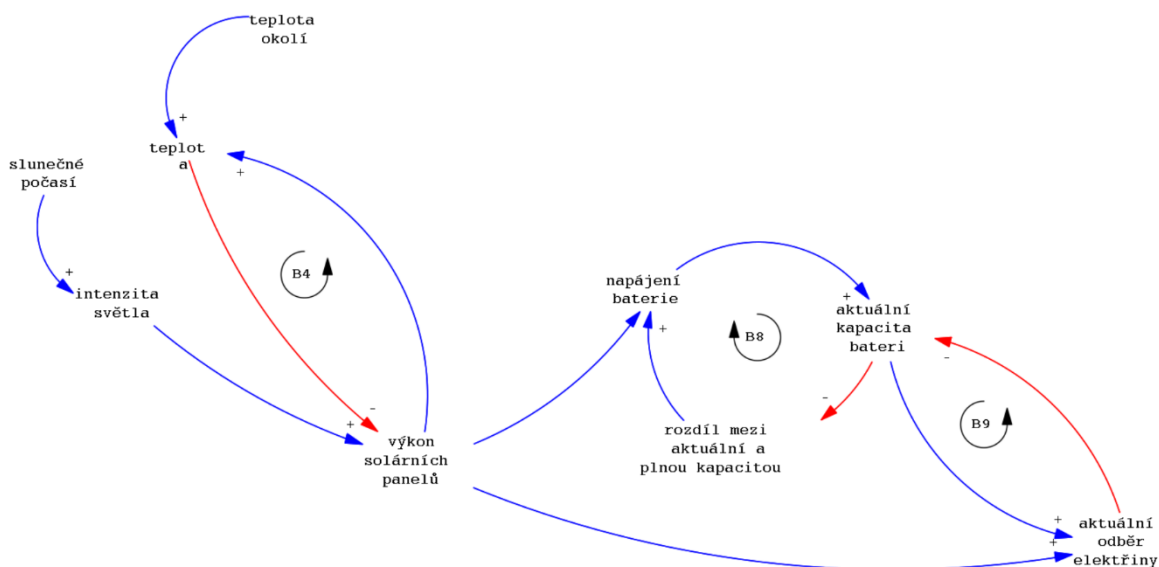
Na obrázku číslo 19 je ukázka vzorku dat po úpravě, je zde znázorněn začátek roku 2023. Jsou zde data z elektrárny tak i z dalších elektroměrů v domácnosti, která byla použita v modelu.

4.2 Vytváření modelu

4.2.1 Tvorba příčinně smyčkového diagramu

Před samotným vyvážením diagramu stavů a toků (SFD), byl vytvořen příčinně smyčkový diagram (CLD). Tento diagram sloužil k lepšímu pochopení problematiky a k identifikování zpětnovazebných smyček. K proměnným se nepřirazovali číselné hodnoty.

Obrázek 21 Základní příčinně smyčkový diagram

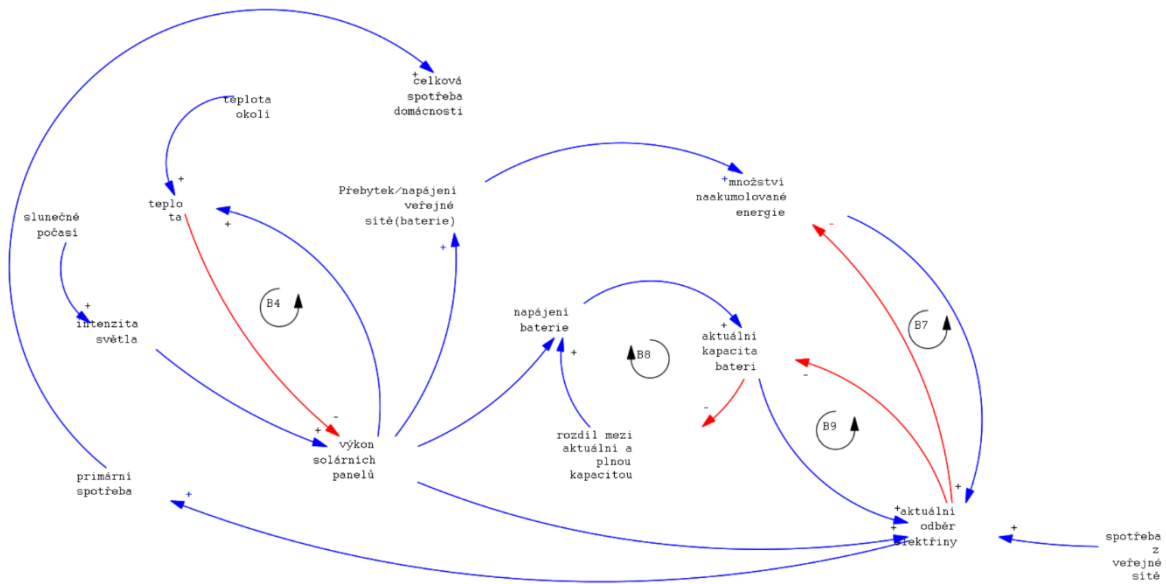


Zdroj: vlastní zpracování

Základem modelu byla tvorba samotné elektrické energie z fotovoltaické elektrárny, její následná distribuce a spotřeba. Samotnou tvorbu energie ovlivňuje hlavně to, kolik světelné energie dopadne na fotovoltaické panely. Tuto okolnost dokáže ovlivnit hlavně počasí a určitou mírou i teplota, jelikož s rostoucí teplotou klesá účinnost solárních panelů.

Primárně se vyrobená energie distribuuje do aktuální spotřeby, jelikož tak je dosaženo největšího užitku, a také celkového efektu. Sekundární cíl je napájení akumulátoru (Baterie). Při jejím nabíjení dochází ke ztrátám a také je potřeba počítat s tím, že má omezený počet nabíjecích cyklů, a proto je podřazena aktuální spotřebě. Její cyklus vyjadřuje smyčka číslo 8 na obrázku 21. Je zde znázorněno její nabíjení a následné vybíjení. Tyto dvě skutečnosti se odvíjí od výkonu solárních panelů a aktuální spotřeby v domácnosti, jenž je znázorněna ve smyčce číslo 9. Baterie má také omezenou kapacitu, a to je v tomto případě 11,5 kWh.

Obrázek 22 Rozšíření příčinně smyčkového diagramu



Zdroj: vlastní zpracování

Graf na obrázku 22, znázorňuje další proměnné. Když je pokryta spotřeba domácnosti a kapacita baterie je plná, dalším terciálním odběrným místem jsou bojler (jsou znázorněny na obrázku 23). Následným odběrným místem (kvartálním) je veřejná síť. Tato možnost distribuce má nejmenší účinnost, jelikož funguje na principu takzvané „virtuální baterie“. Funguje to na principu přeposílání přebytku elektrické energie do veřejné sítě a dané množství energie se počítá. V den, kdy solární elektrárna nedokáže pokrýt spotřebu domácnosti, lze tuto energii čerpat zpět za podmínek sjednané s poskytovatelem elektrické energie čerpané z veřejné sítě. V tomto případě se dala elektrická energie z „virtuální baterie“ zpět odkoupit přibližně za poloviční cenu, než je sjednaná cena vysokého tarifu za 1 kWh od poskytovatele elektrické energie z veřejné sítě.

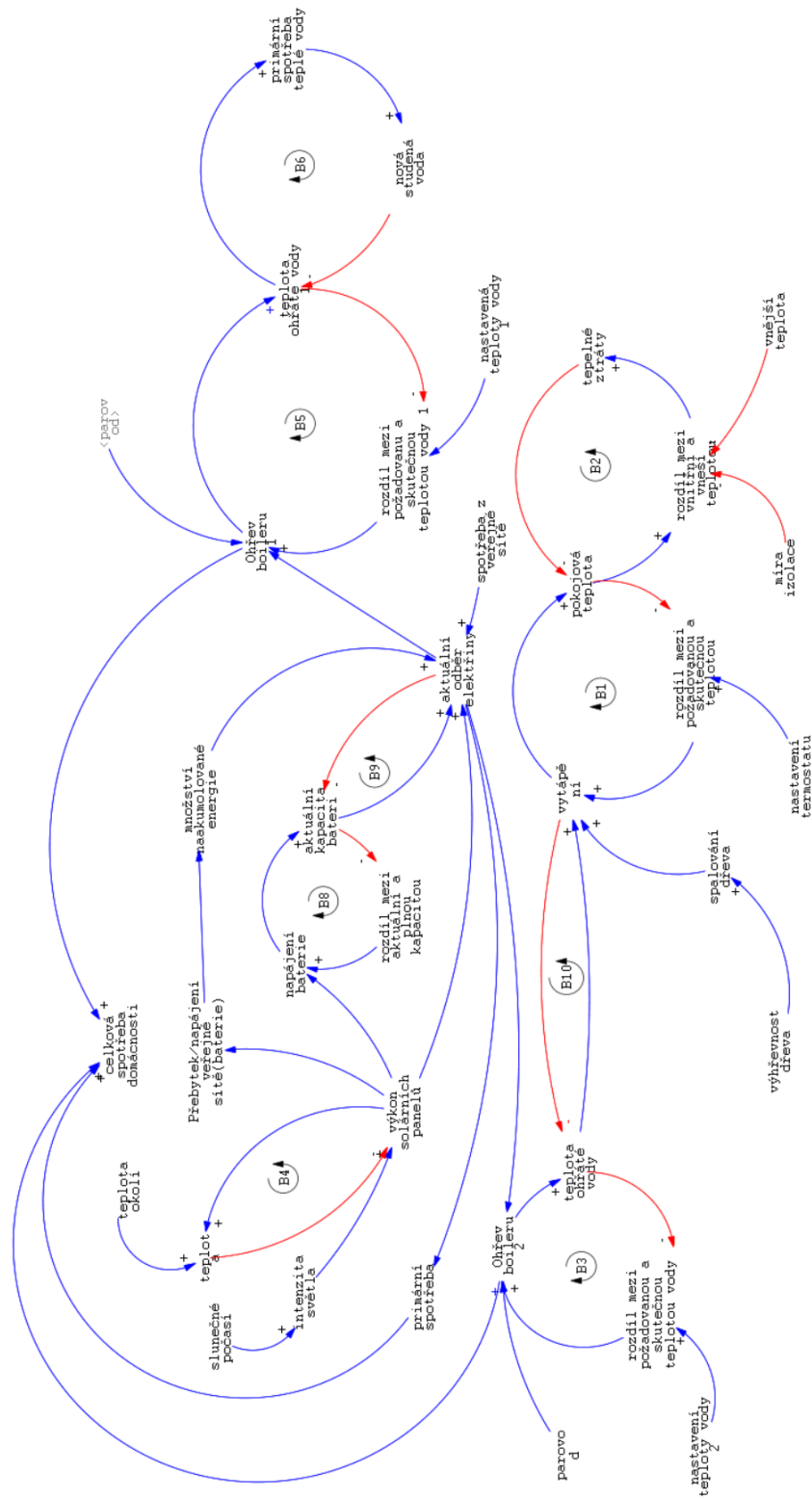
Graf na obrázku 23, znázorňuje i terciální spotřebiče vyrobené elektrické energie. Tyto spotřebiče neboli dva bojler, které jsou určeny k vytápění domácnosti a ohřívání užitkové vody.

