

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky



Diplomová práce

Optimalizace a simulace provozu bezlicenční fotovoltaické elektrárny v podmínkách ČR

Jan Drápela

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Drápela** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **460190**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace a simulace provozu bezlicenční fotovoltaické elektrárny v podmínkách ČR.

Název diplomové práce anglicky:

: Optimization and simulation of the operation of an unlicensed photovoltaic power plant in the conditions of the Czech Republic.

Pokyny pro vypracování:

1. Popište strukturu FV elektráren využívaných pro bezlicenční FV zdroje (instalace v ČR do 10 kWp) a to včetně národních specifik.
2. Proveďte analýzu různých způsobů získání komplexního odběrového diagramu objektu a vypracujte metodiku pro jeho zpracování.
3. Vyberte vhodný simulační SW pro simulace celého systému fotovoltaické elektrárny včetně instalovaných odběrů, elektrické i neelektrické akumulace energie a případné interakce s distribuční soustavou. Pro vybraný SW vypracujte metodiku pro postup simulací a ověřte krátkou případovou studii.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Analýza návratnosti fotovoltaických systémů instalovaných v Evropské unii. Praha, 2020. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/89878>. Bakalářská práce. ČVUT FEL.
[2] System Advisor Model [online]. USA: NREL [cit. 2021-01-29]. Dostupné z: <https://sam.nrel.gov/>
[3] Vyhláška č. 359/2020 Sb. In: Sbírka zákonů. 146/2020. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-359>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **01.02.2021** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

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

V Praze dne

Podpis

Jan Drápela

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé práce Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D. za ochotu, odborné rady, zajímavé postřehy a přínosné osobní konzultace v průběhu řešení této práce. Dále děkuji společnosti PREdistribuce, a.s., za poskytnutá data odběrových profilů. Rovněž děkuji Ing. Ladislavě Černé, Ph.D. za pomoc při práci se softwarem DEKSOFT FVE. V neposlední řadě také děkuji své rodině, přítelkyni a přátelům za jejich podporu nejen během psaní této práce, ale i v průběhu celého studia.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá bezlicenčními fotovoltaickými zdroji provozovanými v podmínkách ČR. V úvodních teoretických kapitolách jsou popsány hlavní komponenty těchto systémů a související platná legislativa. Současně jsou zde představeny různé možnosti získání komplexního odběrového profilu objektu. Praktická část práce se věnuje tvorbě simulací fotovoltaických systémů v softwaru SAM. Výstupem této části je program, který dokáže na základě nastavených vstupů modelovat využití přebytků produkce pro akumulaci ohřev vody. V závěrečné kapitole je provedeno ekonomické zhodnocení fotovoltaických instalací s různým způsobem akumulace, s využitím stávajících, ale i nově vytvořených funkcí softwaru SAM.

Klíčová slova

fotovoltaický zdroj, zásobník teplé vody, akumulace, HDO, software SAM

Abstract

The diploma thesis deals with unlicensed photovoltaic sources operated in the conditions of the Czech Republic. The theoretical chapters describe the main components of these systems and related valid legislation. There are also introduced various possibilities of creation the complex consumption of household. The practical part is dedicated to the simulations of photovoltaic systems in SAM software. The product of this part is a program that can model the use of surplus production for hot water storage tank based on the set inputs. The final chapter summarizes the economic comparison of photovoltaic installations with different method of electricity accumulation, using existing but also newly created functions of SAM software.

Key words

photovoltaic source, hot water storage tank, accumulation, load management, SAM software

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	1
1 Úvod	3
1.1 Rozvoj solární energetiky v ČR	3
2 Komponenty malých fotovoltaických systémů	5
2.1 Fotovoltaický modul	5
2.2 Měnič.....	6
2.3 Zařízení pro akumulaci elektrické energie	7
2.3.1 Elektrochemické akumulátory.....	7
2.3.2 Zásobník teplé vody	8
2.4 Další komponenty pro instalaci FVE	9
3 Národní specifika	10
3.1 Legislativní rámec systémů připojených k distribuční soustavě	10
3.2 Tarifní struktura v ČR a funkce systému HDO	11
3.3 Měření elektřiny v ČR.....	12
3.3.1 Problematika fázového měření.....	12
4 Tvorba komplexního odběrového diagramu	14
4.1 Odběrový profil elektrické energie.....	14
4.1.1 Příklad reálného profilu pro sazbu D02d	14
4.1.2 Profil získaný pomocí normalizovaných TDD.....	15
4.2 Odběrový profil teplé vody	17
4.2.1 Load Profile Generator.....	17
4.2.2 Profil jako výstup z LPG.....	17
4.2.3 Profil dle ČSN EN 12831-3	18
4.3 Metodika generování odběrových profilů	19
5 Simulace v softwaru SAM	21
5.1 System Advisor Model.....	21
5.1.1 Porovnání reálných dat generace FVE s výstupy programu	22
5.2 Simulace s ukládáním přebytků do zásobníku teplé vody.....	24
5.2.1 Princip činnosti regulátoru	25
5.2.2 Model zásobníku	25
5.2.3 Řízení simulace	27

5.2.4	Funkce HDO.....	29
5.2.5	Zadáání vstupních dat.....	32
5.2.6	Výstupy.....	34
5.2.7	Porovnání výsledků simulace se softwarem DEKSOFT FVE.....	35
5.3	Simulace se zásobníkem teplé vody a ukládáním přebytků do bateriového úložiště	37
6	Případová studie	40
6.1	Popis objektu	40
6.2	Obecné předpoklady	41
6.3	Varianta 0 – Výchozí stav	41
6.4	Varianta 1 – Fotovoltaický systém s akumulací přebytků do zásobníku teplé vody	43
6.5	Varianta 2 – Fotovoltaický systém s akumulací přebytků do fyzické baterie	46
6.6	Varianta 3 – Fotovoltaický systém s akumulací přebytků do virtuální baterie.....	49
6.7	Shrnutí výsledků.....	52
7	Závěr	53
	Použitá a citovaná literatura	54
	Seznam obrázků.....	57
	Seznam tabulek.....	58
	Seznam grafů	58
	Seznam příloh	59

Seznam použitých symbolů a zkratek

AMM	Automated Meter Management, systém pro dálkový odečet dat elektroměrů
BMS	Battery Management System, systém řízení baterie
CSV	Comma-separated values, formát souboru s hodnotami oddělenými čárkou
c_v	Měrná tepelná kapacita vody
ČEZ	České energetické závody
ČR	Česká republika
ČVUT	České vysoké učení technické
DoD	Depth of Discharge, úroveň vybití
DPH	Daň z přidané hodnoty
DS	Distribuční síť
EE	Elektrická energie
ERÚ	Energetický regulační úřad
EU	Evropská unie
EVA	Ethylen vinyl acetát
FV	Fotovoltaický
FVE	Fotovoltaická elektrárna
HDO	Hromadné dálkové ovládání
l	Tloušťka izolace zásobníku
LK	Language Kit, skriptovací jazyk programu SAM
LPG	Load Profile Generator, software pro generování odběrových profilů
OTE	Operátor trhu s energiemi
OZE	Obnovitelné zdroje energie
P	Výkon topného tělesa
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System, fotovoltaický geografický informační systém
$\dot{Q}_{\text{zásobník}}$	Celková bilance energie vstupující/vystupující ze zásobníku
$\dot{Q}_{\text{odběr}}$	Množství odebraného tepla odběrem teplé vody
$\dot{Q}_{\text{ohřev}}$	Množství přijatého tepla elektrickým ohřevem vody
$\dot{Q}_{\text{ztráty}}$	Tepelné ztráty
r_1	Průměr zásobníku
R_1	Tepelný odpor pláště
R_2	Tepelný odpor podstavy
SAM	System Advisor Model
SoC	State of Charge, úroveň nabití

TDD	Typový diagram dodávky
TMY	Typical meteorological year, typický meteorologický rok
T_o	Teplota okolí zásobníku
T_s	Teplota vody na vstupu do zásobníku
TV	Teplá voda
T_z	Teplota vody v zásobníku
MPP	Maximum Power Point, bod maximálního výkonu
MPPT	Maximum Power Point Tracking, sledování bodu maximálního výkonu
\dot{m}_v	Hmotnostní průtok vody v nádrži
m_z	Hmotnost vody v plném zásobníku
NN	Nízké napětí
NPV	Net present value, čistá současná hodnota
NREL	National Renewable Energy Laboratory, americká národní laboratoř pro obnovitelné zdroje
NT	Nízký tarif
NZÚ	Nová zelená úsporám
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov
VT	Vysoký tarif
λ	Součinitel tepelné izolace zásobníku
η	Účinnost topného tělesa

1 Úvod

Spotřeba elektrické energie celosvětově roste. Ve světě zatím stále výrazně převládá výroba energie z fosilních paliv jako je uhlí, ropa a zemní plyn. Zásoby těchto zdrojů jsou však omezené, navíc při jejich spalování dochází k produkci škodlivých emisí. Z tohoto důvodu se dostává stále více pozornosti obnovitelným zdrojům (OZE). Ty jsou v současné době na vzestupu a nyní je přibližně již čtvrtina celosvětové spotřeby pokryta právě jejich produkcí. Z těchto zdrojů mají nejrychleji rostoucí podíl solární a větrné elektrárny, přičemž každý rok se jejich počet navyšuje značným tempem. Velké podpory se těmto zdrojům dostává také v kontextu politických rozhodnutí a nadnárodních cílů. Velmi progresivní je v tomto směru Evropská unie, jejíž součástí je také ČR. Ta si za jeden z hlavních cílů v oblasti energetiky stanovila snižovat emise skleníkových plynů a diverzifikovat své zdroje. Dle posledních usnesení by mělo v roce 2030 pocházet 32 % veškeré spotřeby energie EU právě z OZE.

Jedním z negativních projevů masivní podpory „zelené“ energetiky v posledních letech je rostoucí cena silové elektřiny, která se výrazněji projevila po zavedení systému emisních povolenek, jehož cílem je znevýhodňovat klasické „špinavé“ zdroje. To je také jedním z důvodů, proč stále více odběratelů uvažuje o tom, jak snížit své účty za odběr elektřiny. Jednou z možných cest může být instalace fotovoltaického systému na střechu rodinného domu. Instalace tohoto systému je navíc v ČR při splnění určitých podmínek dotována. Hlavním přínosem je snížení plateb za elektřinu díky využívání produkce pro vlastní spotřebu. Nevýhodou fotovoltaických systémů je značná kolísavost výroby a také produkce energie v době, kdy ji nemusí být zrovna potřeba a naopak. Řešením může být akumulace energie pro její pozdější využití. To v mnoha případech velmi pozitivně ovlivňuje celkovou ekonomiku jejich provozu.

Tato diplomová práce je zaměřena na malé fotovoltaické systémy s instalovaným výkonem do 10 kWp v podmínkách ČR. Tyto zdroje se někdy označují také jako bezlicenční, neboť pro jejich provoz není v současné době potřeba získat licenci. V souvislosti s těmito systémy se budeme podrobněji zabývat efektivním hospodařením s přebytky. Pro tento účel bude využit software SAM, ve kterém budou různé konfigurace fotovoltaických systémů i s akumulací simulovány. Respektována bude celá řada různých faktorů jako jsou klimatické podmínky dané lokality, spotřeba energie v objektu, použité komponenty fotovoltaického systému a další. Zároveň v tomto programu bude pomocí skriptovacího jazyka vytvořena možnost akumulace přebytků v tepelné formě do zásobníku teplé vody. Jednotlivé varianty pak budou na příkladu porovnány a ekonomicky vyhodnoceny včetně zohlednění různých nefinančních specifik.

1.1 Rozvoj solární energetiky v ČR

Počátky solární energetiky v ČR lze datovat přibližně k přelomu tisíciletí, kdy u nás byla uvedena do provozu první větší FVE na našem území s instalovaným výkonem 10 kWp. Jednalo se o elektrárnu společnosti ČEZ, jež byla vybudována jako součást parku obnovitelných zdrojů na hoře Mravenečník v Jeseníkách. Elektrárna byla uvedena do provozu v roce 1998, přičemž o čtyři roky později musela být přesunuta do areálu JE Dukovany z důvodu četných krádeží fotovoltaických panelů. [1]

Po období pilotních a testovacích projektů došlo v roce 2002 k první formě podpory FVE na našem území. Jednalo se o zavedení garantované výkupní ceny vyrobené energie, která ale byla v kontextu své doby relativně nízká (6 Kč/kWh), neboť tehdejší ceny jednotlivých komponent byly výrazně vyšší než dnes. Jelikož byl provoz takovýchto systémů nerentabilní, došlo v roce 2006 ke zvýšení výkupní ceny tak, aby byla zaručena alespoň 15letá návratnost. [2] Přibližně kolem roku 2009 pak začaly vznikat první velké solární parky na našem území, z nichž největší byl tehdy komplex Ralsko s instalovaným výkonem téměř 60 MWp.

V roce 2014 pak byly pevné výkupní ceny definitivně zrušeny, čímž došlo k útlumu solární energetiky. V následujících letech bylo uvedeno do provozu jen několik málo jednotek MW instalovaného výkonu. Tento nepříznivý stav trval až do konce roku 2015, kdy byla zavedena podpora ve formě dotačního titulu Nová zelená úsporám (NZÚ). Peníze na tuto podporu stát získává prodejem emisních povolenek. Od této doby se zejména mále fotovoltaické systémy těší každý rok stále většímu zájmu. Se zrušením výkupních cen tak dochází primárně k rozvoji spíše menších projektů určených pro residenční bydlení, čemuž odpovídá i forma podpory ze strany státu.

Pro rok 2019 lze dokonce hovořit o menší revoluci v segmentu fotovoltaických systémů, neboť ve srovnání s rokem 2018 došlo ke skokovému nárůstu žadatelů o dotaci, a to přibližně až o 70 %. [3] Do DS bylo nově připojeno téměř 3000 střešních instalací na rodinných domech jejichž celkový výkon dosahuje zhruba 12 MWp. Zajímavé také je, že téměř polovina těchto nově realizovaných instalací je doplněna o bateriový systém pro akumulaci přebytků. Tato kombinace může celou ekonomiku provozu výrazně zefektivnit. Ve stejném roce byl také velký zájem o nebateriové systémy s tepelným využitím přebytků. [4] Je tedy zřejmé, že decentrální energetika se pomalu stává běžnou součástí domácností.

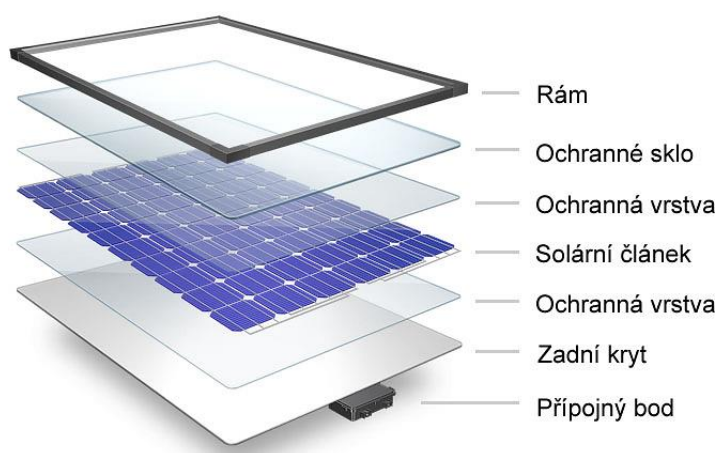
2 Komponenty malých fotovoltaických systémů

Pro další kapitoly této práce je vhodné si stručně představit hlavní a zároveň nejdražší komponenty fotovoltaického systému. Detailnější popis složení ceny FV systému uvádí například [5, str. 12 a 14].