4.2.2 Fungování ohřevu bojlerů a tepla v domácnosti

Na obrázku 23, který znázorňuje fungování popisovaného systému solární elektrárny jsou znázorněny další proměnné a to bojler 1 a 2 a vyhřívání domácnosti. V bojlerch se přeměňuje elektrická energie na tepelnou a tím se ohřívá voda v bojlerch (tuto skutečnost

znázorňují smyčky B3 a B5). Tato voda může být použita jako užitková voda (sprcha, mytí nádobí) jakož tomu je u bojleru 1 (smyčka B6). V bojleru 2 se voda ohřívá, aby se následně toto teplo distribuovalo skrze výměník (smyčka B11) do topení v domě a tím udržovalo nastavenou teplotu v domácnosti za použití termostatu (smyčky B1 a B2). Dané bojleru mají i sekundární způsob ohřívání, kterým je parovod, ten dokáže ohřívát dané bojleru za použití výměníků tepla z páry nebo horké vody (horkovod), který vede z elektrárny až k jednotlivým domům skrze potrubí. Tento způsob ohřívání je levnější než ohřev vody pomocí elektřiny z veřejné sítě a virtuální baterie, ale je dražší než elektřina z fyzické baterie nebo přímo distribuovaná se solárních panelů. (Za normálních podmínek bojleru nebyly napájeny z baterie.) Takže použití parovodu dává smysl jen tehdy, když je výkon solárních panelů nižší, než je spotřeba bojleru 1 anebo 2, jelikož se nenapájí dohromady, ale postupně a bojler 1 má prioritu.

Obrázek 23 Celý příčinně smyčkový diagram znázorňující zkoumanou problematiku



Zdroj: vlastní zpracování

V domácnosti se využívá k udržování tepla i kamna, jenž spalují bukové dřevo. Tato metoda vyhřívání je velmi účinná a poměrně levná, ale k jejím nevýhodám patří způsob distribuce tepla. Kamna jsou umístěna uprostřed domu, a tak dochází jen k pomalé distribuci tepla do dalších místností skrze přístupové cesty a zdi. Tato možnost tvorby tepla nebyla v SFD modelu uvažována a domácnost mohla fungovat i bez ní, tak jak je to znázorněno na obrázku 27.

V grafu je také znázorněna proměnná celková spotřeba v domácnosti, která znázorňuje veškerou spotřebovanou elektrickou energii v domácnosti.

4.2.3 Popis zpětnovazebných smyček

Vyvažující zpětnovazebné smyčky

B1 – Tato smyčka vyjadřuje vztah mezi vytápěním, pokojovou teplotou a rozdílem mezi požadovanou a skutečnou teplotou. Čím je pokojová teplota menší tím je rozdíl mezi požadovanou a skutečnou teplotou větší a tím více se musí vytápět a toto vytápění mění pokojovou teplotu.

B2 – V této smyčce na sebe působí pokojová teplota, která působí na rozdíl mezi vnitřní a vnější teplotou. Tento rozdíl je ovlivněn mírou izolace a vnější teplotou. Z toho plynou tepelné ztráty, které ochlazují (snižují) pokojovou teplotu.

B3 – Tato smyčka vyjadřuje vztah mezi ohřevem bojleru 2, který navyšuje teplotu vody v bojleru 2. Tato ohřátá voda se bude ohřívat tak dlouho dokud bude existovat rozdíl mezi požadovanou a skutečnou teplotou vody v bojleru 2, která je nastavená pomocí termostatu, který není součástí smyčky.

B4 – Pomocí této smyčky lze vyjádřit vztah mezi výkonem solárních panelů a teplotou solárních panelů. Čím větší je teplota solárních panelů, tím menší je jejich účinnost. Tato teplota se zvedá zejména z důvodu teploty okolí, ale také ze samotné funkčnosti solárních panelů.

B5 – V této smyčce je vyjádřen vztah mezi ohřevem vody v bojleru 1, který navyšuje teplotu v bojleru 1 a tato teplota působí na rozdíl mezi požadovanou a skutečnou teplotou vody (nastavení požadované teploty pomocí termostatu). To způsobuje, že voda se bude ohřívat tak dlouho, dokud bude tento rozdíl existovat.

B6 – Tato smyčka vyjadřuje vztah, kdy teplota ohřáté vody odtéká do domácí spotřeby (sprcha, mytí nádobí), a místo ní přitéká studená voda, která snižuje teplotu ohřáté vody v bojleru 1.

B7 – Pomocí této smyčky je vyjádřen vztah, kde na sebe působí aktuální spotřeba v domácnosti a množství naakumulované energie ve virtuální baterii. Čím větší je tato spotřeba tím menší je kapacita virtuální baterie. Pro znázornění a pochopení je zde tato smyčka navázána stejně jako smyčka B8. V grafu a v realitě tyto smyčky nefungují současně. Vždy je preference nejdříve vyčerpat energii z baterie a pak až z virtuální baterie. Tato skutečnost je vysvětlena v diagramu stavů a toků.

B8 – V této smyčce je vyjádřen vztah dobíjení baterie. Ze solárních panelů se napájí baterie. To působí na aktuální kapacitu baterie, která zase působí na rozdíl mezi aktuální a plnou kapacitou baterie. Baterie se bude nabíjet do té doby, dokud bude tento rozdíl existovat.

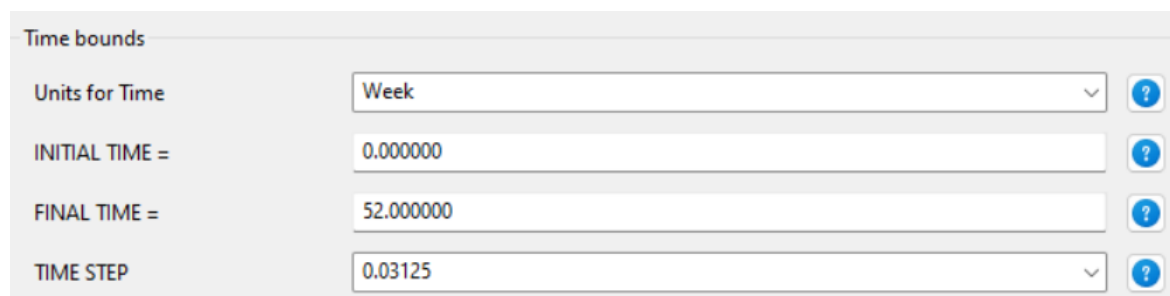
B9 – Tato smyčka vyjadřuje vztah mezi kapacitou baterie a aktuálním odběrem elektřiny (v domácnosti). Čím větší je spotřeba elektřiny z baterie, tím menší bude její kapacita.

B10 – Čím více vytápím tím více beru tepla z ohřáté vody v bojleru 2 a tím více se ochlazuje ohřátá voda.

4.3 Diagram stavů a toků

4.3.1 Nastavení modelu

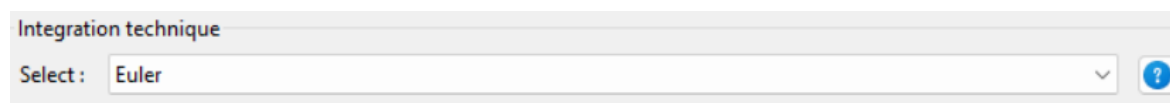
Obrázek 24 Nastavení modelu v programu Vensim PLE



Time bounds	
Units for Time	Week
INITIAL TIME =	0.000000
FINAL TIME =	52.000000
TIME STEP	0.03125

Zdroj: vlastní zpracování

Obrázek 25 Nastavení modelu v programu Vensim PLE



Integration technique	
Select :	Euler

Zdroj: vlastní zpracování

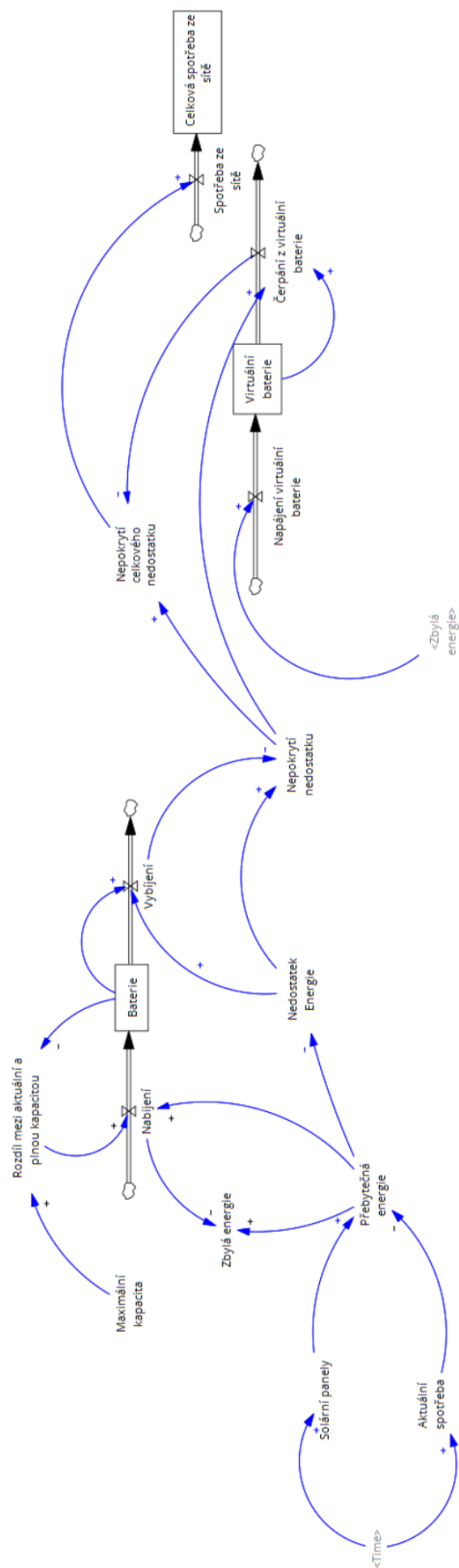
Před samotným vytvářením modelu bylo rozhodnuto použít následující nastavení modelu. Vyjadřují obrázky 24 a 25. Toto nastavení se nazývá „Time bounds“, které lze přeložit jako časové hranice. „Units for Time“, v češtině vyjadřuje časovou jednotu. Jelikož je model

počítán v 52 týdnech, tak tato jednotka odpovídá týdnu („Week“). Další položkou je „INITIAL TIME“, který v češtině lze vyjádřit jako počáteční čas, ten byl nastaven na hodnotu 0. „FINAL TIME“, jenž lze přeložit jako finální čas, byl nastaven na hodnotu 52, jelikož měříme průběh celého jednoho kalendářního roku, který má standardně 52 týdnů. „TIME STEP“, lze přeložit jako časový krok. Tato položka vyjadřuje po jak velkých časových úsecích bude model postupovat. Zde byla nastavena hodnota 0,03125. Následujícím bodem v nastavení modelu je „Integration technique“, které se překládá jako metoda integrace. Zde je výchozí nastavení typu „Euler“ neboli Eulerova metoda. Jedná se o metodu prvního řádu. Tato metoda je přímočará. Další bod odhadne díky rychlosti změny v aktuálním bodě.

4.3.2 Diagram stavů a toků (SFD)

V návaznosti a na základě příčinně smyčkového diagramu (CLD), byl sestaven SFD model solární elektrárny a jejích elementů s cílem na její ekonomické vyhodnocení. Samotný systém elektrárny může být i rozsáhlejší, ale tyto proměnné už nepůsobí na ekonomickou stránku věci nebo jen minimálně. Některé proměnné musely být pozměněny, aby lépe vystihovaly skutečnost a navazovaly na funkčnost modelu. Změny budou v následující kapitole popsány a zdůvodněny.

Obrázek 26 Základní struktura diagramu stavů a toků



Zdroj: vlastní zpracování

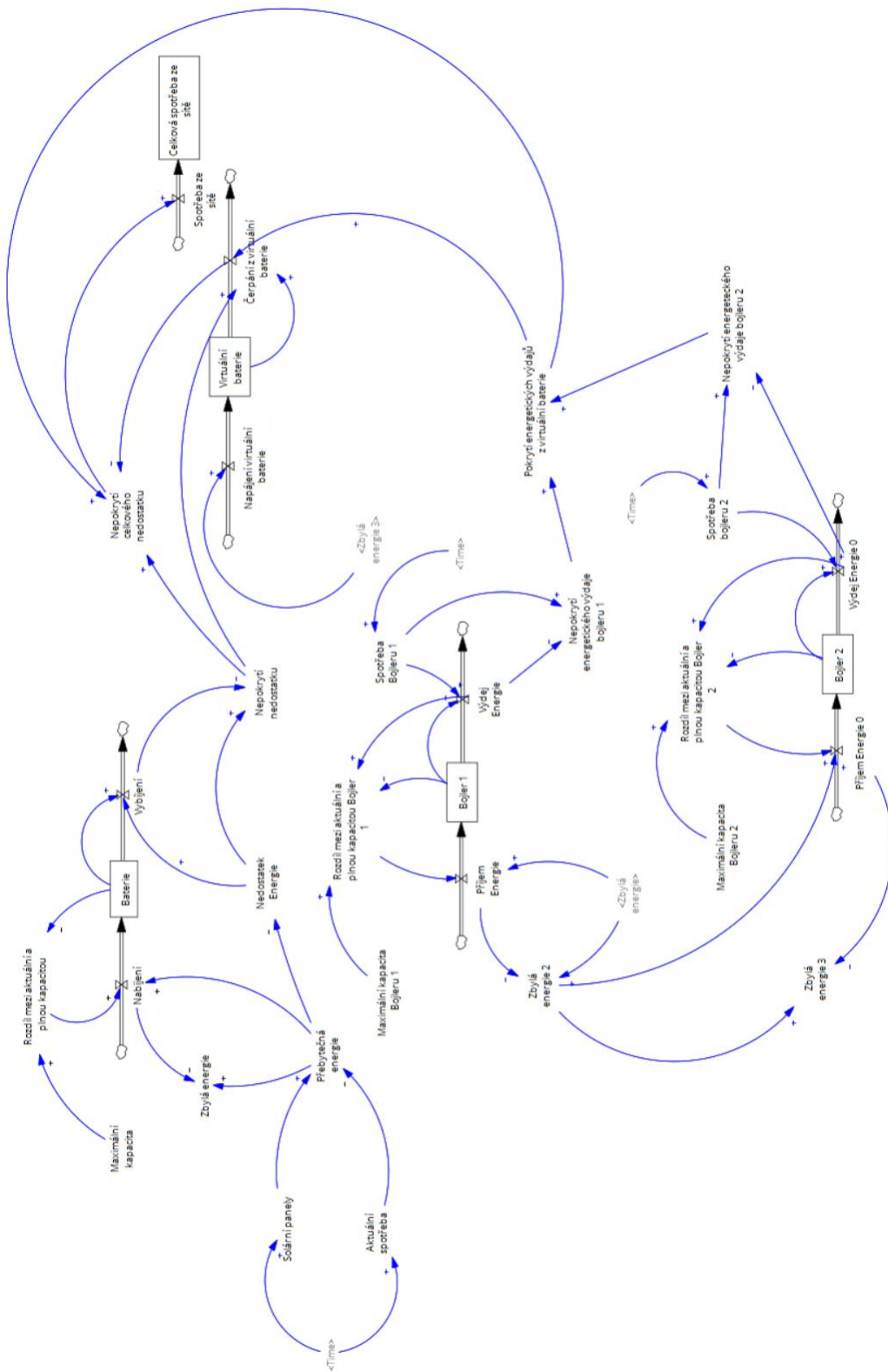
Jako u CLD modelu tak u diagramu stavů a toků je nejdříve za potřebí popsat základní strukturu fungování elektrárny. Ta je znázorněna na obrázku 26. Je zapotřebí si uvědomit jednotlivé priority, které zde jednotlivé moduly mají. Základním kamenem je aktuální spotřeba, to je primární úkol elektrárny, aby pokud je výkon solárních panelů dostačující, napájela aktuální spotřebu domácnosti. Když je tato spotřeba pokryta anebo když je výkon větší než spotřeba, přebytečná energie proudí do baterie. Ta má omezenou kapacitu a nelze jí nabíjet do nekonečna. Její fyzická kapacita je 11,5 kWh. Jelikož měříme týdenní cykly musíme tuto spotřebu vynásobit 7. Během dne může dojít k situaci, že se baterie nabíjí, pak vybijí a pak zase nabíjí. Tuto skutečnost zde bude simulovat navýšení kapacity o 1 kWh. Tato situace nastává zřídka a pro potřeby modelu je navýšení dostačující, takže výsledná týdenní kapacita bude 87,5 kWh.

Vysvětlení jednotlivých proměnných

Solární panely, které jsou vázány na **TIME**, vyrábí elektrickou energii ta jde do proměnné **Přebytečná energie**. **Aktuální spotřeba**, která je také vázána na **TIME**, působí negativně na proměnnou **Přebytečná energie (Solární panely-Aktuální spotřeba)** a tím vyjadřuje spotřebu energie ze **Solárních panelů**. Když je **Přebytečná energie** kladná proudí tyto přebytky do toku **Nabíjení**. Tento tok je vyjádřen následovně (**min(max(Přebytečná energie,0),Rozdíl mezi aktuální a plnou kapacitou)**). Tok **Nabíjení** je napojen na stavovou jednotku **Baterie**. Baterie se nabíjí tak dlouho dokud není naplněna její kapacita. Tento vztah je vyjádřen proměnnou **Rozdíl mezi aktuální a plnou kapacitou**, který je vyjádřen v modelu následovně (**Maximální kapacita -Baterie**). Tato proměnná je ovlivněna proměnnou **Maximální kapacita**, která je nastavená na hodnotu 84 kWh. Když je proměnná **Přebytečná energie** záporná, tak dochází k nedostatku energie, jenž je vyjádřena proměnnou **Nedostatek energie**, která je vyjádřena následovně (**-(min(0,Přebytečná energie))**). V takovém případě primárně dochází k čerpání energie z baterie. Tudíž proměnná **Nedostatek energie** působí na tok **Vybíjení**. Tok **Vybíjení** je vyjádřen takto (**min(Baterie,Nedostatek Energie)**). Když nedojde k plnému pokrytí spotřeby z baterie, dochází k nepokrytí nedostatku, jenž je vyjádřen proměnnou **Nepokrytí nedostatku**. Tato proměnná je v modelu vyjádřena jako (**Nedostatek energie-vybíjení**). V tomto momentu se energie začne čerpat z virtuální baterie, která má naakumulované určité množství energie. Její kapacita je neomezená. Lze z ní čerpat jen tolik, kolik do ní bylo dodáno energie v době přebytků energie. Virtuální baterie je v modelu složena ze stavu **Virtuální Baterie**

(**Napájení virtuální baterie** minus **Čerpání z virtuální baterie**), toku **Nabíjení virtuální baterie**, který vede do stavu **Virtuální baterie** a toku, který odvádí energie z **Virtuální baterie** s názvem **Čerpání virtuální baterie** ($\min(\text{Virtuální baterie}, \text{Nepokrytí nedostatku} + \text{pokrytí energetických výdajů z virtuální baterie})$). Tok **Nabíjení virtuální baterie** je doplňován ze **Zbylé energie**. Když ani **Virtuální baterie** nedokáže pokrýt energetický požadavek domácnosti, začne se energie čerpat se sítě od poskytovatele za plnou cenu. Součet nepokrytých energií je v modelu nazván jako **Nepokrytí celkového nedostatku**, v modelu je vyjádřen touto rovnicí (**Nepokrytí nedostatku** + **pokrytí energetických výdajů z virtuální baterie**-**Čerpání z virtuální baterie**). Tato proměnná má pak vazby na tok **Spotřebu ze sítě** a následně na stav **Celková spotřeba ze sítě**.

Obrázek 27 Celý diagram stavů a toků



Zdroj: vlastní zpracování

Na obrázku číslo 27 je již zobrazen celý model i s bojleru 1 a 2. Je zde znázorněna i jejich soustava. Její popis fungování v modelu je následovný. Když je pokryta aktuální spotřeba domácnosti a následně je plně dobítá baterie, zbylá energie se přemístí do proměnné **Zbylá energie** tato proměnná je v modelu počítána jako $((\max(0, \text{Přebytečná energie}) - \text{Nabíjení}))$. Tato proměnná je takto ošetřena, protože nemůže být záporná. Proměnná **Zbylá energie** dále napájí energií bojler 1. Konstrukce bojleru 1 a bojleru 2 jsou prakticky stejné jako konstrukce baterie. Proměnná **Zbylá energie** vede vazbu na tok **Příjem energie** $(\min(\text{Zbylá energie}, \text{Rozdíl mezi aktuální a plnou kapacitou Bojler 1}))$. Ten vede na stav **Bojler 1**. V případě, že zbyde nějaké množství energie, je vedena pozitivní vazba z proměnné **Zbylá energie** na proměnnou **Zbylá energie 2**. Na ní také vede negativní vazba z toku **Příjem energie**, ten znázorňuje množství energie, kterou vyčerpá z proměnné **Zbylá energie**. Jelikož má Bojler 1 omezenou kapacitu je zde proměnná **Rozdíl mezi aktuální a plnou kapacitou Bojleru 1**, ta je znázorněna v modelu následovně $(\text{Maximální kapacita Bojleru 1} - \text{Bojler 1} + \text{Výdej Energie})$. Na ní je navázána **Maximální kapacita Bojleru 1**. Tato kapacita byla nastavena na hodnotu 77 kWh. Je nutné si uvědomit, jak se v tomto modelu pracuje s kapacitami. Jsou zde časové úseky po 1 týdnu. Tudiž jsou maximální kapacity nastaveny tak, aby pokryly největší spotřebu, jaká byla zaznamenána. Jde o nuanci toho, že během dne člověk nemusí využít ani fyzickou kapacitu bojleru. Ale může se stát, že bude potřebovat větší množství tepla. V takovém případě se bojler začne znovu ohřívat pokaždé když je z něj odebrána energie. To má za následek odběr tepla, který ve větší než jeho fyzická kapacita naakumulované energie, ale neznázorňuje to jeho ohřívací kapacitu, ta je mnohem větší. Ale ta v modelu také nemůže být použita, protože by neodpovídala realitě. Proto je v modelu využita kapacita, která odpovídá maximální reálné kapacitě, kterou člověk reálně schopen spotřeboval. Tok, který vede ze stavu **Bojler 1** se nazývá **Výdej energie** $(\min(\text{Bojler 1}, \text{Spotřeba Bojleru 1}))$. Na něj má vazbu proměnná **Spotřeba Bojleru 1**. Ta obsahuje reálná data z měřeného období bojleru 1 v rámci daných časových úseků. Z toku **Výdej Energie** vede vazba na nepokrytí energetického výdaje **Bojleru 1**. Tato proměnná znázorňuje množství energie, kterou nebylo možné pokrýt z aktuální vyrobené energie a je nutné je pokrýt z virtuální baterie anebo ze sítě. Soustava bojleru 2 je prakticky stejná jako u bojleru 1. Proměnná **Zbylá energie 2** napájí tok **Příjem energie 0**, který vede do stavu **Bojler 1**. **Bojler 1** je omezen proměnnou **Rozdíl mezi aktuální a plnou kapacitou Bojleru 2** a na ní je navázána **Maximální kapacita Bojleru 2**. Tato kapacita je jako u **Bojleru 1** omezena nejvyšší reálnou spotřebou a k ní je přičtena malá rezerva. Jeho

kapacita v modelu tedy činí 204 kWh. Spotřeba bojleru 2 je mnohem větší, protože vytápí domácnost a rozvádí teplo do okruhu topení. Proměnná **Zbylá energie 3**, na kterou má kladnou vazbu **Zbylá energie 2** a zápornou vazbu Příjem energie (kde se hodnoty těchto proměnných odečtou a zbyde zde kladné číslo nebo 0), znázorňuje proměnnou, která napájí virtuální baterii a má vazbu na tok **Napájení virtuální baterie**. Stav **Bojler 2 (Příjem Energie-Výdej Energie)** znázorňuje bojler 2 a na něj je napojen tok Výdej energie 0 ($\min(\text{Bojler 1}, \text{Spotřeba Bojleru 1})$). Ten má kladnou vazbu na proměnnou **Rozdíl mezi aktuální a plnou kapacitou Bojleru 2**. Na tok **Výdej energie 0** má kladnou vazbu proměnná **Spotřeba bojleru 2**, která znázorňuje reálnou spotřebu druhého bojleru v rámci měřeného období v daných týdenních jednotkách. **Spotřeba Bojleru 2** má kladnou vazbu na **Nepokrytí energetického výdaje Bojleru 2 (Spotřeba bojleru 2-Výdej Energie 0)**. Tok **Výdej energie 0** má zápornou vazbu na proměnnou **Nepokrytí energetického výdaje Bojleru 2**. V této proměnné je znázorněno množství energie, které musí pokrýt virtuální baterie anebo síť. Proměnné **Nepokrytí energetického výdaje Bojleru 1** a **Nepokrytí energetického výdaje Bojleru 2** mají obě kladné vazby na proměnnou **Nepokrytí energetických nedostatků v Bojlerech**, kde se tyto hodnoty sečtou. Následně proměnná **Nepokrytí energetických nedostatků v Bojlerech** má vazbu na tok **Čerpání z virtuální baterie**.