2.1 Fotovoltaický modul

Fotovoltaický modul (někdy též panel) je složen z několika fotovoltaických článků. Nejčastěji se jedná o 60 až 72 sériově zapojených článků pro dosažení vyšší hodnoty výstupního napětí. Na Obrázku 1 je znázorněna konstrukce solárního modulu. Hliníkový rám slouží k připevnění panelu na konstrukci a také jako jeho ochrana proti vnějším vlivům. Jako těsnění bývá použit silikonový tmel, který brání pronikání vlhkosti a následné korozi pájených spojů. Tvrzené sklo v kombinaci s ochrannou vrstvou, kterou tvoří laminační materiál EVA (ethylen-vinyl acetát), chrání články modulu z obou stran. V našich zeměpisných šířkách se nejčastěji používají moduly s články z monokrystalického křemíku. Existují ale také tenkovrstvé technologie nebo články s organickými materiály. Zadní krycí vrstvu tvoří vícevrstvá tedlarová fólie. Dále je na zadní straně umístěna přípojovací skříň, kde jsou vyvedeny vývody pro propojení s ostatními moduly. Řetězec sériově propojených panelů se potom označuje jako string. Tento výraz se používá také pro sériově propojené řetězce článků jednoho modulu. [6]

Účinnost modulu se obvykle pohybuje mezi 16 až 22 %. Většina výrobců garantuje, že po 25 letech provozu tato účinnost neklesne pod 80 % původní hodnoty. Cena dnes běžně používaného modulu s výkonem 270 Wp se pohybuje lehce přes 3000 Kč. V současné době se na trhu pomalu prosazují moduly ve výkonové řadě 300 až 350 Wp. Při instalaci systému je velmi důležité vždy používat panely stejných parametrů od jednoho výrobce. Až 80 % veškeré produkce je dnes vyráběno v Číně, kde se pro výrobu používají především plně automatizované provozy s roční kapacitou produkce až 10 GW v režimu 4.0. Továrny, které vyrábějí méně než 1 GW ročně jsou dnes považovány za neekonomické. [6]



Obrázek 1: Konstrukce fotovoltaického krystalického modulu [7]

2.2 Měníč

Pomocí měniče (někdy také střídač nebo invertor) lze fotovoltaický zdroj připojit do distribuční sítě. Hlavní funkcí měniče je přeměna stejnosměrných veličin na střídavé. Dnes jsou střídače vybaveny také řadou dalších funkcí jako je například monitorování systému nebo jeho řízení a ochrana při nežádoucích stavech. Běžnou součástí fotovoltaických střídačů je sledování bodu maximálního výkonu (MPPT), neboť hodnoty vstupních veličin měniče se během dne prakticky neustále mění v závislosti na osvětlení a teplotě.

Tento prvek FV systému je jedním z nejvíce náchylných k poruše. Většina výrobců garantuje záruku na dobu 5 až 10 let. Účinnost střídače se pohybuje v rozmezí 96 až 98 %. V ČR se můžeme setkat s pojmem tzv. Evropská účinnost, což je vážený průměr účinností při různém procentuálním stupni zatížení střídače (měří se pro 5, 10, 20, 30, 50 a 100 % nominálního výkonu). Tato účinnost zohledňuje měnicí se klimatické podmínky a lépe odpovídá skutečnému provozu. [8] Cenové rozpětí je v případě střídačů relativně široké, nicméně lze očekávat, že nás vyjde na částku v řádech několika desítek tisíc Kč.

Dělení dle výkonu

Dle instalovaného výkonu rozlišujeme systémy s centrálním, řetězcovým nebo modulovým střídačem. Pro velké instalované výkony v rozmezí 100 až 2500 kW používáme centrální střídače. Výhodou je nižší cena, neboť nám stačí pouze několik kusů (obvykle je maximální výkon centrálního invertoru 500 kW). Problém ovšem nastává při poruše, kdy dojde k úplnému či částečnému zastavení výroby. Řetězcové, nebo také stringové, střídače se používají pro výkony mezi 1 až 15 kW (tedy i pro bezlicenční FVE). Sledování bodu maximálního výkonu je prováděno pro každý připojený string zvlášť, což zajišťuje vyšší účinnost. Modulové střídače se používají pro velmi malé aplikace v rozsahu 50 až 400 W, což v podstatě znamená, že každý modul má svůj vlastní měnič. V praxi se však nejčastěji setkáme s řetězcovým střídačem, který se používá přibližně pro 50 % všech aplikací. [6]

Hybridní střídač

Tento typ střídače se používá v kombinaci s bateriovým úložištěm pro ukládání přebytků FVE. Jejich výhodou je možnost ostrovního provozu systému při dostatečně nabitě baterii. Zároveň mohou být vybaveny funkcemi inteligentní regulace pro nabíjení baterie například v době levnějšího tarifu.

Asymetrický střídač

Samostatnou kapitolou z hlediska typů střídačů je tzv. asymetrický střídač, který je energii ze zdroje schopen dodávat do každé fáze zvlášť dle momentální potřeby. Takovýto střídač je v podmínkách ČR velmi výhodný, neboť tak lze předejít úskalím spojeným s fázovým měřením elektrické energie (více v kapitole 3.3.1). Firmy, které se instalacemi FVE na střechách rodinných domů zabývají, by o tomto střídači měly vědět a automaticky ho případnému zákazníkovi i nabídnout. Nevýhodou asymetrického střídače je jeho omezená dostupnost a vysoká cena, neboť ve většině států EU je spotřeba elektrické energie měřena součtově a používání tohoto typu střídače pak není potřeba.

2.3 Zařízení pro akumulaci elektrické energie

Na celkovou ekonomiku provozu fotovoltaického systému bude mít značný vliv také to, kolik vyrobené energie dokážeme v objektu zužitkovat, aniž bychom ji museli lacině, nebo dokonce zcela zdarma prodávat distributorovi. V případě bezlicenčních FV systémů je dnes nejčastějším způsobem akumulace přebytků buď jejich ukládání do bateriového úložiště nebo tepelná akumulace formou ohřevu vody v zásobníku.

2.3.1 Elektrochemické akumulátory

Tento způsob akumulace byl v minulosti kvůli vysoké pořizovací ceně používán zejména pro ostrovní systémy, kde je jeho použití většinou nezbytné. V současné době jsou však zásluhou státních dotací stále častěji využívány i u systémů připojených k síti. Z dostupných bateriových technologií se pro malé FV systémy nejvíce používají akumulátory na bázi olova nebo lithia. Ve spojitosti s FV zdroji se ještě využívají průtokové baterie, které jsou ale pro malé systémy neekonomické.

Olověné akumulátory

Jedná se o nejstarší a zároveň stále ještě nepoužívanější sekundární elektrochemický zdroj. Dle použití rozlišujeme olověné baterie startovací, staniční, trakční a speciální fotovoltaické baterie. Poslední dva jmenované typy jsou uzpůsobeny k cyklickému provozu. Hloubka vybití je u těchto akumulátorů přibližně 50 %. [9] Jejich hlavními přednostmi je nízká míra samovybití a příznivá cena. Mezi nevýhody patří nízká energetická hustota v rozsahu 25 až 50 Wh.kg⁻¹, proto mají vyšší hmotnostní a prostorové nároky. Dále se vyznačují nižší životností s počtem nabíjecích cyklů v rozmezí 200 až 1 000. Problémem je malá hloubka vybití a toxicita olova. [10, str. 2] Pokud navíc necháme olověný akumulátor delší dobu v nedostatečně nabitém stavu, může dojít vlivem chemických reakcí k sulfataci elektrod, což se projeví snížením kapacity akumulátoru.

Lithium-iontové akumulátory

Olověné baterie jsou dnes již v mnoha ohledech překonány právě lithium-iontovými akumulátory, které se vyznačují vyšším počtem nabíjecích cyklů (někteří výrobci udávají více než 7 000), energetickou hustotou v rozmezí 75 – 200 Wh.kg⁻¹ a účinností až 97 %. [10, str. 2] Dále tyto baterie netrpí paměťovým efektem. Vzhledem k rostoucí oblibě lithium iontových akumulátorů bylo vyvinuto několik dalších technologií na bázi lithia, které se liší materiálem katody. Pro fotovoltaické systémy se nejvíce používá technologie LiFePO₄ (zkráceně též LFP) vyznačující se dlouhou životností (až 20 let při nízké zátěži) a teplotní stabilitou. [9] Tato technologie je relativně bezpečná, neboť se vyznačuje nižší toxicitou či rizikem samovznícení. V posledních letech cena lithiových akumulátorů každoročně klesá a nyní se pohybuje kolem 3 000 Kč/kWh (nezahrnuje BMS). Vzhledem k větší možné hloubce vybití (až 80 %) vychází cena za uloženou kWh výhodněji než u olověných akumulátorů.

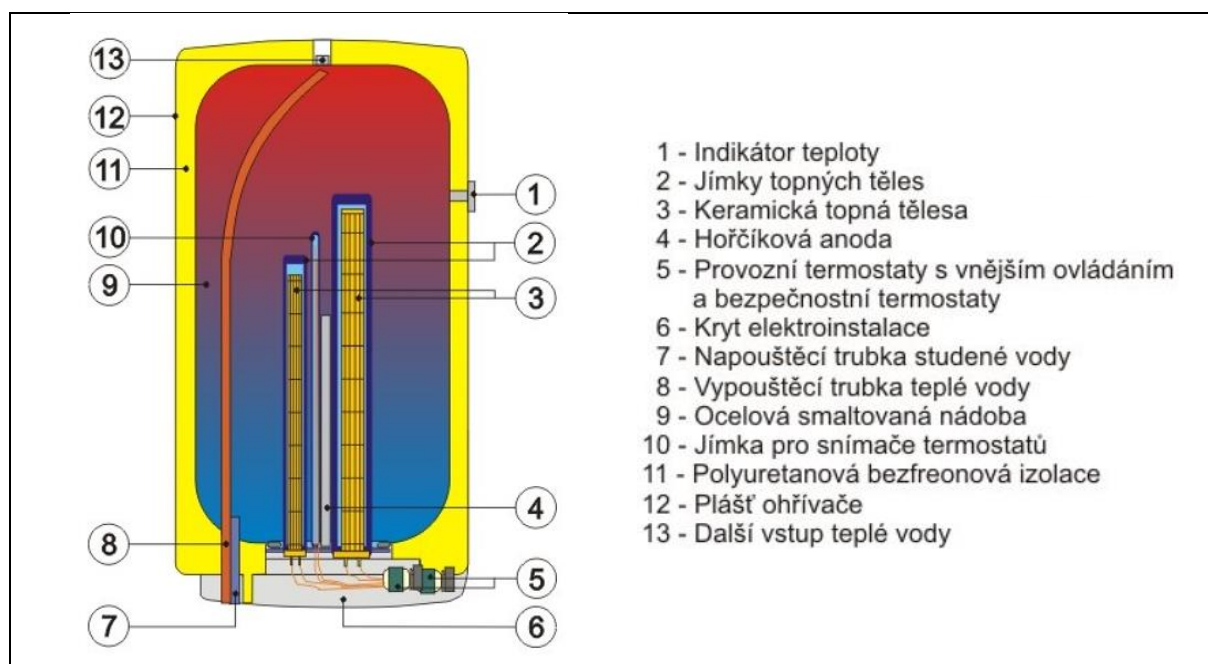
Někteří dodavatelé dnes nabízejí bateriová úložiště v podobě tzv. bateriových boxů, což je provedení, které v sobě uchovává všechny potřebné součásti včetně inteligentního řídicího systému. Toto zařízení například nabízí společnost ČEZ (Battery Box 1F EASY) s volitelnou kapacitou baterie od 2,4 do 7,2 kWh. [11] Cena těchto boxů se pohybuje přibližně v rozmezí 14 až 17 tisíc Kč/kWh. [12], [13]

2.3.2 Zásobník teplé vody

Hlavními komponenty zásobníku TV¹ je akumulční nádoba a topné těleso, jež je v domovních instalacích obvykle napájeno 1fázovým napětím 230 V nebo 3fázovým napětím 400 V. Topné těleso bývá umístěné ve spodní části nádoby (u svislých instalací), čímž je zajištěno stoupání již ohřáté vody v zásobníku směrem vzhůru. Spínání tělesa je ovládáno řídicí jednotkou, která je vybavena termostatem a někdy také přijímačem HDO. Zásobník TV lze využít k lokální akumulaci přebytků FVE ve formě tepla.

V případě kombinace s FVE se pak pro nulové přetoky do DS a zajištění požadované minimální teploty vody používají zásobníky se dvěma topnými tělesy, jež jsou řízeny regulátorem. První těleso odebírá energii z DS a vodu ohřívá pouze tehdy, poklesne-li teplota vody v nádrži pod minimální nastavenou mez. Druhé topné těleso je vhodné pro nesouměrné zatížení a akumuluje přebytky z FVE (např. topná příruba od výrobce Dražice, typ TPK 210-12/6,6 kW). V případě zásobníku s jedním tělesem probíhá v daný moment ohřev buď z přebytků nebo z DS.

Na Obrázku 2 je zobrazeno provedení se dvěma topnými tělesy. Nedílnou součástí je také pojistný ventil, který funguje jako ochrana proti přetlaku nebo podtlaku v nádobě (v Obrázku 2 není uvedeno). Sehnat dnes můžeme zásobníky různých velikostí a objemů. Konkrétní velikost se většinou volí dle počtu osob žijících v domácnosti. Hlavní předností této formy akumulace je relativně jednoduchá konstrukce a nízká cena, která se obvykle pohybuje v řádech několika jednotek tisíc Kč. Při instalaci FV systému navíc není vždy nezbytně nutné měnit stávající zásobník TV za nový.



Obrázek 2: Konstrukce zásobníku teplé vody [14]

¹ Ve starší literatuře se můžeme setkat s výrazem TUV (teplá užitková voda), nicméně od tohoto značení již současné normy upustily. Dnes je používán kratší výraz TV (teplá voda). Dále je také vhodné si terminologii upřesnit i v případě samotného zásobníku TV. Velmi často lze narazit na označení bojler, které je ale používáno spíše pro komerční účely. Odborná literatura preferuje výraz „zásobník teplé vody“.