4.4 Ekonomické vyhodnocení jednotlivých scénářů

4.4.1 popis jednotlivých scénářů

Při sestavování jednotlivých scénářů byly využity ceny z ledna roku 2024. Je to z důvodu, že v roce 2022/23 byla vysoká inflace a na ceny působily státní dotace, které cenu ovlivnily natolik, že by výsledné hodnoty neměli takovou vypovídací hodnotu, jelikož by se promítly i do rentability a došlo by k velkému zkreslení.

Scénář číslo 1 (bez využívání solární elektrárny)

První scénář je založen na fungování domácnosti bez solární elektrárny a výhod z ní plynoucích. Kdyby solární elektrárna nebyla součástí domácnosti majitel by čerpal elektřinu, která by byla naceněna ze dvou tarifů, podle smlouvy, kterou by s poskytovatelem elektrické sítě uzavřel. Tato smlouva by byla aplikována na měřené období tedy období od května 2022 do dubna 2023. Je zapotřebí brát v úvahu, že bez solární elektrárny se spotřeba elektrické

energie využívala jiným způsobem. Určité spotřebiče byly nastaveny na levný tarif, který byl využíván v danou část dne (podle smlouvy), většinou v noci. Lze tedy říct, že spotřeba byla poměrně konstantní, ale je zapotřebí si uvědomit, že když se využívá solární elektrárna tak je vyrobená elektřina levnější (z virtuální baterie) nebo je i úplně zadarmo (fyzická baterie, aktuální vyrobená elektřina ze solárů), a tak má člověk tendenci daný zdroj více využívat.

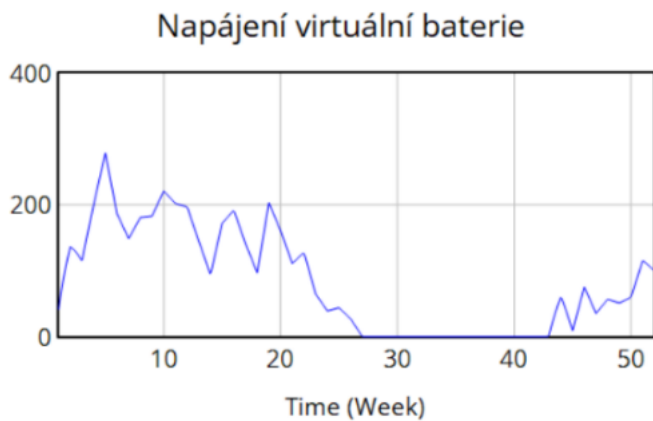
Vysoký tarif je za cenu 8,25 Kč za kWh a nízký tarif za 5,95 Kč. Tato cena je odvozena od smlouvy, kterou by majitel uzavřel, kdyby nevyužíval solární elektrárnu. Díky konstantní spotřebě nízkého tarifu, který je v průměru 1 277 kWh za rok, lze vypočítat i spotřebu ve vysokém tarifu. Toto množství spotřebované elektřiny v levném tarifu je odvozeno z minulých let fungování domácnosti před tím, než se postavila solární elektrárna. Od celkové spotřeby domácnost (bez spotřeby bojlerů) 4 498 kWh se odečte 1 277 kWh, které znázorňují spotřebu v nízkém tarifu. Výsledkem je 3 221 kWh, což je odvozená spotřeba ve vysokém tarifu za měřené období za předpokladu spotřeby domácnosti bez solární elektrárny. Při výpočtu ceny za elektřinu vynásobením ceny a množství jednotlivých tarifů a spotřeb byl zjištěn výsledek, že za sledované období by majitel domácnosti zaplatil **34 171 Kč** za elektrickou energii. Zároveň majitel zaplatil za 25 GJ tepla z parovodu při ceně 741,68 za GJ. Což je ve výsledku 18 542 Kč. V součtu majitel zaplatí za rok 52 713 Kč.

Scénář číslo 2 (s využíváním solární elektrárny a parovodu)

Při využívání solární elektrárny majitel má dva tarify. První tarif určuje cenu odebrané elektřiny ze sítě. Ta činí 8,25 Kč za kWh. Druhý tarif je ve výši 4,16 Kč za kWh a udává cenu za odebranou energii, kterou elektrárna poslala do sítě v době přebytku neboli fungování virtuální baterie. Zároveň je zde tarif za teplo (parovod) ten činí 741,68 Kč za MG. Což v přepočtu při spotřebě 25 GJ za rok vychází 18 542 Kč.

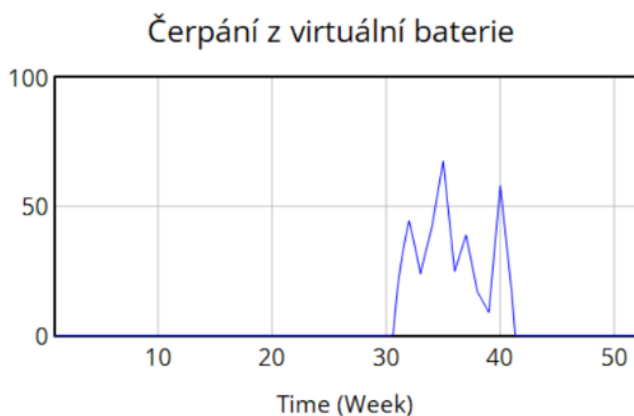
V tomto scénáři není čerpána energie ze sítě a jen v zimních měsících je čerpána energie z virtuální baterie ve výši 361 kWh za sledované období, protože víc soustava nepotřebovala využít. Za elektřinu majitel zaplatí při vynásobení spotřeby a sazby **1 502 Kč**. Celkově tedy majitel zaplatí při této spotřebě 20 044 Kč.

Obrázek 28 Graf průběhu napájení virtuální baterie v průběhu sledovaného období



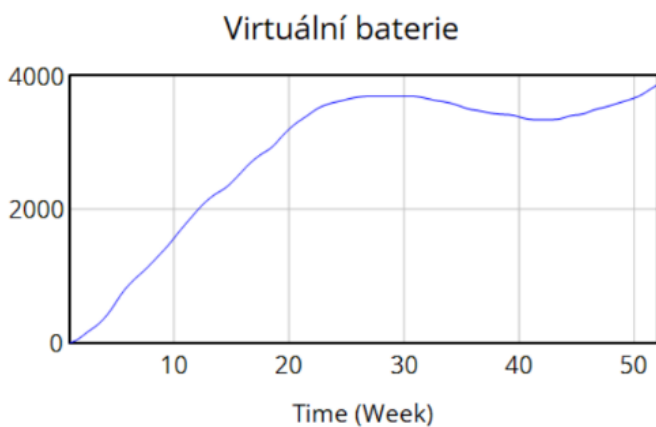
Zdroj: vlastní zpracování

Obrázek 29 Graf průběhu čerpání elektrické energie z virtuální baterie



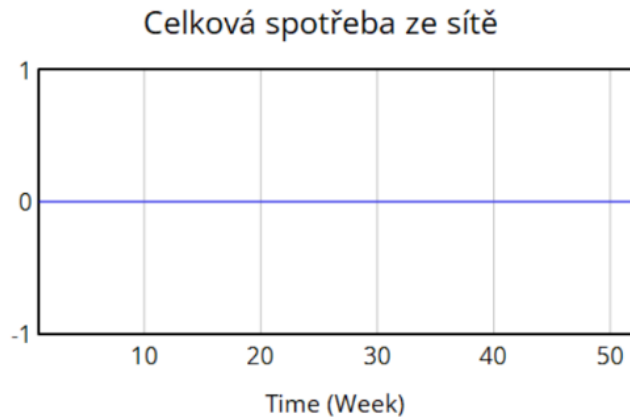
Zdroj: vlastní zpracování

Obrázek 30 Průběh akumulace elektřiny ve virtuální baterii



Zdroj: vlastní zpracování

Obrázek 31 Celková spotřeba ze sítě v průběhu sledovaného období



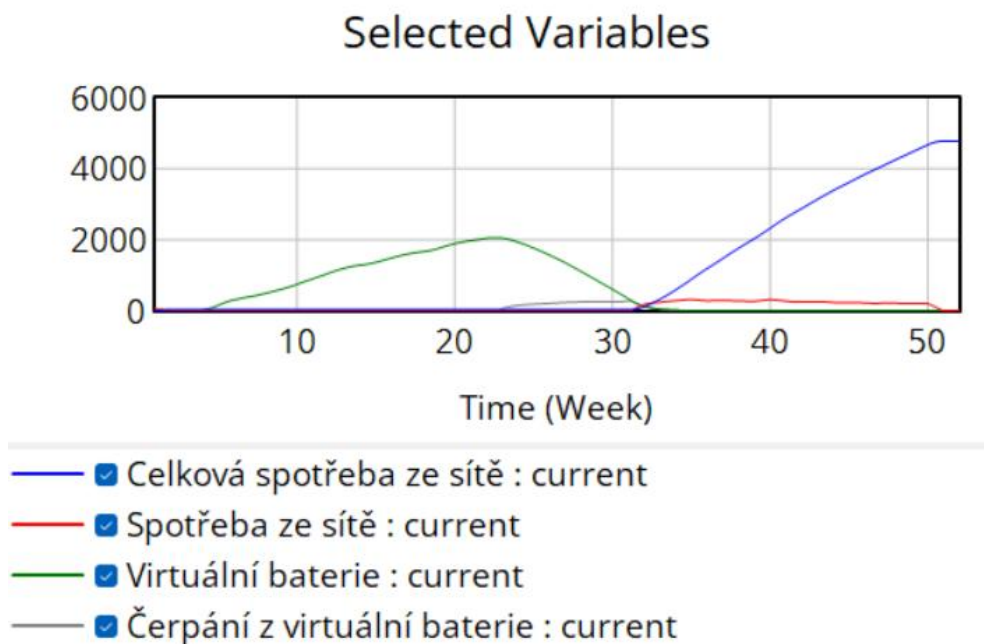
Zdroj: vlastní zpracování

Scénář číslo 3 (využití parovodu na nedostatek)

V tomto scénáři bude využit parovod na nedostatky v bojleru 1 a 2. Virtuální baterie a síť budou využity jen na aktuální spotřebu domácnosti.

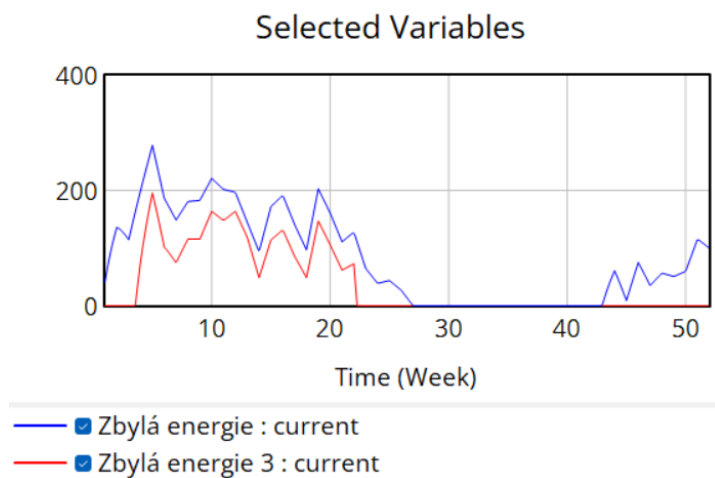
Ze scénáře číslo 2 víme, že aktuální spotřeba domácnosti čerpala z virtuální baterie 361 kWh za cenu 4,16 Kč za kWh. Což je **1 502 Kč**.

Obrázek 32 Graf průběhu akumulace a toků elektřiny



Zdroj: vlastní zpracování

Obrázek 33 Graf s křivkami průběhu Zbylé elektřiny a Zbylé elektřiny 3



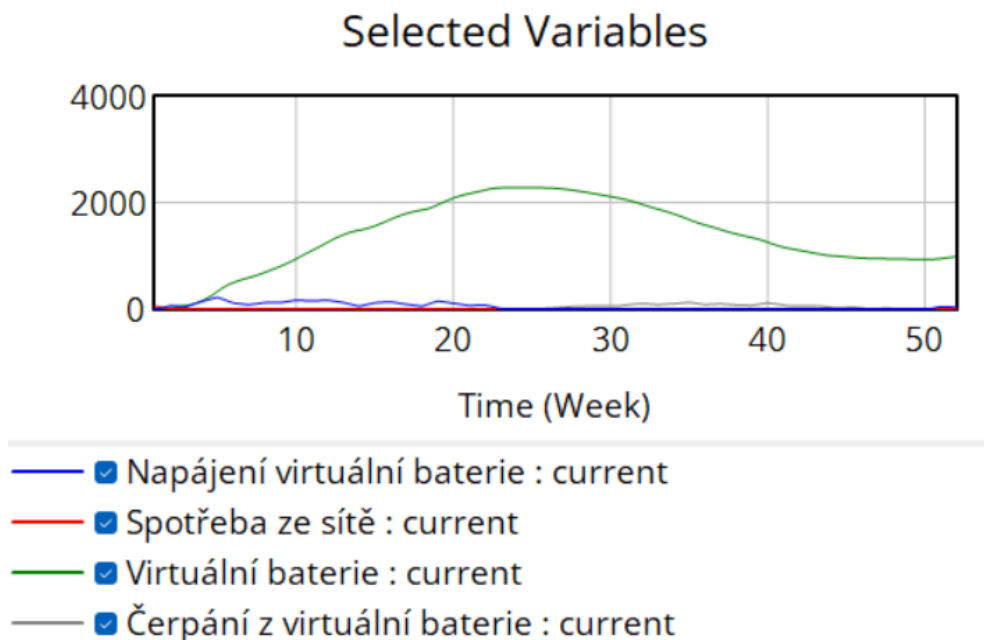
Zdroj: vlastní zpracování

Z grafu na obrázku 33 lze vyčíst spotřebu z virtuální baterie a sítě. Po odečtení 361 kWh z celkového množství energie ve virtuální baterii, zjistíme množství energie, kterou spotřebovali bojler 1 a bojler 2. Tuto energii pak převedeme na GJ a spočítáme celkové roční náklady. Z virtuální baterie bylo využito 2 051,4 kWh z toho 1 690,4 na napájení bojlerů a ze sítě bylo čerpáno 4 777 kWh na napájení bojlerů. Součet těchto energií je 6 467,4 kWh. Po převodu vychází 23,283 GJ na ohřívání bojlerů. Při ceně 741,68 Kč na GJ je cena za parovod 17 269 Kč. Za rok majitel zaplatí celkově 18 771 Kč.

Scénář číslo 4 (využití parovodu jen u druhého bojleru)

Při využití soustavy solární elektrárny na aktuální spotřebu a bojler 1 a parovodu na bojler 2 jsou množství energií následovné. Ekonomické náklady ve výši 1 350 kWh z virtuální baterie za cenu 4,16 za kWh. To je v součtu za elektřinu **5 616 Kč**. Ze sítě v tomto scénáři není čerpána žádná energie. Hodnota 5 698 kWh, která ukazuje spotřebu z parovodu, což vychází po převodu na 20,512 GJ. Při ceně 741,68 za GJ je výsledná cena za parovod ve výši 15 213 Kč. V součtu je to v tomto scénáři 20 830 Kč.

Obrázek 34 Průběh čerpání a akumulace elektřiny



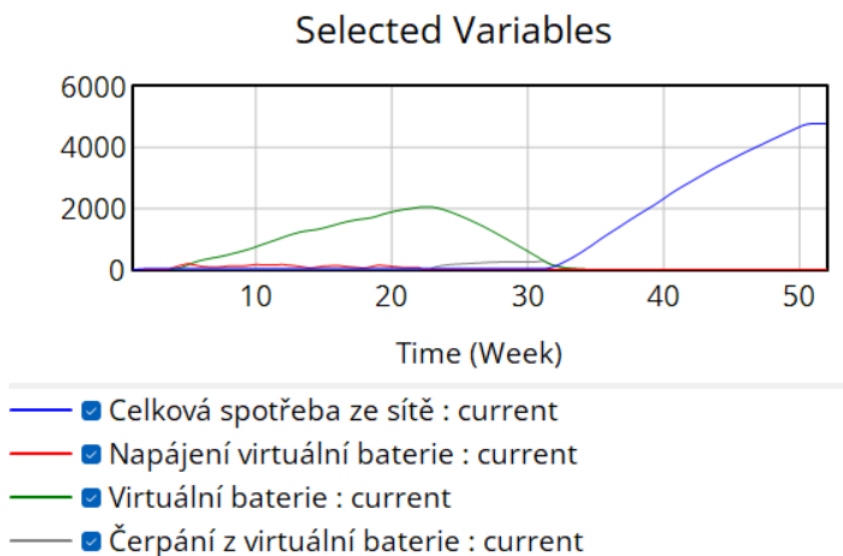
Zdroj: vlastní zpracování

Tento scénář demonstruje to, že elektrárna je dost výkonná a vyrobí nebo naakumuluje dost energie, aby dodávala dostatek elektrické energie bez využití spotřeby ze sítě za plnou cenu za kWh.

Scénář číslo 5 (s využitím solární elektrárny bez parovodu)

Při využívání solární elektrárny majitel má dva tarify. První tarif určuje cenu odebrané elektřiny ze sítě. Ta činí 8,25 Kč za kWh. Druhý tarif je ve výši 4,16 Kč za kWh a udává cenu za odebranou energii, kterou elektrárna poslala do sítě v době přebytku neboli virtuální baterie. V tomto scénáři je vyhřívání bojlerů zajištěno prostřednictvím elektrické energie. Cílem celé soustavy je nejdříve využít vyrobenou elektrickou energii, pak tu z virtuální baterie a poslední cesta je z veřejné sítě za plnou cenu.

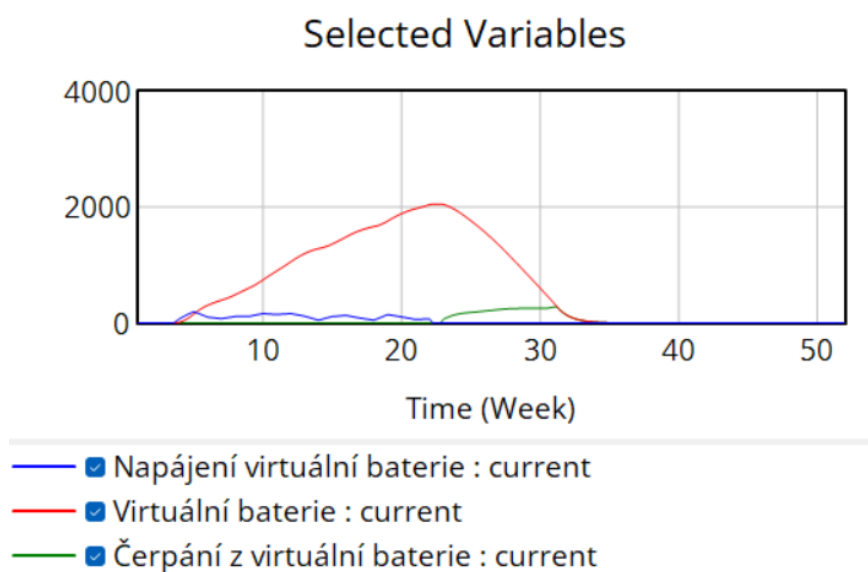
Obrázek 35 Graf průběhu toku a akumulace elektrické energie



Zdroj: vlastní zpracování

Na obrázku 35 je znázorněn graf průběhu nabíjení virtuální baterie, stav virtuální baterie, vybíjení virtuální baterie a spotřeby ze sítě. Lze vidět průběh, který odpovídá jednotlivým obdobím v roce. V letních měsících se nám naakumulovala energie ve virtuální baterii, která se začala vybíjet v tu dobu, kdy přišlo méně slunečné počasí a bojler 2 začal dodávat teplo do domácnosti ve větší míře. Na pokrytí celé zimy to nestačilo, a proto v 31 týdnu se začala energie čerpat ze sítě za plnou cenu.

Obrázek 36 Průběh toku a akumulace elektrické energie ve virtuální baterii



Zdroj: vlastní zpracování

Do baterie bylo naakumulováno 2 051,4 kWh. Z obrázku číslo 26 lze vyčíst, že vrcholu kapacity virtuální baterie dosahovala na konci léta.

V tomto scénáři se spotřebovalo 4 777 kWh ze sítě a 2 051,4 kWh z virtuální baterie. Při vynásobení cenami tarifů je celková útrata za jeden rok 39 410 Kč + 8 532 Kč, celkově tedy **47 942 Kč**.

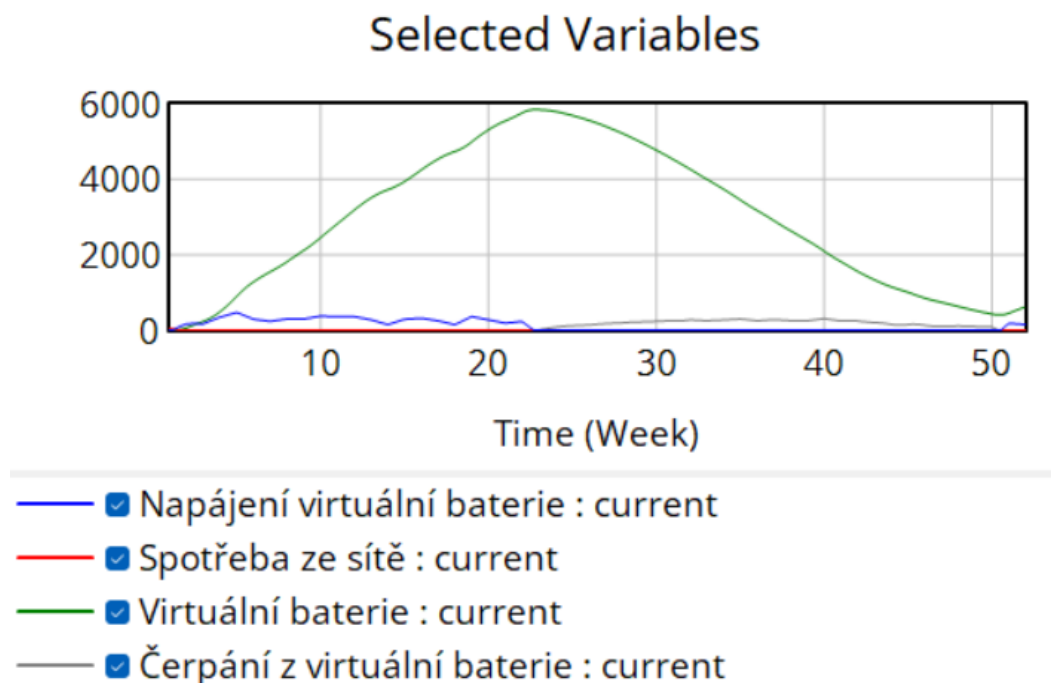
Scénář číslo 6 (bez využití parovodu a energie ze sítě)

V tomto scénáři se počítá s přidáním části panelů tak, aby poskytly dostatečné množství elektrické energie do soustavy a virtuální baterie. A nebylo nutné čerpat energii ze sítě.