2.4 Další komponenty pro instalaci FVE ²

Nosné konstrukce

Pro uchycení FVE na střeše budovy jsou vyráběny různé druhy konstrukcí, které se odvíjejí od typu střechy (šikmé, rovné, trapézové atp.). Použitým materiálem je nejčastěji hliník. Konstrukce by měla být dimenzována tak, aby odolala všem klimatickým podmínkám v dané lokalitě, včetně mechanického zatížení v důsledku větru nebo sněhu a ledu. Střešní konstrukci lze upevnit dvěma způsoby. Jedná se o kotvení přímé, které je lehčí ale zároveň vyžaduje proniknutí bodových kotev do střechy objektu (dojde k narušení hydroizolace střechy, kterou je potřeba následně ošetřit), a kotvení zátěžové, které se používá pro rovné střechy a eliminujícím faktorem je zde nosnost. [7]

Kabeláž

Pro propojení modulů je potřeba kabeláže, která musí být schopna odolat působícímu UV záření. Průřez kabelů je většinou větší než 4 mm² a jedná se o kabely s dvojitou izolací. Jedním z požadavků je teplotní stabilita, neboť se propojí mezi moduly, vlivem okolního prostředí, může výrazně zahřívát. Pro spojení kabelu se používají solární konektory typu MC3 nebo MC4. Předpokládaná životnost kabeláže je alespoň 30 let, podobně jako životnost modulů. [6] Kabelové trasy by měly být vedeny v kovových žlabech nebo plastových chráničkách. Je také vhodné se vyvarovat kontaktu kabeláže s ostrou hranou instalací například gumové podložky. Při poškození izolace může dojít k přímému zkratu a následně i k požáru. [15, str. 6]

Ochranné prvky

Mezi důležité ochranné prvky patří jističe a pojistky, které obvod chrání proti zkratům vzniklým při poruše. Jističe se dimenzují na maximální napětí systému. Problémem stejnosměrných jističů je uhašení oblouku při rozpojení. Ochranné součástky se instalují jak na stejnosměrné, tak ale i na střídavé, části obvodu. Pro obě části jsou používány prvky jiných parametrů, přičemž vyšší riziko poruchy hrozí ve stejnosměrné části obvodu. Důležitá je také ochrana systému před úderem blesku, k čemuž slouží různé svodiče přepětí anebo jímače, které jsou uzpůsobeny pro připojení do rozvaděčové krabice. V obvodě také mohou být instalovány požární vypínače, které na základě teplotních čidel provedou samočinné odpojení FVE. Případně lze vypínač realizovat jako stop tlačítko umístěné například uvnitř objektu blízko hlavního rozvaděče. [15, str. 7]

² Pozn.: V zahraniční literatuře se lze setkat s označením *Balance of System (BOS)*, což označuje všechny komponenty fotovoltaického systému, vyjma solárních panelů.

3 Národní specifika

3.1 Legislativní rámec systémů připojených k distribuční soustavě

Tato práce se zabývá malými fotovoltaickými systémy, jež jsou propojeny s distribuční sítí (tzv. on-grid systémy), proto se blíže zaměříme na legislativní rámec, který upravuje podmínky jejich připojení a provozu. Důležité jsou v tomto ohledu také dotační tituly, které mohou výrazně ovlivnit rozhodovací proces při pořizování takového systému. V kontextu zaměření práce jsou důležité následující dokumenty:

- Vyhláška č. 16/2016 Sb. Vyhláška o podmínkách připojení k elektrizační soustavě [16]
- Zákon č. 458/2000 Sb. zkráceně označovaný jako Energetický zákon [17]
- Pravidla provozování distribuční soustavy [18]
- Program Nová zelená úsporám [19]

Dokument [16] specifikuje pojem tzv. mikrozdvoj, což je výrobní zdroj paralelně provozován s DS na hladině NN s jmenovitým střídavým fázovým proudem do 16 A na fázi včetně a dále s maximálním instalovaným výkonem do 10 kWp včetně. Připojení mikrozdvoje probíhá dle této vyhlášky § 16 ve zjednodušeném režimu, přičemž žadatel musí splnit několik podmínek. Zásadní je v tomto ohledu požadavek na využití vyrobené elektřiny především pro vlastní spotřebu. Povoleny jsou pouze krátkodobé přetoky elektřiny do DS, které zároveň nezvýší hodnotu napětí v místě připojení. Tento požadavek může být ošetřen správným technickým návrhem. V praxi toho lze dosáhnout například pomocí regulátoru, který případné přetoky energie akumuluje v zásobníku TV, nebo použitím střídače s vhodnou regulací. Při dodávání nedovolených přtoků do DS hrozí provozovateli sankce, které jsou v případě jednotlivých distributorů různé. Například na distribučním území PREDistribuce a.s. žádné sankce za přetoky nehrozí, a zákazník své přebytky „daruje“ distributorovi zdarma do sítě. [46] Jinou možností je připojení mikrozdvoje ve standardním režimu. V takovém případě lze přetoky prodávat obchodníkovi za předem sjednanou cenu.

Energetický zákon [17] lze považovat za hlavní dokument energetické legislativy v ČR. Dle jeho novely z počátku roku 2016 je možné připojovat výrobní s instalovaným výkonem do 10 kWp bez nutnosti žádat licenci udělovanou ERÚ, pokud tedy již není v odběrném místě připojena jiná výrobní s licenci. Z pohledu zákona se totiž v takovém případě nejedná o podnikání v energetice. Dále je v [17] uvedeno, že připojení mikrozdvoje je možné pouze za předpokladu uzavřené smlouvy o připojení mezi zákazníkem a provozovatelem distribuční sítě (PDS).

Připojení výrobního zařízení zákazníka je ovšem možné pouze při dodržení stanovených podmínek, které jsou uvedeny v dokumentu [18] Pravidla provozování distribuční soustavy (PPDS). Každý distributor si tato pravidla vytváří sám, přičemž podléhají schvalovacímu procesu ERÚ. Pravidla pro provoz vyrobené a akumulací zařízení paralelně pracujících s DS jsou uvedeny v Příloze 4, kde jsou mimo jiné popsány náležitosti žádosti o připojení výrobní k síti a proces jejího schválení.

V kontextu podpory obnovitelných zdrojů jsou malé fotovoltaické systémy dnes nejčastěji podporovány formou dotací. Pro malé domácí FVE je určen dotační program Ministerstva životního prostředí Nová zelená úsporám (NZÚ). Žádosti lze podávat od 1. března 2020 v rámci již 3. výzvy. Žádost o podporu je možné podávat v různých etapách realizace projektu. Pro mikro zdroje instalované na rodinných domech je určena oblast podpory C.3, kam spadá též instalace FV systému. V této oblasti lze získat podporu ve výši až 350 tisíc Kč na jeden dům. Podmínky udělení dotace ve vybraných podoblastech podpory C.3 budou blíže zkoumány v případové studii této práce.

3.2 Tarifní struktura v ČR a funkce systému HDO

Pro vyhodnocení odběrového profilu je výhodné znát tarifní (někdy též distribuční) sazbu, za kterou elektrickou energii můžeme od distributora odebírat. Dle vyhlášky č. 408/2015 Sb. [20] jsou odběry na hladině nízkého napětí rozděleny do kategorií C (podnikatelé) a D (domácnosti). Dle použitých spotřebičů bývá zákazníkovi přiznána tarifní sazba. Podmínky pro získání dané sazby u distributora jsou stanoveny Cenovým rozhodnutím ERÚ. V tomto dokumentu jsou dále uvedeny ceny regulovatelné složky elektřiny pro každou sazbu. Tabulka č. 1 popisuje rozdělení sazeb dle charakteru odběru.

Tabulka 1: Rozdělení distribučních sazeb dle charakteru odběru [20]

Třída	Typ zákazníka	Charakter odběru	Pevné ceny distribuce podle cenového rozhodnutí Úřadu
1	C	odběratel bez tepelného využití elektřiny	C01d; C02d; C03d
2	C	odběr s akumulacním spotřebičem odběr s hybridním vytápěním	C25d; C26d; C27d; C35d
3	C	odběr s přímotopným systémem vytápění odběr s tepelným čerpadlem	C45d; C46d; C56d
4	D	odběr bez tepelného využití elektřiny	D01d; D02d; D61d
5	D	odběr s akumulacním spotřebičem	D25d; D26d; D27d
6	D	odběr s hybridním vytápěním	D35d
7	D	odběr s přímotopným systémem vytápění odběr s tepelným čerpadlem	D45d; D55d; D56d; D57d
8	C	odběr pro veřejné osvětlení	C62d

Část sazeb uvedených v tabulce je tzv. dvoutarifních, kdy dochází ke střídání nízkého a vysokého tarifu (NT a VT). Hlavním smyslem zavedením dvoutarifních sazeb je snaha o rovnoměrnější rozložení spotřeby v DS během dne prostřednictvím cenové motivace odběratele. Cena za regulovanou složku elektřiny je totiž v době NT nižší. Tyto sazby se používají pro odběrná místa, kde je instalován elektrický spotřebič s vyšší spotřebou, typicky např. zásobník TV, jehož spotřeba se může pohybovat v rozmezí přibližně 1 000 až 6 000 kWh/ročně. K aktivaci NT nebo VT dochází prostřednictvím systému hromadného dálkového ovládání (HDO), což je soubor několika zařízení (vysílač, přijímač), který umožňuje vyslat signál přímo k zapnutí nebo vypnutí spotřebiče nebo k přepnutí tarifu. V době VT bývají spotřebiče s velkým odběrem blokovány. Časy spínání HDO se pro jednotlivé tarify liší. Přesný

čas přepínání tarifů je určen distributorem. Jelikož se tato práce primárně zabývá optimalizací provozu fotovoltaických systémů pro domácnosti, budeme se v Tabulce 1 blíže věnovat odběratelům kategorie D, kde jsou mimo sazby D01d a D02d všechny ostatní dvoutarifní. Jedním z cílů praktické části pak bude tvorba simulace s akumulací přebytků ohřevem TV (tarifní sazby třídy 5). Pořízením akumulačního zařízení vzniká zákazníkovi u distributora nárok na výhodnější dvoutarifní sazbu.

3.3 Měření elektřiny v ČR

Měření elektřiny je v ČR definováno vyhláškou č. 359/2020 Sb. [21]. Dokument rozlišuje měření typu A, B a C. Hlavní rozdíly mezi jednotlivými typy jsou uvedeny dále.

Měření typu A

Jedná se o průběhové měření, kde hodnota činného a jalového výkonu je zaznamenávána průběžně přímo měřicím zařízením a naměřená data jsou přenášena dálkově vždy 1x denně. Hodnoty jsou měřeny každých 15 minut. Používá se pro předávací místa mezi soustavami s napětím vyšším než 52 kV, dále pro výroby připojené na napětíové hladině vyšší než 1 kV a odběrná místa s rezervovaným příkonem nad 250 kW a napětím v intervalu 1 až 52 kV. [21]

Měření typu B

Opět se jedná o průběhové měření s průběžným záznamem hodnot činného a jalového výkonu, ovšem přenos dat je oproti kategorii A jiný než denní. Používá se pro předávací místa mezi distribučními soustavami s napětím do 1 kV s nepřímým měřením, u přímo připojených výroben k DS na napětíové hladině do 1 kV a instalovaným výkonem nad 10 kW a odběrná místa s rezervovaným příkonem do 250 kW a napětíové hladině v rozmezí 1 až 52 kV. [21]

Měření typu C

Měření typu C se dělí do podkategorií C1 až C4. Vyjma kategorie C4 se jedná o průběhová měření s dálkovým přenosem údajů standardně 1x za měsíc a měřicím intervalem 15 minut. U měření kategorie C4 jsou data přenášena a zpracována 1x ročně. Typ C se používá pro domácnosti a menší podniky. Patří sem odběrná místa a výroby na napětíové hladině do 1 kV. Instalovaný výkon výroben je do 10 kW. Kategorie C1 a C2 je vybavena funkcí technického blokování spotřebičů. [21]

Z porovnání jednotlivých typů měření je zřejmé, že pro rodinné domy připadá v úvahu pouze kategorie měření typu C. Tento poznatek bude dále využit při tvorbě komplexního odběrového profilu rodinného domu.

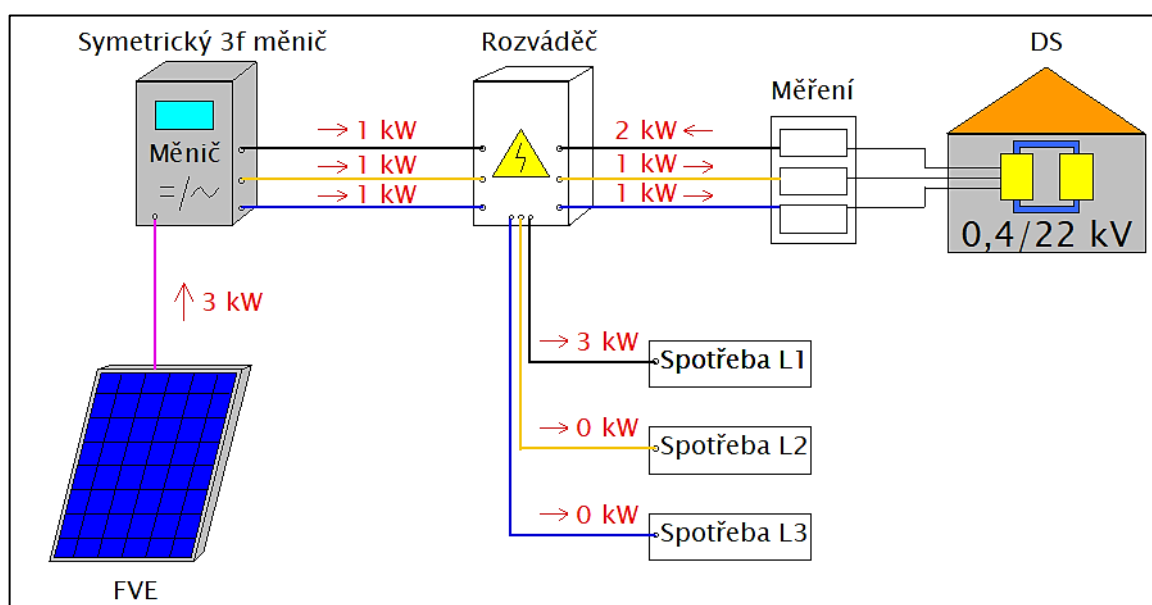
3.3.1 Problematika fázového měření

Při analýze návratnosti domácích fotovoltaických systémů na území České republiky je velmi důležité vzít v potaz, jakým způsobem je elektrická energie měřena a účtována. Do roku 2011 zde stejně jako ve většině států EU byla elektrická energie měřena tzv. součtově. Vyrobená energie z FVE se porovnávala s celkovým odběrem z DS po jednotlivých fázích a následně byla provozovateli účtována pouze výsledná bilance. Ovšem s rozvojem nových, zejména domácích fotovoltaických elektráren, došlo k

zavedení fázového měření. Rozdíl v těchto dvou způsobech měření elektrické energie ilustruje následující zjednodušený příklad.

Uvažujme menší domácí fotovoltaickou elektrárnu, která v daný okamžik za příznivých podmínek vyrobí 3 kW. Dále v systému předpokládejme symetrický třífázový měnič, který vyrobenou energii rozdělí rovnoměrně mezi všechny tři fáze. Zároveň ve stejný okamžik v domě uvažujme požadavek na 3 kW pro jednofázovou zátěž připojenou na fázi L1 (může to být např. ohřev vody v zásobníku). V případě součtového měření měřicí přístroj porovná 3 kW výroby proti 3 kW potřebných pro ohřev vody a výsledný rozdíl je nula.

Jiná situace ovšem nastává pro stejný příklad při měření fázovém, viz Obrázek 3. Na vstupu objektu je pro fázi L1 spotřeba 2 kW ze sítě, zbylé dvě fáze dodávají každá do DS po 1 kW. V praxi tak zaplatíme za dodávku 2 kW ze sítě do fáze L1 a zároveň prodáme celkem 2 kW z fází L2 a L3 za výkupní cenu. Úskalí fázového měření spočívá v tom, že výkupní cena elektrické energie je výrazně nižší než cena, za kterou musíme elektřinu od distributora nakupovat. Je tedy zřejmý nepříznivý dopad na ekonomiku provozu malých FVE. [22]



Obrázek 3: Fázové měření elektrické energie
Zdroj: Vlastní zpracování dle [22]

Řešením tohoto problému může být instalace asymetrického střídače. Ovšem takovýto střídač je výrazně dražší než klasický symetrický. Dalším možným řešením může být změna v zapojení domovního rozváděče, která ale není vždy proveditelná, navíc je k tomu potřeba podrobná analýza využití všech spotřebičů na jednotlivých fázích. Tento problém by bylo možné snadno vyřešit změnou legislativy, kdy by bylo opět přistoupeno k součtovému měření elektrické energie, stejně jako ve většině okolních států. O této variantě se ale zatím na úrovni politických rozhodnutí neuvažuje, a proto je nezbytné při návrhu malých FVE hledat optimální technické řešení, případně maximalizovat využití vlastní produkce.