Podle zkonstruovaného modelu by bylo nutné přidat 70 % panelů, aby byla tato podmínka splněna. Průběh spotřeby při přidání 70 % panelů je následovný na obrázku číslo 37.

V tomto případě by byl součet roční spotřeby ve výši 5 223 kWh a za cenu 4,16 Kč za kWh by výsledná cena činila **21 728 Kč**. K tomu je potřeba přičíst i jednorázová investice za přidání panelů ve výši 72 000 Kč.

Obrázek 37 Průběh toku a akumulace elektrické energie



Zdroj: vlastní zpracování

Na začátku grafu je část, kdy je malá spotřeba ze sítě. To je způsobeno tím, že nebyl ještě čas, aby se dostavil efekt akumulace ve virtuální baterii. Pro účel modelu byla spotřeba ve výši 20 kWh prvních pár dnů, zanedbatelná. Je to zanedbatelná spotřeba oproti celkové spotřebě, která se pohybuje v tisícičkách kWh.

4.4.2 Srovnání jednotlivých scénářů

Při výpočtu návratnosti se vycházelo z ceny pořízené elektrárny, která stála s využitím státních dotací 375 000 Kč. Jednotlivé scénáře byly porovnávány se scénářem číslo 1, kdy nebyla využita solární elektrárna. Pro přehlednost je uveden v tabulce, ale jeho rentabilita není počítána.

Rentabilita byla počítána jako cena za rok prvního scénáře za elektřinu mínus cena za rok scénáře číslo x za elektřinu. Následně byla tímto výsledkem podělena počáteční investice do instalace solární elektrárny. Zjednodušeně lze říci, že to, co je ušetřeno, oproti spotřebě bez elektrárny (scénář 1) za elektrickou energii za rok, musí zaplatit investici do pořízení elektrárny. Rentabilita značí, kdy se tato investice zaplatí. V práci se nezohledňuje vliv budoucí inflace ani vývoj cen elektřiny.

$$\frac{\text{Cena pořízení elektrárny}}{\text{Náklady na elektřinu v Kč za rok ve scénáři 1} - \text{Náklady na elektřinu v Kč ve scénáři } x}$$

Rovnice 7

Současná rentabilita

Tato tabulka počítá s využíváním parovodu

Tabulka 2 Tabulka znázorňující srovnání jednotlivých scénářů z ekonomického hlediska

Číslo scénáře	Cena za rok za elektřinu v Kč	Rentabilita (návratnost) v letech	Cena za rok celkově v Kč
1	34 171	-	52 713
2	1502	11,48	20 044
3	1502	11,48	18 771
4	5616	13,13	20 830

Zdroj: vlastní zpracování

Je třeba uvažovat, že ve scénáři 1 je počítáno množství energie, která se spotřebuje za rok při používání solární energie a toto množství je aplikováno na tarify a okolnosti, kdy není využívána solární elektrárna. Bez elektrárny by byla daná spotřeba nižší, jelikož by měl majitel tendenci více šetřit. Když má člověk s elektrárnou přebytky, tak má tendenci tuto elektřinu více využívat, protože je pro něj levnější nebo zdarma.

Scénáře (5 a 6) uvažující s neexistencí parovodu

Tato tabulka počítá s neexistencí parovodu. Tato skutečnost může nastat v případě výpadku parovodu nebo jeho zrušení poskytovatelem.

Pro výpočet rentability využijeme scénář číslo 1 s tím rozdílem, že spotřebu parovodu nahradíme spotřebou elektrické energie z veřejné sítě za vysoký tarif a nízký tarif. Spotřeba bojleru byla 6 945 kWh tepla za rok. Ze scénáře 1 lze zjistit vysoký a nízký tarif je v poměru 5:2. A podle toho byla taky spočítána alternativní spotřeba bojlerů z vysokého a nízkého tarifu. Ve vysokém tarifu bylo potencionálně spotřebováno 4 961 kWh za cenu 8,25 Kč za kWh a 1 984 kWh za cenu 5,95 Kč za kWh. Ve výsledku by majitel zaplatil 52 733 Kč za spotřebu bojlerů. Celkově se spotřebou v domácnosti, která stála 34 171 Kč by zaplatil **86 904 Kč** za rok za celkovou spotřebu v soustavě. S touto cenou byla počítána alternativní rentabilita.

Jako v případě současné rentability i tato byla spočtena jako spotřeba bez využití elektrárny (86 904 Kč) minus cena za rok u jednotlivých scénářů a následně byla počáteční investice do elektrárny (375 000 Kč) podělena tímto výsledkem. Tímto způsobem bylo docíleno rentability v letech. U scénáře číslo 4 byla k ceně elektrárny přičtena přídatná instalace panelů ve výši 72 000 Kč, jak bylo popsáno ve scénáři číslo 4.

Tabulka 3 Tabulka znázorňující hodnoty jednotlivých scénářů z ekonomického hlediska (bez parovodu)

Číslo scénáře	Cena za rok za elektřinu v Kč	Rentabilita (návrtnost) v letech
Bez elektrárny	86 904	-
5	47 942	9,62
6	21 729+(72 000 jednorázově)	6,86

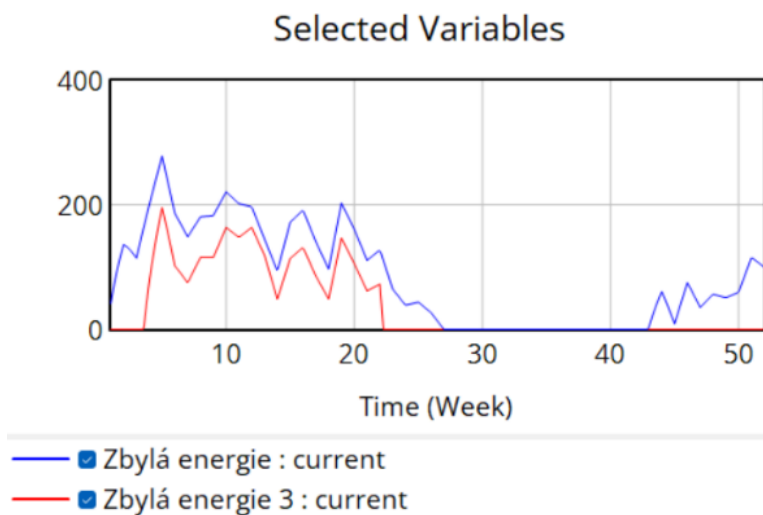
Zdroj: vlastní zpracování

5 Zhodnocení výsledků

5.1 Výsledky u první skupiny scénářů

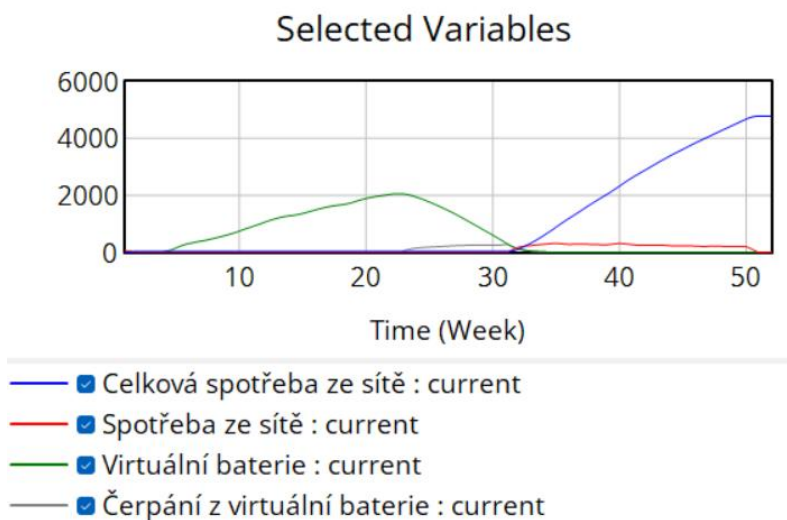
Při porovnávání jednotlivých scénářů bylo dosaženo následujících závěrů. Při srovnávání první skupiny scénářů, kdy autor srovnával jednotlivá využití elektrárny s aplikací na spotřebu a následnou ekonomickou výhodnost a rentabilitu, zjistil, že nejlepší scénář v této skupině je scénář číslo 3.

Obrázek 38 Graf s křivkami průběhu Zbylé elektřiny a Zbylé elektřiny 3



Zdroj: zpracování vlastní

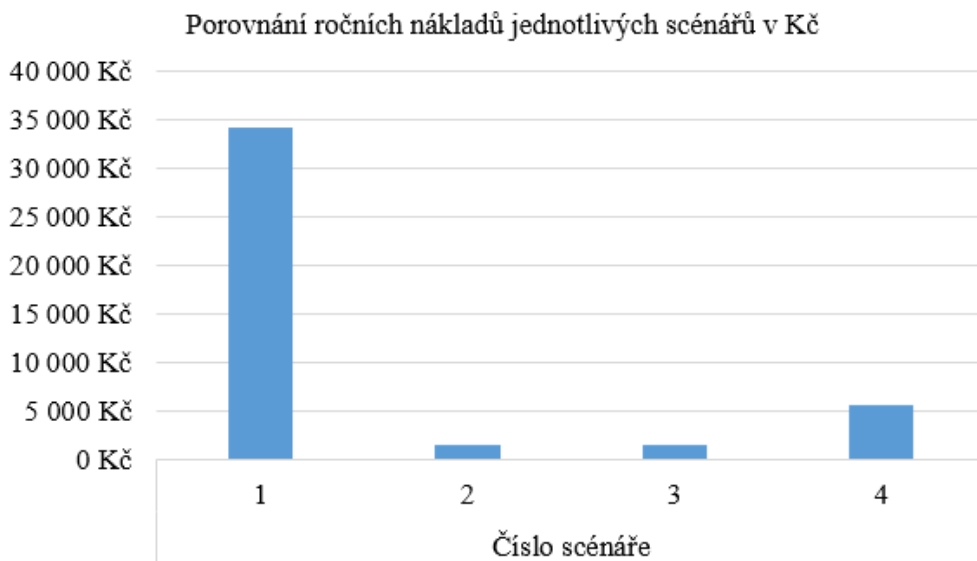
Obrázek 39 Graf průběhu akumulace a toků elektřiny



Zdroj: zpracování vlastní

V tomto scénáři byla zbylá energie využita na napájení bojlerů. Zbylá energie je elektřina, která zbude z množiny celkového množství vyrobené energie solární elektrárnou a následným odečtením aktuální spotřeby v domácnosti. Tato energie je tedy zadarmo. Její množství vyjadřuje plocha mezi křivkami Zbylá energie a Zbylá energie 3 v grafu na obrázku 38 Na obrázku 39 je vidět čerpání z virtuální baterie a sítě. Tato plocha po odečtení čerpání z virtuální baterie domácností, tedy energie, která šla do aktuální spotřeby domácnosti v době, kdy elektrárna nevyrobila dostatečné množství elektřiny, vyjadřuje množství, které v tomto případě poskytne parovod. Důvodem, proč je tento scénář nejlepší ekonomickou volbou je ten, že majitel využije všechnu vyrobenou energii, kterou má zdarma z elektrárny a aplikuje jí na co největší počet dostupných odběrných míst. To znamená domácnost, bojler 1 a bojler 2. Potom nedostatky, které vzniknou v bojlerech 1 a 2 pokryje parovod. Je třeba zmínit, že parovod je druhým nejlevnějším zdrojem (po vyrobené energii ze solární elektrárny), který přináší teplo. Proto je tento scénář nejlepší z ekonomického hlediska. Rentabilita v tomto případě vychází na 11,47 let stejně jako v případě druhého scénáře, jelikož ale ve třetím scénáři využívám menší množství tepla z parovodu, tak je výsledná cena pro majitele za rok výhodnější o 1 273Kč oproti druhému scénáři. Z rok tedy majitel zaplatí 18 771 Kč. V tomto případě sice dobiji virtuální baterii méně, ale je to pro mě výhodnější, protože její čerpání zpět je dražší než čerpání parovodu a vyplatí se jen u spotřebičů, které nejde nahradit parovodem. Sumu spotřeb těchto spotřebičů vyjadřuje aktuální spotřeba v domácnosti. V reálném životě by majitel měl aplikovat tento přístup, pokud bude zachována výhodnost jednotlivých cen energií vůči ostatním.

Obrázek 40 Srovnání scénářů z ekonomického hlediska v Kč

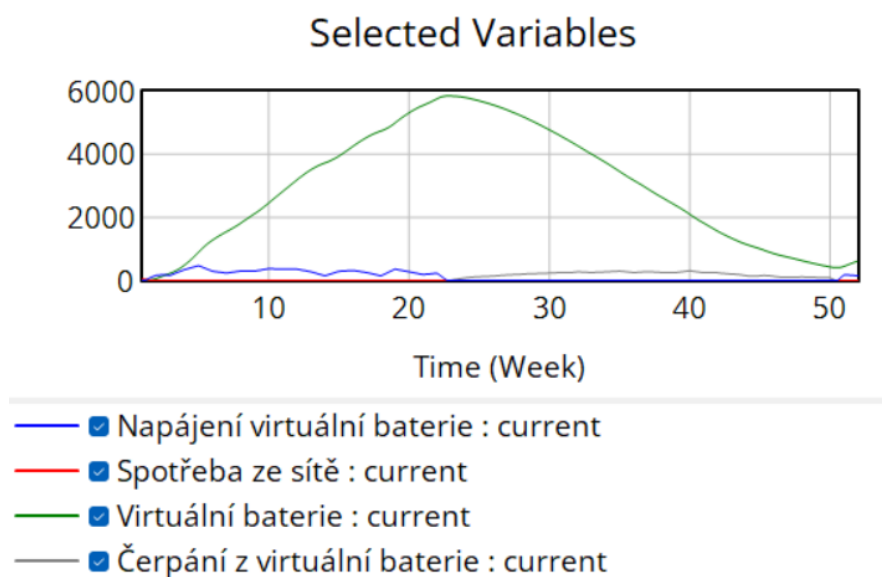


Zdroj: vlastní zpracování

5.2 Výsledky u druhé skupiny scénářů

Při porovnávání výsledků ze scénářů, kde není možné využívat parovod, autor došel následujícím výsledkům. Nejlepší volbou bude v takovém případě navýšit kapacitu solárních panelů o 70 %. K tomuto číslu autor došel prostřednictvím modelu. V tomto scénáři se počítá s tím, že všechna vyrobená energie se spotřebuje v aktuální spotřebě domácnosti a následně v bojleru 1 a bojleru 2. Následně přebytky z této výroby se budou ukládat ve virtuální baterii. Autor došel k tomuto výsledku prostřednictvím modelu tak, že navyšoval kapacitu solárních panelů, dokud nedošlo k minimálnímu čerpání ze sítě.

Obrázek 41 Průběh toků a akumulace elektrické energie



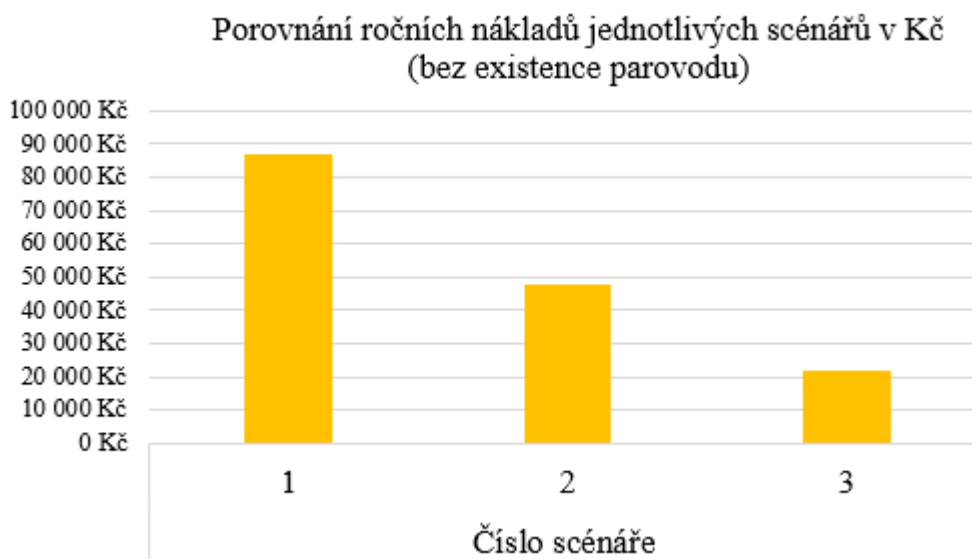
Zdroj: vlastní zpracování

Na obrázku číslo 40 je vidět graf, který znázorňuje tyto křivky, napájení virtuální baterie (modrá), spotřebu ze sítě (červená), naakumulované množství ve virtuální baterii (zelená) a čerpání z virtuální baterie (šedá). Na začátku grafu jde vidět malé čerpání ze sítě v rámci 20 kWh. Toto čerpání je způsobeno tím, že se ještě nedostavil efekt akumulace ve virtuální baterii. Toto čerpání je zanedbatelné a nemá smysl dále navyšovat kapacitu, aby toto čerpání nebylo třeba, protože investice do solárních panelů by byly neúměrně velké oproti takto malé spotřebě ze sítě. Po prvních pár dnech jde vidět, že čerpání ze sítě razantně kleslo a drží se u minimálních hodnot v rámci pár kWh. Zelená křivka, jenž znázorňuje kapacitu virtuální baterie, po začátku sledovaného období nikdy neklesne na 0 a tak díky ní bude mít majitel prakticky celé čerpání energie za tarif 4,16 Kč.

Při porovnávání rentability u scénářů, které počítají s neexistencí parovodu vyšel scénář číslo 6 jako optimální. I přes počáteční investici ve výši 72 000 Kč na zvýšení kapacity solárních panelů je výsledná rentabilita 6,86 let. A roční provoz majitele vyjde na 21 729 Kč. V případě, že by majitel neinvestoval do navýšení kapacity panelů elektrárny, tak by výsledná rentabilita byla 9,62 let a majitel by ročně zaplatil 47 942 Kč za leketřinu.

V případě že by majitel nevlastnil solární elektrárnu a zároveň neměl přístup k parovodu, zaplatil by za elektřinu ročně 86 904 Kč.

Obrázek 42 Srovnání alternativních scénářů z ekonomického hlediska (bez parovodu)



Zdroj: vlastní zpracování

Sloupec číslo 1 znázorňuje množství peněz v Kč vynaložených při spotřebě bez existence solární elektrárny.

Sloupec 2 vyjadřuje množství peněz v Kč vynaložených na spotřebu s využíváním solární elektrárny, ale bez navýšení kapacity panelů.

Sloupec číslo 3 znázorňuje množství peněz v Kč vynaložených na spotřebu s využíváním solární elektrárny a navýšením kapacity solárních panelů.

Je třeba si uvědomit, že sloupec číslo 3 neznázorňuje investici do navýšení kapacity solárních panelů, ale tato skutečnost by po 6,86 letech byla vyrušena díky rentabilitě.

6 Závěr

V bakalářské práci bylo využíváno metod a nástrojů systémové dynamiky pro simulaci vývoje soustavy solární elektrárny v rodinném domě. Teoretická část se zabývá vznikem a vývojem systémové dynamiky a systémovým myšlením. Je zde popsána historie systémové dynamiky, její základní pojmy a principy na kterých je založena a díky kterým funguje. Další kapitola se věnuje simulaci. Jsou zde vysvětleny principy fungování příčinně smyčkového diagramu a diagramu stavů a toků. Dále pak matematická vyjádření, na kterých se posléze model počítal. Závěrečná kapitola teoretické části je věnována základům fotovoltaické technologie. Její historie, principy fungování fotovoltaických článků, životnost solárních panelů a ekologií solárních panelů. Je zde popsán průběh a množství dopadu slunečního záření na povrch země.

V praktické části byl sestaven model příčinně smyčkového diagramu solární elektrárny a navazujících komponent v domácnosti. Model byl užít k pochopení základní struktury fungování systému a uvědomění si podstatných proměnných, které na systém působí. Následně byl sestaven diagram stavů a toků systému solární elektrárny v rodinném domě. Diagram byl sestaven v programu s názvem Vensim PLE. Byly zde zobrazeny všechny podstatné proměnné a jejich vazby, které na model působily. K provedení simulace byla využita data z reálné solární elektrárny a dalších měřičů spotřeby v domácnosti. Na model byly nakonec aplikovány vybrané scénáře a následně byla vyhotovena jejich ekonomická výhodnost a rentabilita elektrárny.

Z výsledků jednotlivých scénářů bylo zjištěno, že optimální volbou z ekonomického hlediska je využít co nejvíce vyrobené energie do aktuální spotřeby domácnosti, spotřeby bojlerů a nedostatky v bojlerech 1 a 2 doplnit z parovodu. Nedostatky v aktuální spotřebě v domácnosti byly pokryty z virtuální baterie. V takovémto scénáři by stál roční provoz soustavy s daty v rozmezí od května 2022 do dubna 2023 nejmenší částku a to 18 771 Kč. S tím, že majitel by zaplatil 1 502 Kč za čerpání elektřiny z virtuální baterie a 17 269 Kč za parovod. Rentabilita by činila 11,48 let. Ve scénáři, kde neměl majitel možnost se připojit k parovodu vyšla z ekonomického pohledu nejlepší varianta ta, kde majitel musel přikoupit 70 % kapacity panelů a navýšit tak množství vyráběné elektrické energie. Investice do

navýšení činila 72 000 Kč. A roční provoz vyšel majitele na 21 729 Kč. Rentabilita by v takovém případě činila 6,86 let.

Bakalářská práce může sloužit jako podklad pro majitele této konkrétní solární elektrárny a může díky ní najít optimum v jejím využívání. Avšak její výhodou je možnost model přizpůsobit i pro jiné uživatele, kteří využívají stejný princip ohřevu a distribuce tepla v domácnosti, tak jak bylo užito v práci. Způsob, jakým byl model zkonstruován, by umožnil, aby použitá data mohla být nahrazena daty z konkrétní elektrárny od jiného majitele a pomohl by tak při hledání nového optima využívání dané solární elektrárny. Bylo by třeba použít reálné časové řady a na ně navázat generátor pseudonáhodných čísel a uzpůsobit je tak ročním obdobím. Dále by bylo možné zakomponovat do modelu proměnnou, která by definovala meteorologické podmínky k dané solární elektrárně, a tím by vznikl univerzální model solární elektrárny. Tyto a další úpravy jsou možné, avšak už jsou nad rámec rozsahu bakalářské práce.

7 Seznam používaných zdrojů

DIZIKES, Peter, 2015. The Many Careers of Jay Forrester. Technology Review [online]. [cit. 2024-01-29]. Dostupné z: <https://www.technologyreview.com/2015/06/23/167538/the-many-careers-of-jay-forrester/>

FORRESTER, Jay W., 1961. Industrial Dynamics. New York: John Wiley & Sons. ISBN 9780262560016.

FORRESTER, Jay Wright, 1995. The beginning of system dynamics. McKinsey & Company [online]. [cit. 18.11.2023]. Dostupné z: <https://www.mckinsey.com/capabilities/strategy-and-corporate-finance/our-insights/the-beginning-of-system-dynamics>

HASELHUHN, Ralf, 2011. Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu. Ostrava: HEL. ISBN 9788086167336.