4 Tvorba komplexního odběrového diagramu

Pro tvorbu simulací uvedených v praktické části této práce je nezbytné získat komplexní odběrový diagram objektu. Sem patří zejména odběrový profil EE a TV. K získání těchto profilů lze využít buď reálná data nebo některý ze simulačních nástrojů, který dokáže požadovaná data vygenerovat. Jelikož v prováděných simulacích budeme pracovat s časovým krokem 1 minuta, je nezbytné získat data se stejným měřicím krokem, případně hodnoty odběrových profilů interpolovat.

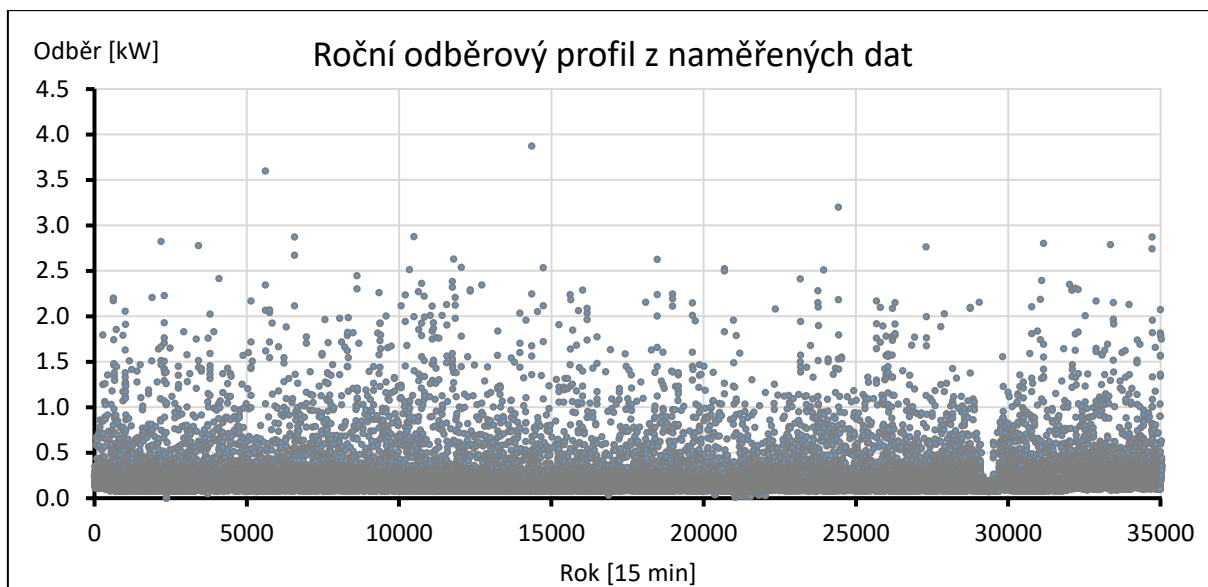
4.1 Odběrový profil elektrické energie

Pro správné dimenzování FVE a akumulčních prvků je výhodné znát reálné profily spotřeby rodinných domů (někdy též zátěžový profil). Konkrétní data o spotřebě elektrické energie byla poskytnuta společností PREdistribuce a.s. Jedná se o profily s průběhovým měřením typu C (viz kapitola 3.3). Data byla zaznamenána inteligentními elektroměry v rámci projektu chytrého měření AMM. Měřicí interval uvedených dat je 15 minut. Získaná data jsou anonymizována a pochází z roku 2020. Konkrétní profil spotřeby reálného objektu je jedním ze vstupů simulace. Data jsou v simulaci automaticky lineárně interpolována s ohledem na minutový krok.

4.1.1 Příklad reálného profilu pro sazbu D02d

Účelem vzorového profilu použitého v simulacích je zohlednění pouze tzv. uživatelské energie. Jedná se o EE vynaloženou především na provoz běžných elektrospotřebičů v domácnosti. Sem patří například lednice, pračka nebo myčka. Tomuto účelu nejlépe odpovídá některý z odběrových profilů s jednotarifní sazbou pro domácnost, neboť takovýto profil nezahrnuje další elektrospotřebiče s vyšší roční spotřebou. V rámci simulace se bude spotřeba EE na ohřev TV dopočítávat zpětně. Důvodem je snaha o maximální zohlednění vstupních parametrů zadanych uživatelem, jako je velikost nádrže, příkon topného tělesa, případně také odběrový profil TV. Pro tyto účely byl vybrán zátěžový profil rodinného domu, kde je uplatněna tarifní sazba D02d. Tato sazba je určena právě pro spotřebitele, kteří nepoužívají elektřinu pro ohřev vody či vytápění objektu. Další jednotarifní sazba D01d, která by teoreticky také připadala v úvahu, je používána spíše pro objekty s velmi nízkou spotřebou, jako jsou chaty nebo garáže, a proto profil s touto sazbou není použit. [23]

Vybraný profil je uveden na následujícím Grafu 1. Patří k rodinnému domu, který se nachází na území hl. m. Prahy v městské části Praha-Kunratice. Velikost jističe je 3x25 A. Celková roční spotřeba objektu je 2 040 kWh. Jelikož byly hodnoty zaznamenány pro přestupný rok, je v dalších krocích z důvodu snadnější manipulace 29. únor vynechán.



Graf 1: Roční odběrový profil elektrické energie pro rodinný dům se sazbou D02d
Zdroj: Vlastní zpracování

4.1.2 Profil získaný pomocí normalizovaných TDD

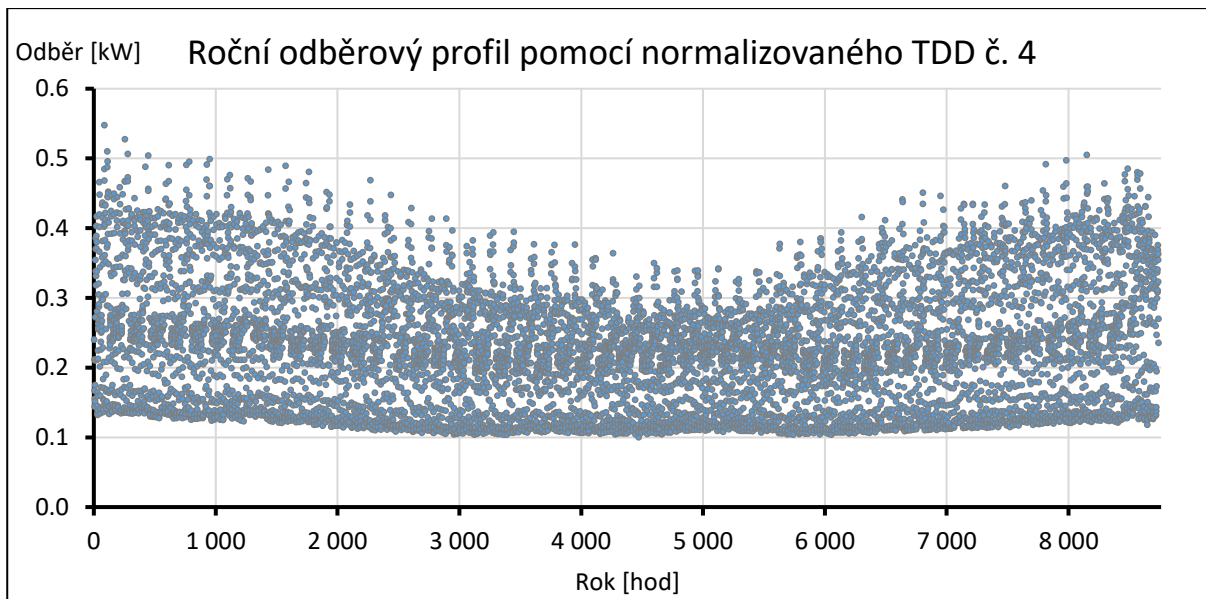
Další možností, jak lze získat celoroční údaje o spotřebě EE, je tvorba odběrových profilů pomocí typových diagramů dodávky (TDD). Tuto metodu je vhodné použít pro stanovení diagramu spotřeby u odběratelů s neprůběhovým měřením typu C, neboť zde nejsou k dispozici průběžně naměřená data. V takovém případě ale potřebujeme znát celkovou roční spotřebu. Dle tabulky č. 1 jsou odběratelé rozděleni do 8 tříd. Pro každou z těchto tříd je na základě statistického zpracování operátorem trhu s elektřinou (OTE) určen normalizovaný TDD, který je dle [24, str. 403] tvořen následovně:

„Normalizovaný typový diagram dodávky obsahuje 8760 relativních hodnot průměrných hodinových odběrů v roce, které jsou vztaženy k hodnotě ročního maxima průměrných hodinových odběrů určených z měření vzorků TDD v distribuční síti. Průměrné hodinové odběry použité ke stanovení TDD jsou přepočteny na obvyklé klimatické podmínky – teplota, vítr, slvit, srážky.“

Normalizované TDD si lze stáhnout z webových stránek OTE. [25] Pro tvorbu ročního odběrového profilu je pak potřeba použít přepočet:

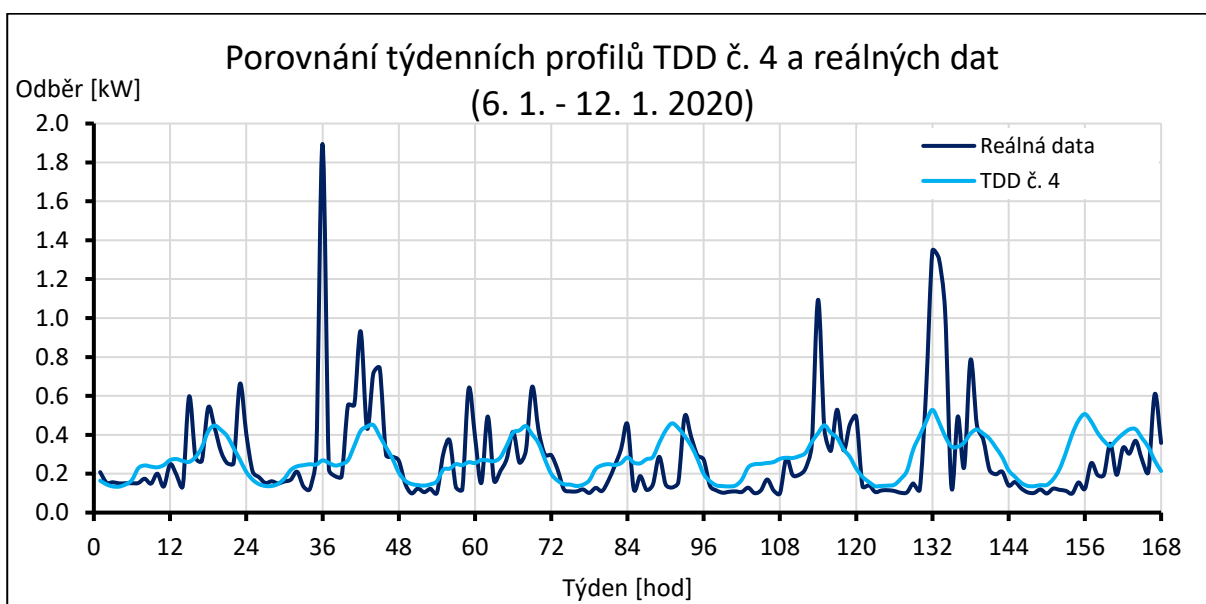
$$O_{hod} = O_{rok} \cdot \frac{r_{hod}}{\sum_{hod=1}^{8760} r_{hod}} \quad (4.1)$$

kde O_{hod} je hodinová spotřeba; O_{rok} je celková roční spotřeba objektu, v našem případě bude z důvodu pozdějšího porovnání použit stejný údaj o roční spotřebě, jako byl v předešlé části, tedy 2040 kWh; r_{hod} je velikost relativní hodnoty normalizovaného TDD pro danou třídu. Námí zvolený tarif D02d náleží do třídy TDD č. 4 (viz Tabulka 1). Vytvořený celoroční profil je uveden na dalším grafu. Použité hodnoty ze stránek OTE jsou pro rok 2020, tedy shodně jako data reálného profilu.



*Graf 2: Roční odběrový profil elektrické energie získaný pomocí normalizovaného TDD č.4
Zdroj: Vlastní zpracování*

Již na první pohled je zřejmé, že Graf 2 se výrazně liší od Grafu 1, neboť jak již bylo řečeno, profil získaný pomocí normalizovaného TDD je založen na průměrování hodnot vybraných vzorků. To je z hlediska aplikovatelnosti v simulaci nevýhodou, neboť zde nejsou obsaženy špičkové hodnoty ani větší výkyvy. Jsou-li tedy reálná data k dispozici, je vhodnější pracovat s nimi. Z Grafu 2 dále můžeme vyčíst, že spotřeba v zimních měsících stoupá. Důvodů může být několik. Například se lidé kvůli kratšímu dni více zdržují doma, a tudíž stoupá spotřeba pro osvětlení domácnosti. Bližší porovnání profilu dle TDD č. 4 a profilu reálné spotřeby je zobrazeno v Grafu 3, kde jsou uvedeny hodnoty pro náhodně zvolený týden v roce. Denní špičky jsou zde v případě reálných dat dobře patrné.



*Graf 3: Porovnání týdenních profilů - reálná data a TDD č.4 pro roční spotřebu 2 040 kWh
Zdroj: Vlastní zpracování*

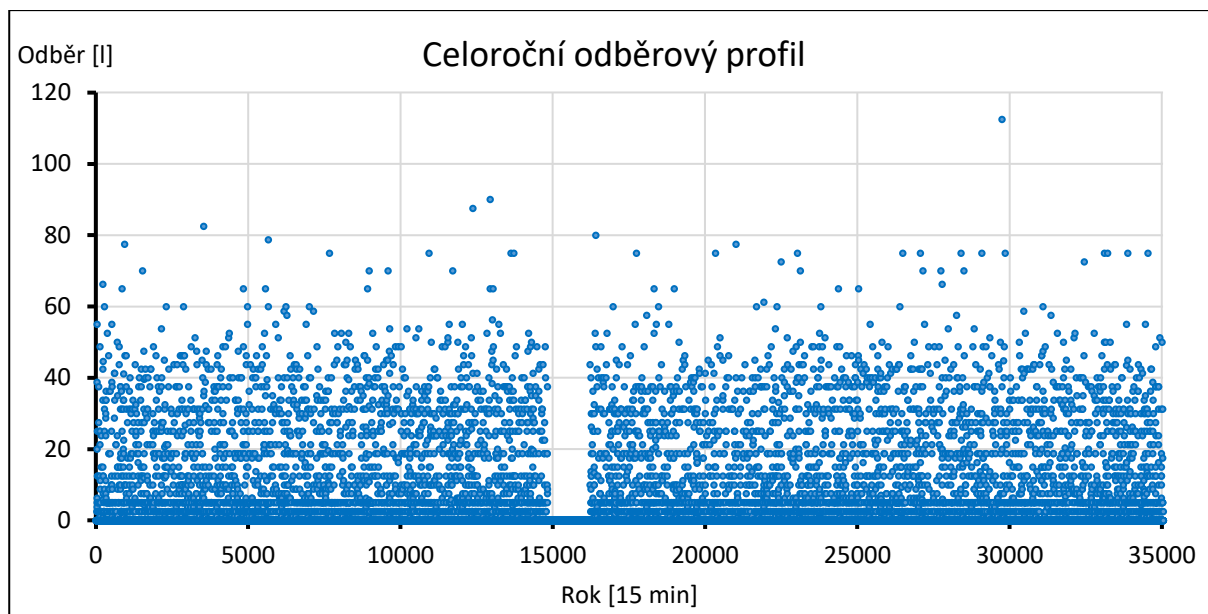
4.2 Odběrový profil teplé vody

4.2.1 Load Profile Generator

Pro účely získání odběrového profilu TV byl využit program *Load Profile Generator* (LPG), neboť naměřená data se nepodařilo získat. LPG na základě vstupů zadaných uživatelem dokáže modelovat různé odběrové profily TV ale i EE. V programu lze volit časový krok výstupních dat (1 min, 15 min, 1 h). Software je založen na psychologické teorii, která mapuje lidské chování za účelem uspokojování fyzických a psychických tužeb jedinců. Modelovaná osoba si volí aktivitu tak, aby dosáhla vždy maximálního uspokojení v daný okamžik. Například má-li daná osoba pocit hladu, rozhodne se jít vařit, přičemž pro tuto činnost použije konkrétní spotřebič a spotřebuje určité množství EE. Zároveň také bude potřebovat určité množství vody, jejíž odběr se rovněž promítne do celkového profilu TV. V každém okamžiku některá z tužeb roste a dříve či později dojde k jejímu uspokojení. [26, str. 24] Výhodou těchto dat je jejich relativně snadná modifikovatelnost nastavením vstupních parametrů. Manuál pro práci s programem je uveden ve [27, od str. 199]. Software je volně ke stažení na webové stránce www.loadprofilegenerator.de.

4.2.2 Profil jako výstup z LPG

V souvislosti s výstupy z LPG je důležité rozlišovat spotřebu horké a teplé vody (*hot water* a *warm water*). Odběr teplé vody totiž závisí na konkrétní teplotě potřebné pro danou aplikaci. Například teplota vody pro sprchování se pohybuje v rozmezí 35 až 40 °C, zatímco teplota vody na výstupu z ohřívače je obvykle vyšší než 50 °C. Z tohoto důvodu LPG pracuje s tzv. směšovačem, který zohledňuje míchání horké vody se studenou pro dosažení finální teploty. V simulacích je používán odběrový profil horké vody (*hot water*), neboť zohledňuje pouze odběr vody ze zásobníku. Graf 4 uvádí roční odběrový profil TV, který odpovídá předdefinované rodině žijící v běžném rodinném domě s celkovou roční spotřebou EE 4 664,9 kWh. Rodina se skládá z následujících členů: muž Egon (45 let), jeho žena Hella (40 let) a jejich dvě děti, Justus (15 let) a Lucia (11 let). Spotřebiče teplé vody jsou: kuchyňský dřez (7,5 l/min), umyvadlo (5 l/min), sprcha (12,5 l/min) a vana. Roční spotřeba teplé vody je pro tuto rodinu přibližně 95 m³, což představuje v průměru 65 l/os denně. Tento denní odběr je dle některých dostupných zdrojů spíše vyšší, běžně udávaná spotřeba bývá v rozmezí 40-50 l/os za den.



*Graf 4: Odběrový profil teplé vody.
Zdroj: Vlastní zpracování – výstup z LPG*

V grafu lze pozorovat část roku, kdy je odběr vody nulový. Předdefinované nastavení totiž uvažuje i období, kdy je rodina začátkem června dva týdny na dovolené. Dále je v grafu zřejmé časté opakování stejných hodnot v různých časech, způsobené nejspíše výpočetním algoritmem programu. Pokud by byla k dispozici naměřená reálná data, dal by se předpokládat výraznější náhodný rozptyl hodnot. Z důvodu čitelnosti jsou vyobrazená data pro časový krok 15 minut.

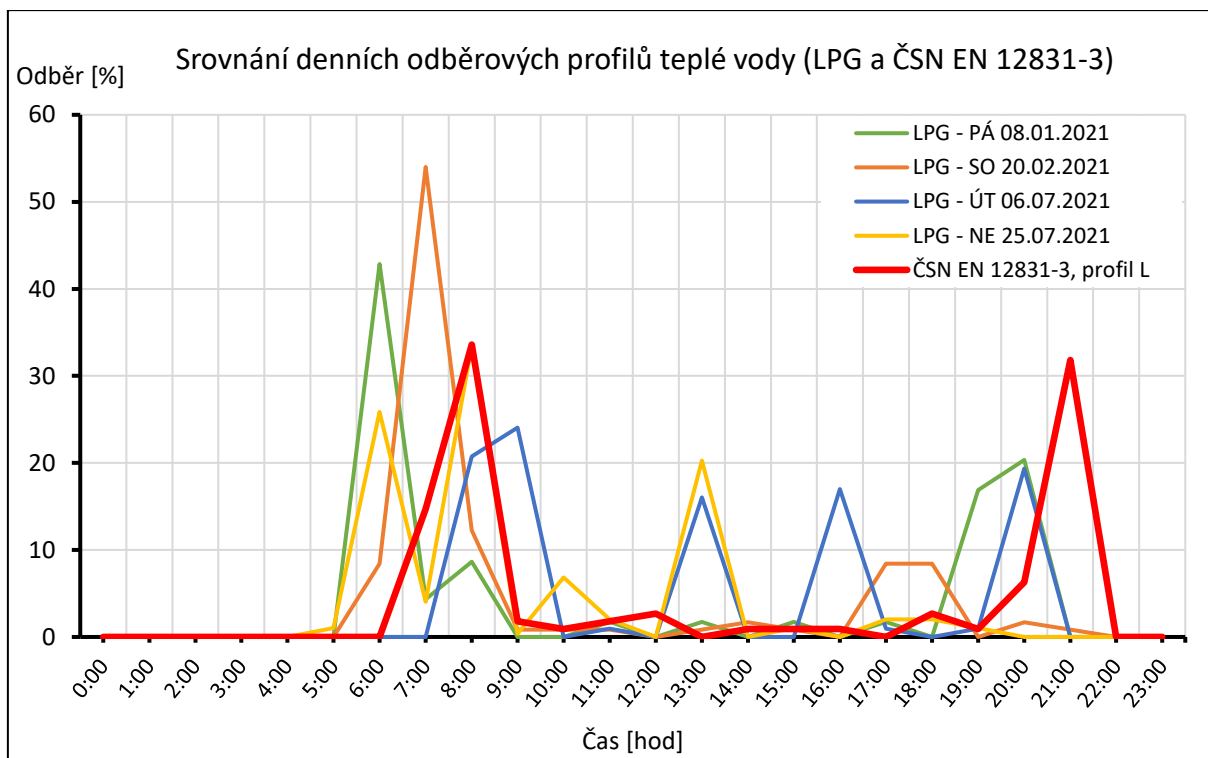
4.2.3 Profil dle ČSN EN 12831-3

Dalším způsobem, jak lze definovat odběrový profil TV, je použití normy ČSN EN 12831-3. V Příloze B tohoto dokumentu jsou uvedeny hodinové profily v poměrných jednotkách, a to vždy pouze pro jeden obecný den. Profily se dělí dle velikosti do několika tříd (XXS, XS, S, M, L, XL, XXL), ovšem přesný význam těchto označení není v normě blíže uveden. Vysvětlení nabízí Tabulka 2.

Tabulka 2: Odběrové profily a jejich význam dle [28, str. 25]

Odběrový profil	Typické použití
XXS	Umyvadlo se 40 °C vodou
XS	Sprcha s elektrickým průtokovým ohřivačem
S	Sprcha a umyvadlo s 35 °C vodou
M	Dvě sprchy a dřez s 55 °C vodou
L	Vana, sprcha a dřez s 55 °C vodou
XL	Několik van a sprch a dřez s 55 °C vodou
XXL	Současné použití van a sprch

Výstupnímu profilu LPG z předchozí kapitoly dle použitých spotřebičů teplé vody nejlépe odpovídá profil třídy L. V Grafu 5 je tento profil porovnán s několika náhodně zvolenými dny odběrového profilu z LPG. Hodnoty jsou pro všechny profily uvedeny v poměrných jednotkách.



Graf 5: Porovnání denních odběrových profilů teplé vody.
Zdroj: Vlastní zpracování

Z grafu je zřejmé, že profil třídy L v průběhu dne pracuje se dvěma odběrovými špičkami. Jednu v ranních hodinách, která se opakuje také ve vygenerovaných profilech, a další ve večerních hodinách, která se pro ostatní profily liší. Hlubší analýzou výstupů LPG bylo zjištěno, že důvodem ranní špičky je především spotřeba vody na sprchování a používání umyvadla v koupelně. Obojí lze vysvětlit ranní hygienou. Spotřeba TV v dalších hodinách je pro jednotlivé dny individuální. Například v letním víkendovém dni 25.07.2021 se některý z členů modelové domácnosti sprchoval okolo 13:00. Důvodem může být to, že LPG zohledňuje také sportovní aktivity jednotlivých členů rodiny, přičemž po ukončení aktivity se daná osoba rozhodla jít osprchovat. Zvýšený odběr ve večerních hodinách je ve většině případů způsoben sprchováním nebo napouštěním vany. Podrobnější odběr TV pro jednotlivé spotřebiče v závislosti na čase lze nalézt ve vygenerovaných výstupech programu. Hlavním důvodem, proč v simulacích bude použit profil z LPG, a nikoliv profil dle normy ČSN EN 12831-3 je to, že vygenerovaná data již obsahují minutový krok, a navíc jsou pro každý den jiná. Celoroční profil z LPG tak více odpovídá skutečnosti.

4.3 Metodika generování odběrových profilů

V předešlých částech byla tvorba odběrových profilů již blíže vysvětlena. Pro simulace bude použit odběrový profil EE získaný z reálných dat, ačkoliv tento profil lze získat také jako výstup z LPG, případně na základě normalizovaných hodnot TDD ze stránek OTE. Pokud by údaj o celoroční spotřebě EE nebyl k dispozici, je možné využít některý z dostupných zdrojů. Například na stránkách Českého statistického úřadu jsou uvedeny průměrné roční spotřeby elektřiny v domácnostech, a to i pro jednotlivé kraje. [29]

Nyní si blíže popíšeme generování odběrového profilu TV, neboť v simulacích budou použity pouze profily generované LPG. Je tedy potřeba mít daný software nainstalovaný v počítači. Dále popsané body se vztahují k samotné práci s programem.

1. Po otevření programu a nastavení základních parametrů domácnosti a jejích obyvatel je možné v záložce *Load types* vybrat typ zátěžového profilu. Pro případ TV to bude položka *Hot water*. Důvod volby tohoto parametru byl již vysvětlen v kapitole 4.2.2.
2. V nově otevřeném okně programu se otevře nabídka pro následující záložky:
 - Obecné (*General*) – slouží pro nastavení názvu odběrového profilu a názvu jednotek.
 - Převod jednotek (*Unit Conversion*) – zde dochází k výpočtu koeficientu převodu jednotek s ohledem na různé časové měřítko, které lze ve výpočtech zvolit
 - Korekce vypočteného převodního koeficientu (*Examples*) – v tomto okně jsou pro případnou korekci uvedeny příklady použití koeficientu převodu jednotek. Například je zde uvedeno, že při velikosti odběru 1000 l/min dojde po uplynutí jedné hodiny k celkovému odběru 60 000 l.
 - Aplikace zátěžového profilu (*Uses*) – z pohledu generovaných hodnot je tato záložka nejdůležitější. Zde jsou uvedeny všechny spotřebiče, které vlastní spotřebou spoluvytváří odběrový profil (kuchyňský dřez, sprcha, vana atd.). Po rozkliknutí jednotlivých spotřebičů je možné upravit četnost jejich využití a spotřebu při různých aktivitách. Tyto hodnoty lze pro jednotlivé členy domácnosti rozlišit. Seznam spotřebičů je rovněž modifikovatelný a jeho základní podoba již vzniká při volbě typu a parametrů domácnosti.
3. Před spuštěním simulace je vhodné uvést adresu v počítači pro export a ukládání výsledků. Nastavuje se v záložce *Calculation Outcomes*. Ve složce s výsledky je pak možné najít vygenerované soubory ve formátu CSV aplikace MS Excel. Minutový odběrový profil, který bude pro simulaci se zásobníkem TV použit, lze v souboru s výsledky nalézt pod názvem *SumProfiles.Hot water*.
4. Pro potřeby simulace byl tento profil ručně převeden do poměrných jednotek tak, aby tvar křivky profilu zůstal stejný, ovšem aby se mohl měnit s ohledem na počet osob žijících v objektu a na velikost denní spotřeby teplé vody, udávanou v litrech na osobu.
5. Pro simulaci se zásobníkem a FVE bude profil načítán ve formátu CSV v již přepočtených poměrných jednotkách. Profil bude modifikovatelný na základě zadávaných parametrů (počet osob a denní spotřeba TV), ovšem tvar jeho křivky zůstane stejný.
6. V případě, že je potřeba tvar křivky odběrového profilu změnit, je nezbytné znovu využít LPG a postupovat chronologicky dle výše popsaných bodů. Pro drobnější úpravy připadá v úvahu také ruční editace CSV souboru.

5 Simulace v softwaru SAM

5.1 System Advisor Model

Jako simulační software byl pro praktickou část práce vybrán *System Advisor Model (SAM)*. Jedná se o volně přístupný nástroj, který je vyvíjen od roku 2007 americkou národní laboratoří pro obnovitelné zdroje NREL. Software primárně slouží k vytváření technicko-ekonomických modelů s obnovitelnými zdroji energie. Zároveň umožňuje vytvářet vlastní simulace a funkce pomocí skriptovacího jazyka LK, ve kterém jsou psány vlastní simulace vytvořené autorem práce (dále spuštěné jako makro). Návod k osvojení funkcí tohoto programovacího jazyka je k dispozici zde [30]. Během psaní této práce bylo pracováno s verzí SAM 2020.2.29. Program a veškerá podpůrná literatura jsou dostupné pouze v anglickém jazyce. Vlastní nově vytvořené simulace v programu budou včetně jejich uživatelského rozhraní a komentářů ve zdrojovém kódu výhradně v českém jazyce.

Důvody pro volbu tohoto simulačního nástroje jsou následující:

- v programu již existují funkce, které lze zakomponovat při tvorbě vlastních zamýšlených simulací. Jedná se zejména o funkci modelování produkce fotovoltaického zdroje, a to i na několik let dopředu, přičemž lze podrobně nastavit jeho parametry;
- s výsledky jednotlivých funkcí lze dále pracovat prostřednictvím maker a skriptů;
- relativně snadný skriptovací jazyk LK, kde je pro jednotlivé funkce k dispozici okno nápovědy;
- podpora ze strany tvůrců programu; pořádání webinářů a fungujícího internetového fóra;
- možnost nahrávat vlastní data spotřeby EE, což bude využito při načítání vlastního odběrového profilu.

Mezi hlavní nevýhody programu patří:

- absence volby jazyka a rozlišení znaků s diakritikou;
- funkce ekonomické analýzy jsou určeny především pro americký trh;
- poměrně stručný manuál k ovládní skriptovacího jazyka LK, viz [30]. Některé funkce zde nejsou dostatečně vysvětleny nebo úplně chybí. Další literatura v tomto směru zatím není k dispozici.

Jelikož je tato práce zaměřena na domácí FVE a hospodaření s přebytky, budeme z dostupné nabídky programu používat pouze dva technicko-ekonomické modely, které budou též obohaceny o možnost akumulace energie ohřevem vody.