HASELHUHN, Ralf a MAULE, Petr, 2017. Fotovoltaické systémy: energetická příručka: pro elektrikáře, techniky, instalatéry, projektanty, architekty, inženýry, energetiky, manažery, stavitele, studenty, učitele, ostatní odborné a profesní soukromé nebo veřejné instituce a zájemce o fotovoltaický obor a energetickou nezávislost. Přeložil Anna ROHÁČOVÁ, přeložil Pavel ROHÁČ, přeložil Anna ŽENÍŠKOVÁ, přeložil Eva HOŘEJŠÍ, přeložil Jana KLAMO, přeložil Jitka HICKOVÁ, přeložil Veronika MARTINOVSKÁ, přeložil Tomáš BAROCH. Plzeň: Česká fotovoltaická asociace. ISBN 9788090628151.

ISO FEN ENERGY, 2023. Fotovoltaika v podmínkách České republiky – 2023. [online]. [cit. 2024-02-15]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/slunecni-zareni-v-cr.aspx>

KREJČÍ, Igor a KVASNIČKA, Roman 2014. Systémová dynamika I. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Provozně ekonomická fakulta. ISBN 9788021324787.

MEADOWS, Donella H, 2008. Thinking in systems: a primer. Editor Diana WRIGHT. White River Junction: Chelsea Green Publishing. ISBN 978-1-60358-055-7.

OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, 2023. Solar Photovoltaic Technology Basic – 2023. [online]. [cit. 2023-09-23]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>

OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, 2023. Photovoltaic – 2023. [online]. [cit. 2023-09-23]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/solar/photovoltaics>

OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, 2023. PV Cell 101: A Primer on the Solar Photovoltaic Cell – 2023. [online]. [cit. 2023-09-23]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/solar/articles/pv-cells-101-primer-solar-photovoltaic-cell>

RICHMOND, Barry, 1994. Systems thinking/system dynamics: Let's just get on with it. System Dynamics Review [online]. 135-157 [cit. 2023-11-29]. ISSN 08837066. Dostupné z: doi:10.1002 /sdr.4260100204

Seghers, N. 2020. Off grid solar power simplified: For Rvs, Vans, Cabins, Boats and Tiny Homes. ISBN 9798602027136

STERMAN, John D., 2000. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: McGraw-Hill. ISBN 007238915.

SYSTEM DYNAMIC SOCIETY, 2023. ORIGIN OF SYSTEM DYNAMIC [online]. [cit. 2023-09-08]. Dostupné z: <https://systemdynamics.org/origin-of-system-dynamics/>

THE NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, 2023. Solar Photovoltaic Technology Basic – 2023. [online]. [cit. 2023-10-05]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/research/re-photovoltaics.html>

8 Seznam obrázků, tabulek a rovnic

8.1 Seznam obrázků

Obrázek 1	Proces systémové dynamiky.....	19
Obrázek 2	Lineární pohled na svět	20
Obrázek 3	Působení zpětných vazeb.....	21
Obrázek 4	Sebeposilující/posilující smyčka	23
Obrázek 5	Vyvažující/negativní/cíl hledající smyčka	23
Obrázek 6	Kladná polarita vazeb	23
Obrázek 7	Negativní polarita vazeb.....	24
Obrázek 8	Značka zpoždění	24
Obrázek 9	Stavová proměnná	25
Obrázek 10	Toková proměnná	25
Obrázek 11	Symbol mraku.....	25
Obrázek 12	Zobrazení stavů a toků.....	26
Obrázek 13	Průměrný roční součet trvání slunečního svitu v ČR	31
Obrázek 14	Průběh výroby a spotřeby během jednoho dne.....	34
Obrázek 15	Průběh jednoho dne celkové výroby a spotřeby elektřiny.....	35
Obrázek 16	Týdenní průběh fungování elektrárny	36
Obrázek 17	Ukázka dat z elektrárny v 5minutovém časovém úseku	37
Obrázek 18	Ukázka dat z elektroměru Bojleru 1	38
Obrázek 19	Graf měřených dat spotřeby elektřiny Bojleru 1	39
Obrázek 20	Ukázka zpracovaných dat z elektroměrů elektrárny a bojlerů 1 a 2.....	41
Obrázek 21	Základní příčinně smyčkový diagram	42
Obrázek 22	Rozšíření příčinně smyčkového diagramu	43
Obrázek 23	Celý příčinně smyčkový diagram znázorňující zkoumanou problematiku ...	45
Obrázek 24	Nastavení modelu v programu Vensim PLE.....	47
Obrázek 25	Nastavení modelu v programu Vensim PLE.....	47
Obrázek 26	Základní struktura diagramu stavů a toků	49
Obrázek 27	Celý diagram stavů a toků	52
Obrázek 28	Graf průběhu napájení virtuální baterie v průběhu sledovaného období.....	56
Obrázek 29	Graf průběhu čerpání elektrické energie z virtuální baterie	56
Obrázek 30	Průběh akumulace elektřiny ve virtuální baterii.....	56
Obrázek 31	Celková spotřeba ze sítě v průběhu sledovaného období.....	57
Obrázek 32	Graf průběhu akumulace a toků elektřiny	57
Obrázek 33	Graf s křivkami průběhu Zbylé elektřiny a Zbylé elektřiny 3.....	58
Obrázek 34	Průběh čerpání a akumulace elektřiny.....	59
Obrázek 35	Graf průběhu toku a akumulace elektrické energie	60
Obrázek 36	Průběh toku a akumulace elektrické energie ve virtuální baterii.....	60
Obrázek 37	Průběh toku a akumulace elektrické energie	61
Obrázek 38	Graf s křivkami průběhu Zbylé elektřiny a Zbylé elektřiny 3.....	65
Obrázek 39	Graf průběhu akumulace a toků elektřiny	65
Obrázek 40	Srovnání scénářů z ekonomického hlediska v Kč	67
Obrázek 41	Průběh toků a akumulace elektrické energie	68

Obrázek 42 Srovnání alternativních scénářů z ekonomického hlediska (bez parovodu) .69

8.2 Seznam tabulek

Tabulka 1	Měřené proměnné v aplikaci elektrárny.....	34
Tabulka 2	Tabulka znázorňující srovnání jednotlivých scénářů z ekonomického hlediska	62
Tabulka 3	Tabulka znázorňující hodnoty jednotlivých scénářů z ekonomického hlediska (bez parovodu).....	64

8.3 Seznam rovnic

Rovnice 1	26
Rovnice 2	26
Rovnice 3	30
Rovnice 4	31
Rovnice 5	40
Rovnice 6	40
Rovnice 7	62

Přílohy

Název proměnné	Vzorec
Aktuální spotřeba	WITH LOOKUP (Time, [(0,0)-(10,10)],(1,137),(2,94),(3,98),(4,105),(5,87),(6,77),(7,80),(8,84),(9,79),(10,82),(11,99),(12,88),(13,83),(14,52),(15,81),(16,80),(17,93),(18,46),(19,106),(20,85),(21,70),(22,101),(23,75),(24,63),(25,65),(26,58),(27,52),(28,72),(29,53),(30,58),(31,49),(32,59),(33,55),(34,77),(35,102),(36,66),(37,57),(38,44),(39,27),(40,64),(41,55),(42,63),(43,38),(44,97),(45,48),(46,100),(47,117),(48,70),(49,133),(50,94),(51,139),(52,95))
Baterie	(Nabíjení-Vybíjení,0)
Bojler 1	Příjem Energie-Výdej Energie,0)
Bojler 2	Příjem Energie 0-Výdej Energie 0,0)
Celková spotřeba ze sítě	(spotřeba ze sítě,0)
Čerpání z virtuální baterie	min(Virtuální baterie,Nepokrytí nedostatku+pokrytí energetických výdajů z virtuální baterie)
FINAL TIME	52
INITIAL TIME	0
Maximální kapacita	87,5
Maximální kapacita Bojleru 1	77
Maximální kapacita Bojleru 2	204
Nabíjení	min(max(Přebytečná energie,0),Rozdíl mezi aktuální a plnou kapacitou)
Napájení virtuální baterie	Zbylá energie 3
Nedostatek Energie	-(min(0,Přebytečná energie))

Název proměnné	Vzorec
Nepokrytí celkového nedostatku	Nepokrytí nedostatku+pokrytí energetických výdajů z virtuální baterie- Čerpání z virtuální baterie
Nepokrytí energetického o výdaje bojleru 2	Spotřeba bojleru 2-Výdej Energie 0
Nepokrytí energetického výdaje bojleru 1	Spotřeba Bojleru 1-Výdej Energie
Nepokrytí nedostatku	Nedostatek Energie-Vybíjení
Pokrytí energetických výdajů z virtuální baterie	nepokrytí energetického výdaje 2+nepokrytí energetického výdaje bojleru 1
Přebytečná energie	Solární panely-Aktuální spotřeba
Příjem Energie	min(Zbylá energie,Rozdíl mezi aktuální a plnou kapacitou Bojler 1)
Příjem Energie 0	min(Zbylá energie 2,Rozdíl mezi aktuální a plnou kapacitou Bojler 2)
Rozdíl mezi aktuální a plnou kapacitou	Maximální kapacita-Baterie
Rozdíl mezi aktuální a plnou kapacitou Bojler 2	Maximální kapacita Bojleru 2-Bojler 2+Výdej Energie 0
Solární panely	WITH LOOKUP (Time, ((0,0)-(10,10)],(1,266),(2,262),(3,224),(4,309),(5,367),(6,264),(7,229),(8,265),(9,262),(10,303),(11,301),(12,285),(13,228),(14,146),(15,253),(16,272),(17,234),(18,143),(19,309),(20,246),(21,181),(22,229),(23,140), (24,102),(25,109),(26,85),(27,52),(28,57),(29,46),(30,33),(31,7),(32,6),(33,28),(34,34),(35,34),(36,41),(37,18),(38,27),(39,18),(40,6),(41,38),(42,101),(43,78),(44,171),(45,62),(46,177),(47,153),(48,127),(49,184),(50,154),(51,255),(52,195))

Název proměnné	Vzorec
Spotřeba ze sítě	Nepokrytí celkového nedostatku
Spotřeba Bojleru 1	WITH LOOKUP (Time, ([(0,0)- (10,10)],(1,53),(2,57),(3,66),(4,58),(5,59),(6,76),(7,71), (8,64),(9,67),(10,57),(11,54),(12,33),(13,26),(14,45), (15,58),(16,60),(17,55),(18,48),(19,56),(20,55),(21,49), (22,55),(23,55),(24,55),(25,55),(26,55),(27,55),(28,55), (29,55),(30,55),(31,55),(32,55),(33,55),(34,55),(35,55), (36,55),(37,55),(38,55),(39,55),(40,55),(41,55),(42,55), (43,55),(44,55), (45,55),(46,55),(47,55),(48,55),(49,55),(50,55),(51,66), (52,66)))
Spotřeba bojleru 2	WITH LOOKUP (Time, ([(0,0)- (10,10)],(1,0),(2,0),(3,0), (4,0),(5,0),(6,0),(7,0),(8,0),(9,0), (10,0),(11,0),(12,0),(13,0),(14,0),(15,0),(16,0),(17,0),(18,0), (19,0),(20,0),(21,0),(22,0),(23,203),(24,203),(25,203), (26,203),(27,203),(28,203),(29,203),(30,203),(3,203),(32,203), (33,203),(34,203),(35,203),(36,203),(37,203),(38,203),(39,203), (40,203),(41,203),(42,203),(43,203),(44,203),(45,203),(46,203), (47,203),(48,203),(49,203),(50,203),(51,0),(52,0)))
TIME STEP	0.03125
Virtuální baterie	Napájení virtuální baterie-Čerpání z virtuální baterie, 0)
Vybíjení	min(Baterie,Nedostatek Energie)
Výdej Energie	min(Bojler 1,Spotřeba Bojleru 1)
Výdej Energie 0	min(Bojler 2,Spotřeba bojleru 2)
Zbylá energie	max(0,Přebytečná energie)-Nabíjení
Zbylá energie 2	Zbylá energie-Příjem Energie
Zbylá energie 3	Zbylá energie 2-Příjem Energie 0