1. Model fotovoltaického systému bez akumulace (*Photovoltaic, Residential*)

Tento model bude použit pro případ, kdy přebytky chceme ukládat pouze do zásobníku TV. Funkce bude přidána prostřednictvím makra. V prostředí SAM lze model nalézt pod záložkou *Start a new project* → *Photovoltaic* → *Detailed PV Model* → *Distributed* → *Residential Owner*. Z nabídky modelů s FVE nabízí tento nejpodrobnější parametrizaci systému. Oproti jiným modelům zde můžeme nastavit typ a parametry modulu, střídače nebo lze blíže specifikovat

ztráty systému. Nemáme-li data o jednotlivých komponentách k dispozici, je možné ponechat defaultní nastavení, nebo si komponenty vybrat z dostupné databáze programu, případně ji libovolně rozšířit.

2. Model fotovoltaického systému s bateriovou akumulací (*PV-Battery, Residential*)

Pro tvorbu simulace, kde jsou přebytky ukládány do bateriového úložiště a zároveň chceme přidat jako odběr EE zásobník TV je nejvhodnější použít model, který již bateriovou akumulací nabízí. Tento model se nachází pod záložkou *Start a new project* → *Battery Storage* → *Detailed PV-Battery* → *Distributed* → *Residential Owner*. Opět se jedná o model s nejdetailnějším nastavením hlavních komponent (FVE a bateriové úložiště). Volba „*Distributed*” v podstatě určuje ekonomické hledisko hospodaření s elektrickou energií. Jedná se o případ, kdy vyrobená elektrická energie primárně slouží k redukci vlastních nákladů za spotřebovanou elektřinu. K dispozici jsou tři hlavní bateriové technologie. Lze použít akumulátory na bázi olova, lithia nebo průtokové akumulátory, které se ale ekonomicky vyplatí pro aplikace větších výkonů.

5.1.1 Porovnání reálných dat generace FVE s výstupy programu

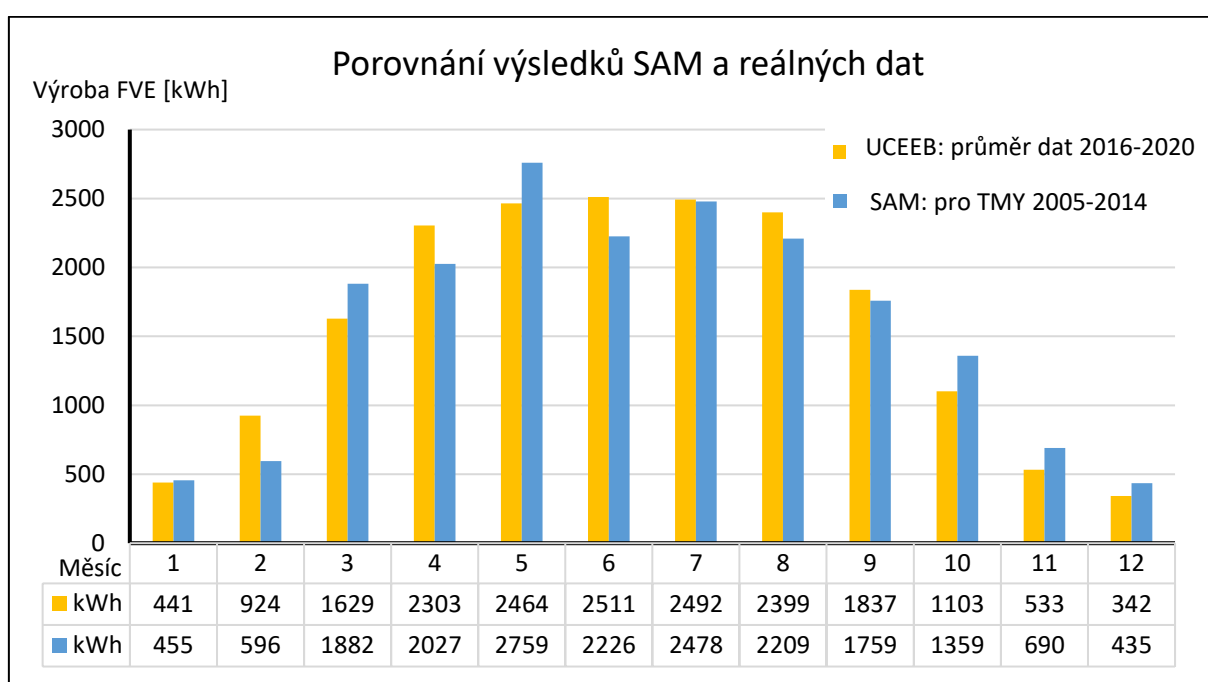
Jak již bylo řečeno, pro výrobu fotovoltaického zdroje budou v rámci simulace využity stávající funkce programu SAM včetně uživatelského rozhraní pro nastavení parametrů. Výhodou je možnost vytvářet různé varianty, jejichž výsledky pak budeme moci mezi sebou porovnat a hledat optimální variantu pro danou aplikaci. Na druhou stranu, je potřeba si uvědomit, že každá simulace pracuje s určitou chybou. Ta vzniká zanedbáním některých vnějších vlivů, nebo na základě přijetí určitých zjednodušujících předpokladů, bez nichž by simulace nešla realizovat. Pro alespoň přibližnou představu o tom, jak moc jsou výsledky simulace přesné, budou porovnána reálná data s výsledky programu téhož systému.



Obrázek 4: Střecha budovy UCEEB
Zdroj: mapy.cz, upraveno

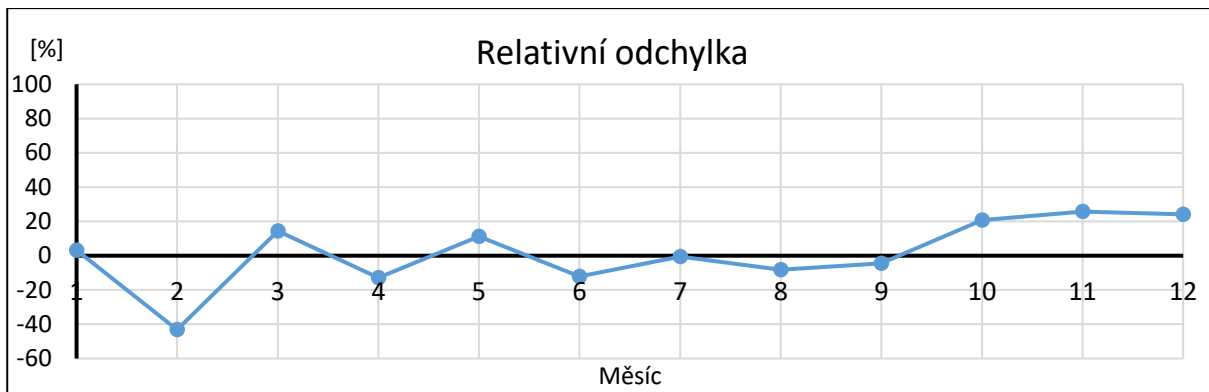
Pro tyto účely byla vybrána FVE nacházející se na střeše Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze (UCEEB). Objekt se nachází na adrese Třínecká č. p. 1024 v obci Buštěhrad, okres Kladno. Instalovaný výkon zdroje je 35 kW_p (střecha) a 12 kW_p (fasáda). Systém je rozdělen do 11 polí (z toho 3 jsou umístěna na fasádě budovy) připojených ke 3 střídačům. Dále budeme pracovat jen s částí systému. Jedná se o červeně zvýrazněná pole v Obrázku 4. Ta jsou připojena ke společnému střídači. Tato část se skládá celkem ze 71 modulů typu Holleis Lotus G2 Black o výkonu 245 W_p. Použitý typ střídače je SolarEdge SE17K-ER-01 s výkonem 17 kW. Parametry komponent lze nalézt v [31] a [32].

Podobný systém se stejným rozmístěním modulů a parametry byl vytvořen v prostředí SAM. Datasheet modulu ovšem neobsahuje všechny parametry požadované simulačním nástrojem, a proto bude v simulaci nahrazen modulem podobným ze stávající nabídky (typ Grape Solar GS-P-245-KR2). Dalším velmi důležitým vstupem simulace jsou údaje o počasí. Tyto hodnoty lze získat z různých zdrojů. V této práci budu pracovat výhradně s údaji z geografického informačního systému PVGIS. [33] Zde je možné, na základě znalosti souřadnic, získat údaje o počasí v konkrétní lokalitě, a to pro typický meteorologický rok (TMY). Jedná se o klimatické údaje vyhodnocené za 10 let, přičemž každý měsíc roku TMY obsahuje nejtypičtější hodnoty z uvažovaného vzorku. Je tedy zřejmé, že tyto hodnoty nezahrnují případné extrémní. Porovnávat výsledky simulace pro TMY s reálnou produkcí systému v konkrétním roce by tak nebylo přesné. Z tohoto důvodu jsou v Grafu 6 uvedeny zprůměrované hodnoty skutečné výroby systému UCEEB za několik let. Kompletní data se podařilo získat pro období 2016 až 2020.



*Graf 6: Porovnání výroby FVE na střeše UCEEB s výsledky simulace
Zdroj: Vlastní zpracování*

Průměrná roční produkce reálného systému byla 18 980 kWh, zatímco výsledek simulace pro rok TMY je 18 876 kWh. Odchylka je tedy relativně malá a činí přibližně 0,55 %. Relativní odchylka výsledků simulace od skutečných hodnot je pro jednotlivé měsíce uvedena v Grafu 7. Je zřejmé, že hodnoty se více liší v zimním období. Jedním z důvodů může být vliv znečištění modulů (listí, sněh), čímž lze částečně vysvětlit nadhodnocenou produkci simulace v měsících říjen až prosinec. SAM tyto ztráty zohledňuje a je možné jejich nastavení, ovšem v tomto směru nelze být úplně přesný. Důvodem vyšší celkové produkce střešního systému UCEEB může být také použití výkonových optimizérů, což je v podstatě DC-DC měnič umožňující každému panelu dosahovat maximálního výkonu v daný moment. I přes uvedené rozdílnosti lze software SAM považovat za dostatečně spolehlivý nástroj pro modelování produkce FVE.

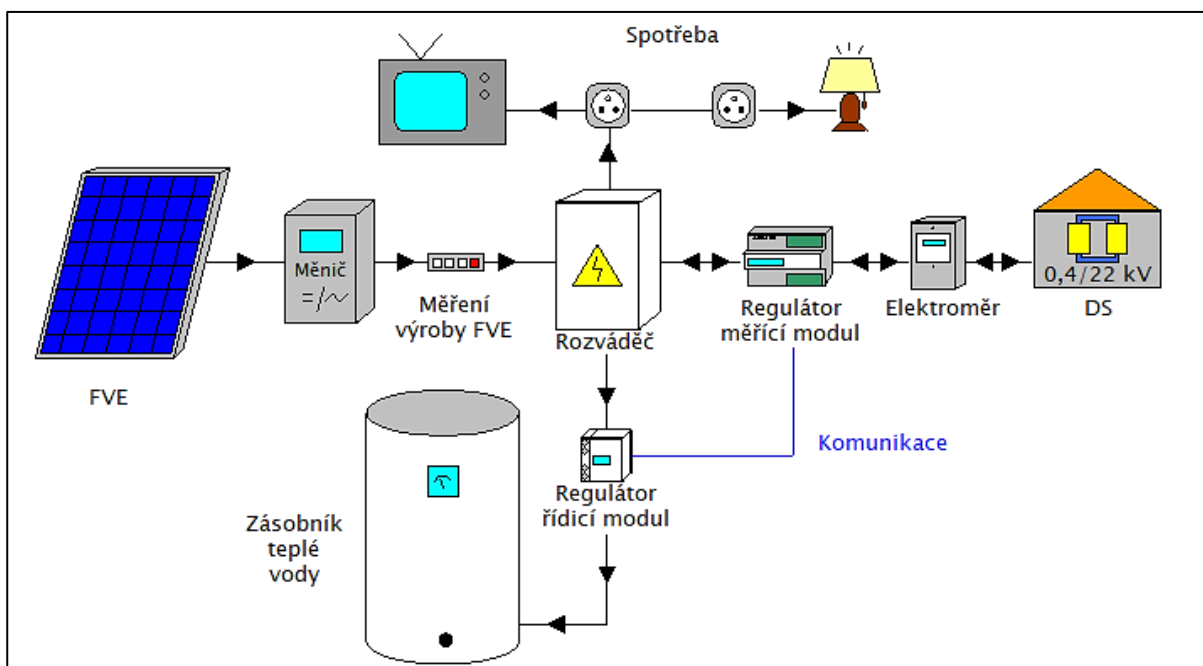


Graf 7: Relativní odchylka výsledků simulace od skutečné produkce systému

5.2 Simulace s ukládáním přebytků do zásobníku teplé vody

Základní princip fungování systému, včetně toků energie, je schematicky znázorněn na Obrázku 5. Cílem systému je pokrytí vlastní spotřeby objektu a případné přebytky akumulovat v podobě tepla do zásobníku TV. Vodu v nádrži lze v případě potřeby ohřívat také elektrinou ze sítě. Systém je navržen tak, aby v případě jeho instalace bylo možné využít některý z dotačních titulů. Hlavní funkcí regulátoru je maximalizovat využití vyrobené energie v rámci objektu. Přebytky z FVE, pro které již není využití, jsou regulátorem předány topnému tělesu, které jimi ohřívá vodu v zásobníku. Regulátor tak omezuje případné přetoky do DS. [34]

Střídač a FVE jsou simulovány pomocí stávajících funkcí SAM, spotřeba EE je nahrazena odběrovým profilem, který bude nahráván z externího souboru. Funkce regulátoru a přípravy teplé vody bude v programu nově vytvořena. Existuje také zapojení, kdy je topná spirála připojena k FVE přímo, což je vhodné pro případy, kdy energie na ohřev vody tvoří majoritní podíl z celkové spotřeby.



Obrázek 5: Schéma systému s akumulací přebytků do zásobníku teplé vody
Zdroj: Vlastní zpracování dle [34]

5.2.1 Princip činnosti regulátoru

Simulovaným regulátorem je zařízení, které se komerčně označuje jako WATTrouter. Jedná se o programovatelné zařízení složené z vlastního regulátoru a měřicího modulu, který měří proud v jednotlivých fázích. Na základě monitorování činného výkonu ve fázích se WATTrouter snaží docílit vždy tzv. „virtuální nuly“, což je stav, kdy je součet fázových výkonů roven nule. Při detekci přebytků (součet výkonů větší než nula) dochází ke spínání ohmických spotřebičů dle nastavených priorit. V našem případě se bude jednat o spínání topného tělesa. Jak již bylo řečeno, pro maximální využití produkce FVE, a zároveň zajištění požadované minimální teploty vody v nádrži, se někdy instalují zásobníky se dvěma topnými tělesy (spínání topných těles v závislosti na okolních podmínkách je uvedeno v Tabulce 3). Možnost přidání druhého tělesa bude ve vytvořené simulaci volitelná. Provoz regulátoru lze kombinovat se střídáním tarifů, čehož bude v rámci simulace rovněž využito. [35] WATTrouter se umísťuje přímo do hlavního domovního rozváděče. Pokud v něm již není místo pro instalaci, lze zařízení umístit do menšího, podružného rozváděče.

5.2.2 Model zásobníku

Model vychází z bilanční rovnice tepelných toků, které do zásobníku vstupují nebo jej opouští a dle [36] ji lze vyjádřit takto: ³

$$\dot{Q}_{\text{zásobník}} = \dot{Q}_{\text{ohřev}} - \dot{Q}_{\text{odběr}} - \dot{Q}_{\text{ztráty}} \quad (5.1)$$

kde $\dot{Q}_{\text{zásobník}}$ [J/s] je celková energie, která v daném kroku do nádrže vstupuje nebo z ní vystupuje; $\dot{Q}_{\text{ohřev}}$ [J/s] představuje dodanou energii topným tělesem; $\dot{Q}_{\text{odběr}}$ [J/s] je teplo, které zásobník odevzdává při odběru teplé vody a $\dot{Q}_{\text{ztráty}}$ [J/s] reprezentují tepelné ztráty. Člen na levé straně rovnice 5.1 vyjádříme následovně:

$$\dot{Q}_{\text{zásobník}} = m_z \cdot c_v \cdot \frac{dT_z}{dt} \quad (5.2)$$

kde m_z [kg] je hmotnost vody v zásobníku; c_v [J·kg⁻¹·K⁻¹] je měrná tepelná kapacita vody; dT_z [°C] je změna teplota vody v zásobníku za časový úsek dt .

Teplo dodané topným tělesem je dáno vztahem 5.3:

$$\dot{Q}_{\text{ohřev}} = \frac{\eta}{100} \cdot P \quad (5.3)$$

kde η [%] účinnost ohřevu a P [W] je výkon topného tělesa, který bude v simulaci násoben hodnotou 60, čímž zohledníme minutový krok ($J = W \cdot s$).

Teplo odevzdané odběrem teplé vody ze zásobníku vypočteme pomocí vztahu 5.4:

$$\dot{Q}_{\text{odběr}} = \dot{m}_v \cdot c_v \cdot (T_z - T_s) \quad (5.4)$$

³ V rovnici se objevuje rozměr J/s, ačkoliv se vlastně jedná o jednotku W (watt). Důvodem volby tohoto zápisu je demonstrace čtenáři, že se jedná o tok energie za určitý čas. V případě dále popsaných simulací to bude 1 minuta.

kde \dot{m}_v [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$] je hmotnostní průtok vody v nádrži. V simulaci se bude jednat o hodnotu z odběrového profilu udávanou v l/min. Při odběru určitého množství teplé vody dojde zároveň k doplnění zásobníku stejným množstvím studené vody. T_s [$^{\circ}\text{C}$] je teplota studené vody přiváděné na vstupu do zásobníku. Ta je v simulacích nastavena na konstantní hodnotu 10°C .

Posledním členem rovnice 5.1 jsou tepelné ztráty zásobníku, které lze vyjádřit rovnicí 5.5:

$$\dot{Q}_{ztráty} = \frac{1}{R} \cdot (T_z - T_o) \quad (5.5)$$

kde R [$\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$] je celkový tepelný odpor zásobníku a T_o [$^{\circ}\text{C}$] je teplota okolí. Pro vyjádření velikosti tepelných ztrát za 1 minutu je vztah potřeba vynásobit hodnotou 60. Odpor R bude počítán dle níže uvedených vztahů 5.6 až 5.8, které jsou převzaty z [37, str. 56].

Tepelný odpor pláště vypočteme následovně:

$$R_1 = \frac{\ln \frac{l + r_1}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot h} \quad (5.6)$$

kde l [m] je tloušťka izolace; r_1 [m] je šířka zásobníku; h [m] je výška zásobníku a λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] je součinitel tepelné vodivosti izolace. Tloušťka a součinitel tepelné vodivosti izolace budou v simulaci nastaveny na konstantní hodnoty dle vyhlášky č. 193/2007 Sb. V § 8 této vyhlášky je uvedeno, že minimální tloušťka izolace akumulčních nádob by měla být alespoň 100 mm při použití materiálu se součinitelem tepelné vodivosti menším nebo rovným $0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. V rámci simulace tak bude nastaveno $l = 0,1 \text{ m}$ a $\lambda = 0,039 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Tepelný odpor podstavy se vypočte pomocí vztahu 5.7.

$$R_2 = \frac{l}{\pi \cdot r_1^2 \cdot \lambda} \quad (5.7)$$

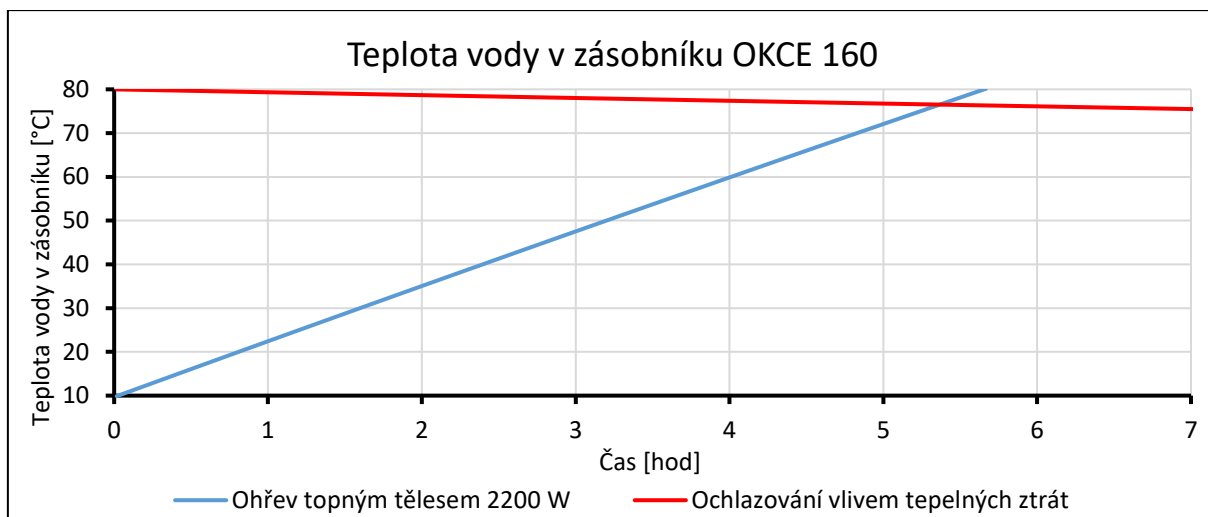
Celkový tepelný odpor zásobníku pak vyjádříme vztahem 5.8.

$$R = \frac{2 \cdot R_1 \cdot R_2}{R_1 + 2 \cdot R_2} \quad (5.8)$$

Po dosazení rovnic 5.2 až 5.5 do vztahu 5.1 a následnou jednoduchou úpravou dostaneme výsledný vztah pro změnu teploty vody v zásobníku za časový interval.

$$\frac{dT_z}{dt} = \frac{1}{m_z \cdot c_v} \cdot (\dot{Q}_{ohřev} - \dot{Q}_{odběr} - \dot{Q}_{ztráty}) \quad (5.6)$$

Pro model zásobníku bylo přijato zjednodušení ideálního promíchávání vody v nádrži na teplotu T_z , která je v celém objemu stejná. Průběh „nabíjení“ zásobníku (ohřívání vody topným tělesem) a průběh „vybíjení“ (ochlazování vody vlivem tepelných ztrát) je uveden v Grafu 8. Při nabíjení jsou zároveň respektovány tepelné ztráty. Hodnoty v grafu jsou výstupem vlastní simulace vytvořené na základě výše popsanych vztahů pro typ ohřivače vody OKCE 160, jehož parametry jsou uvedeny Příloze A.



Graf 8: Průběh teploty vody v zásobníku při procesech ohřevu a ochlazování

V grafu lze pozorovat, že ohřev vody topným tělesem probíhá prakticky lineárně. Pro tento typ zásobníku je v Příloze A uvedeno, že voda se ohřeje z 10 na 60 °C za 3,9 hodiny. Tomu se blíží výsledky simulace, kde stejný ohřev trval přesně 4 hodiny. Pro křivku ochlazování lineární průběh neplatí, neboť při vyšších teplotách vody v nádrži je teplotní gradient vzhledem k okolí větší a poklesy jsou v počátku ochlazování znatelnější. Klesání teploty postupně zpomaluje, až se nakonec ustálí na teplotě okolí.

5.2.3 Řízení simulace

Před spuštěním simulace je potřeba správně zadat všechny vstupní parametry nově vytvořeného makra s názvem *Makro A - Instalace FVE s akumulací přebytku do vody* (dále jen Makro A). Zadávání vstupních dat se věnuje kapitola 5.2.5. Výpočetní cyklus probíhá pro každou minutu roku zvlášť, celkem tedy pro 525 600 opakování. Prvním krokem výpočtu je porovnání produkce FVE a spotřeby uživatelské EE. V tomto kroku je zároveň vypočteno množství energie, kterou je potřeba odebrat z DS. Dále je na základě odběrového profilu TV, tepelných ztrát a dalších parametrů zásobníku vypočten pokles teploty vody v nádrži.

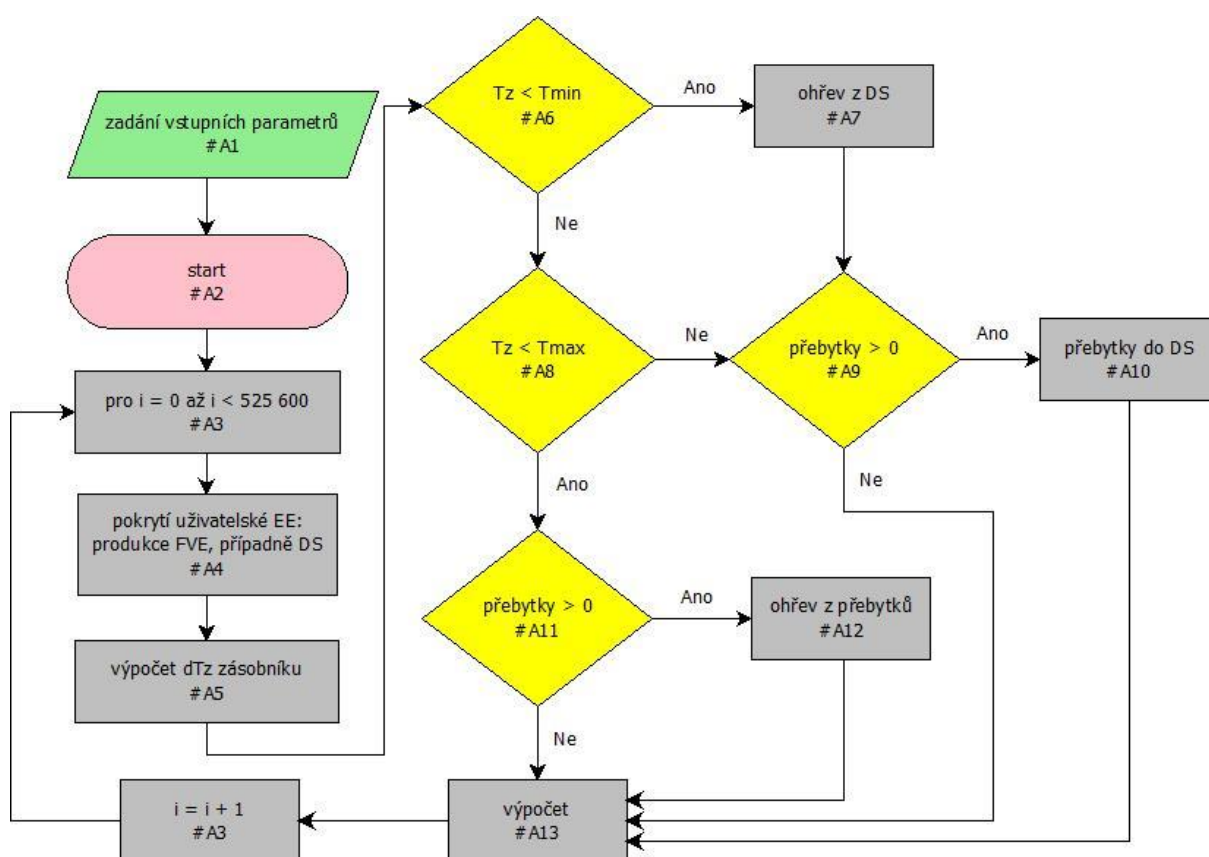
Další postup platí pro zásobník pouze s jednou topnou spirálou. Dojde-li k poklesu teploty vody pod minimální nastavenou mez, termostat v zásobníku sepne ohřev topným tělesem. V tento moment je energie pro ohřev odebírána vždy z DS, tedy bez ohledu na velikost přebytků z FVE. Důvodem je snaha co nejrychleji dosáhnout minimální nastavené teploty. Velikost přebytků totiž může být v daný okamžik nižší než množství energie, kterou lze na ohřev vody použít z DS. Při teplotě vody v nádrži vyšší, než je minimální hodnota, probíhá další ohřev pouze z přebytků. V takovém případě nesmí teplota uvnitř nádrže překročit maximální dovolenou teplotu. Pokud je množství přebytků vyšší než kolik lze v daný moment spotřebovat topným tělesem, je rozdíl odevzdán do DS.

Ve variantě se dvěma topnými tělesy jsou přebytky z FVE akumulovány vždy druhou topnou spirálou (vždy s ohledem na dodržení maximální povolené teploty vody v zásobníku), přičemž první těleso vodu ohřívá energií z DS jen při jejím poklesu pod minimální hodnotu. Obě topná tělesa mohou v jednu chvíli pracovat současně. Podmínky spínání topných těles jsou pro obě varianty uvedeny v Tabulce 3.

Tabulka 3: Spínání topných těles pro ohřev vody

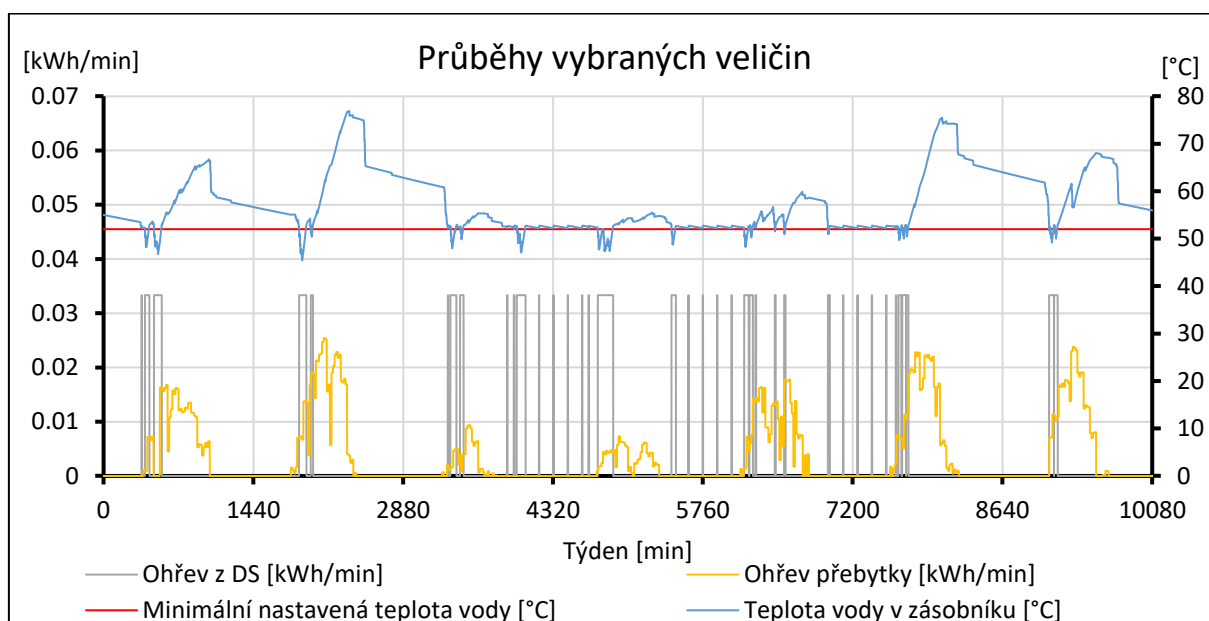
Varianta s jedním topným tělesem		
	Ohřev z DS	Ohřev z přebytků
$T_z < T_{min} \ \&\& \text{přebytky} \geq 0$	✓	✗
$T_z > T_{min} \ \&\& \text{přebytky} > 0$	✗	✓
$T_z > T_{min} \ \&\& \text{přebytky} = 0$	✗	✗
Varianta se dvěma topnými tělesy		
	Ohřev z DS	Ohřev z přebytků
$T_z < T_{min} \ \&\& \text{přebytky} > 0$	✓	✓
$T_z > T_{min} \ \&\& \text{přebytky} > 0$	✗	✓
$T_z < T_{min} \ \&\& \text{přebytky} = 0$	✓	✗
$T_z > T_{min} \ \&\& \text{přebytky} = 0$	✗	✗

Pro každý krok je vypočtena energetická bilance systému a výsledky sledovaných parametrů jsou postupně ukládány jako prvky pole. To je výhodné z důvodu pozdější manipulace s hodnotami například při tvorbě souhrnných výsledků. Ve variantě s jedním topným tělesem je energie pro ohřev vždy zaznamenána a rozlišena mezi využitím přebytků a energie z DS. Vývojový diagram této varianty je uveden na Obrázku 6. Pokud bychom uvažovali zásobník se dvěma topnými tělesy, příkaz „přebytky do DS“ by byl v diagramu nahrazen příkazem „ohřev z přebytků“. V jednotlivých obrazcích je uveden symbol # s označením, pomocí kterého lze nalézt konkrétní části uvnitř zdrojového kódu.



Obrázek 6: Vývojový diagram pro simulaci v Makru A s ukládáním přebytků do zásobníku TV
Zdroj: Vlastní zpracování

Pro lepší pochopení fungování simulace poslouží Graf 9, kde jsou vyneseny průběhy vybraných veličin po dobu jednoho náhodně zvoleného týdne. Hodnoty byly vypočteny programem a jedná se o variantu se dvěma topnými tělesy. V grafu je možné pozorovat ohřívání vody uvnitř zásobníku v závislosti na její teplotě. Klesne-li teplota pod 52 °C, probíhá ohřev z DS, případně současně ze sítě a z přebytků. V simulaci je uvažována hystereze teploty, která ovlivňuje četnost sepnutí ohřevu. Při mírném poklesu teploty vody pod minimální nastavenou mez, probíhá následný ohřev vždy minimálně 5 minut, tím se předejde rychle opakovanému překročení minimální nastavené teploty v důsledku tepelných ztrát. Tento proces se aktivuje pouze v momentě, kdy zároveň nedochází k větším odběrům TV, v grafu to je například časový úsek na přelomu 3. a 4. dne. Velikost hystereze lze v případě potřeby nastavit na jinou hodnotu přepsáním uvnitř zdrojového kódu v části #A6.



Graf 9: Průběhy vypočtených hodnot ⁴

5.2.4 Funkce HDO

Funkce HDO je v Makru A volitelná. Pro její správné řízení je potřeba vytvořit tabulku s povely spínání tarifů, která bude načítána z externího souboru. Časy střídání tarifů se mohou pro jednotlivé případy lišit, v závislosti na tarifní sazbě, dnu týdne, případně dokonce i pro jednotlivé odběratele se stejnou sazbou. Před spuštěním simulace je tedy vhodné tyto hodnoty aktualizovat tak, aby odpovídali konkrétnímu případu. Z těchto důvodů byl vytvořen nástroj, který na základě časů zadaných uživatelem vygeneruje povely spínání HDO. Generátor byl vytvořen v programu Microsoft Excel pomocí maker s funkcí uživatelského rozhraní a je přílohou diplomové práce. Tento software byl zvolen z důvodu potřeby zadávat relativně velké množství vstupů, čemuž uživatelské rozhraní programovacího jazyka LK není uzpůsobeno. Generátor se spouští otevřením souboru s názvem *generator_povelu_HDO.xlsm*. V listu souboru *Generátor povelů HDO* jsou k dispozici dvě tlačítka lišící se číslovkou a popisem.

⁴ V grafu č. 9 je na ose y uvedena jednotka kWh/min. Správněji se ale jedná o rozměr kW * 60. Nicméně opět zde kvůli větší názornosti pro čtenáře ponecháváme jinou jednotku. Stejná situace platí také pro graf č. 10.

První tlačítko po stisknutí vygeneruje tabulku pro zadání časů spínání HDO (viz Obrázek 7). Hodnoty uvedené v obrázku jsou pro defaultní nastavení a byly převzaty z tabulky povelů HDO společnosti PREdistribuce a.s pro tarifní sazbu D25d, která je určena domácnostem se zásobníkem TV. Platnost NT je pro tuto sazbu obvykle rozdělena do dvou časových úseků o celkové délce minimálně 8 hodin denně. [38] Z tohoto důvodu je potřeba v tabulce vyplnit dva časy zapnutí a vypnutí. Program disponuje rozpoznáním chybného zadání vstupů. Po stisknutí tlačítka „Generovat povely“ bude ve stejném listě vytvořen týdenní soubor hodnot s minutovým krokem. V čase VT je generována hodnota 0, v době NT hodnota 1. Na základě těchto hodnot bude možné spínat nebo blokovat ohřev vody v zásobníku během dne.

Pomocí druhého tlačítka lze vygenerované hodnoty překopírovat do souboru s názvem *HDO_povely.csv*, který pak bude nahráván jako vstupní soubor Makra A v prostředí SAM. Generování neřeší státní svátky a významné dny. Případné abnormality lze do diagramu spínání HDO přidat ruční editací CSV souboru. Krok s generováním povelů HDO je možné přeskočit. V takovém případě Makro A použije naposledy vygenerované hodnoty.

	Zapnout 1	Vypnout 1	Zapnout 2	Vypnout 2
Pondeli	00:40	05:40	12:20	15:20
Utery	00:40	05:40	12:20	15:20
Streda	00:40	05:40	12:20	15:20
Ctvrtek	00:40	05:40	12:20	15:20
Pátek	00:40	05:40	13:00	16:00
Sobota	01:40	06:40	13:00	16:00
Nedele	03:00	08:00	14:00	17:00

Buttons: Vymazat tabulku, Defaultní nastavení, Generovat povely

Obrázek 7: Uživatelské rozhraní generátoru povelů HDO v programu MS Excel

Simulace s funkcí HDO se spouští v Makru A stejně jako simulace bez HDO. Jen je potřeba, aby na panelu zadávaných parametrů byla tato funkce zapnuta. Nastavování vstupních parametrů simulace se blíže věnuje následující kapitola 5.2.5. Po spuštění Makra A s funkcí HDO je uživatel vyzván k volbě prvního dne v týdnu simulovaného roku, neboť časy střídání VT a NT se mohou pro každý den lišit. Následně si program sám vytvoří roční soubor povelů HDO počínající dnem zvoleným v předchozím kroku. Tvorbu těchto povelů pro celý rok vysvětluje úryvek zdrojového kódu programu na Obrázku 8. Data načtená ze souboru *HDO_povely.csv* jsou zde uložena jako prvky pole `HDO_tyden[i]`.

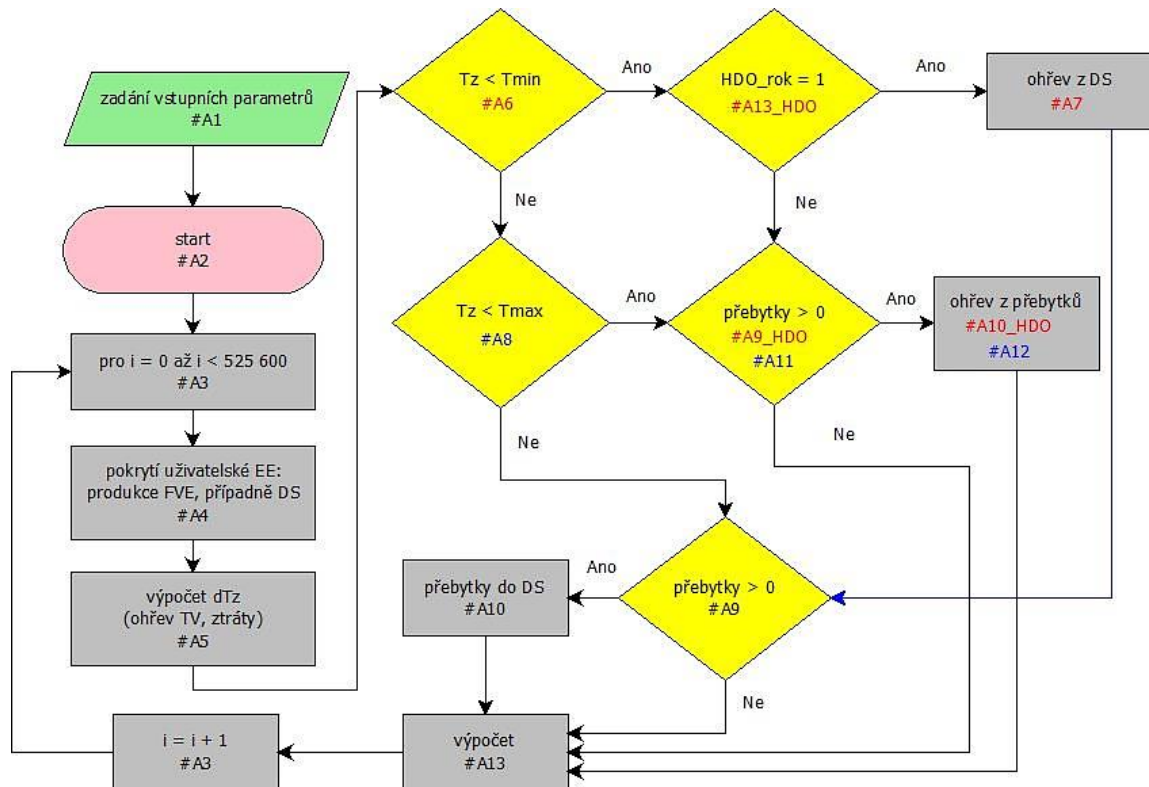
```

213 while(ii < 525600){ //525600 min = 1 rok (365 dnu)
214     while(ii < 525600 && i < #HDO_tyden){ //tvorba povelu spinani HDO pro cely rok
215         HDO_rok[ii] = HDO_tyden[i]; //postupne razeni tydnu
216         i++;
217         ii++;
218     }
219     i = 0; //vynulovani pro dalsi tyden
220 }
221 }else{
222     for(ii = 0; ii < 525600; ii++){ //pro variantu bez HDO
223         HDO_rok[ii] = 1; //povel k sepnuti je vzdy 1 = spinani libovolne

```

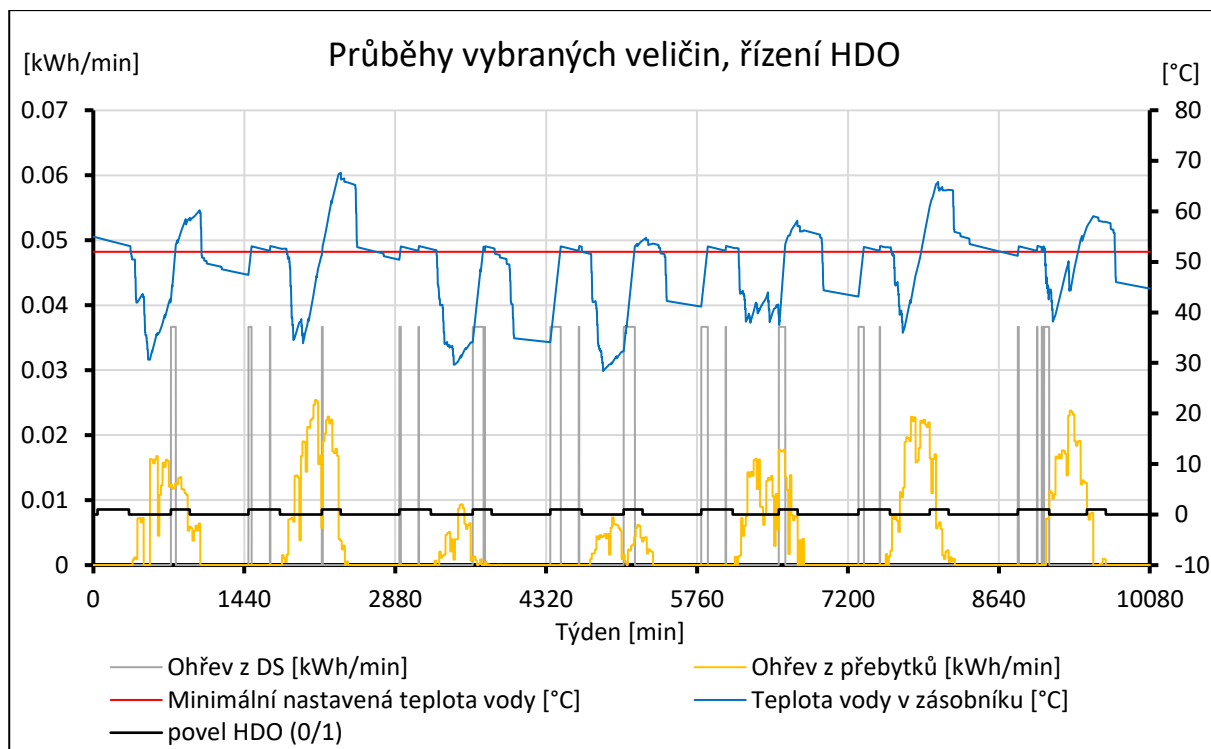
Obrázek 8: Tvorba povelů HDO pro celý rok

Proces řízení simulace s HDO je zobrazen na Obrázku 9. Pro ohřev vody energií z DS musí být splněna podmínka platnosti NT, kdy ohřev vody není blokován. Stejně jako pro simulaci bez HDO je i zde možné nastavit variantu se dvěma topnými tělesy. Logika jejich spínání pak bude stejná jako v Tabulce 3, ovšem pro ohřev z DS musí být ještě splněna podmínka $HDO_rok[i] = 1$. Ve VT je ohřev možný pouze z případných přebytků. V některých blocích je uveden dvakrát symbol #, neboť určité procesy se v kódu na různých místech opakují (zde barevně rozlišeno).



Obrázek 9: Vývojový diagram pro simulaci v Makru A s ukládáním přebytků do vody a funkcí HDO
Zdroj: Vlastní zpracování

Fungování simulace s HDO je ukázáno na příkladu uvedeném v Grafu 10. Jedná se o stejný týden jako byl vybrán pro ukázkou simulace bez HDO. Z grafu lze vyčíst, že teplota vody v nádrži je v některých úsecích platnosti VT výrazně nižší, než je minimální nastavená teplota. V důsledku blokování ohřevu z DS se voda nestíhá ohřívat na požadovanou teplotu. Z pohledu tepelného komfortu tak stojí za zvážení, zda by pro ohřev vody ze sítě v době NT nebylo vhodnější nastavit vyšší minimální teplotu, nebo zvolit jednotarifní sazbu.



Graf 10: Průběhy vypočtených hodnot včetně řízení HDO

5.2.5 Zadávání vstupních dat

Simulace se zásobníkem TV se v rámci modelu SAM spouští jako makro, které disponuje vlastním uživatelským rozhraním v českém jazyce (bez diakritiky). Před spuštěním simulace je potřeba vybrat správný model. V tomto případě se jedná o malý fotovoltaický systém s akumulací přebytků ohřevem vody, proto je potřeba toto makro spouštět v modelu *Photovoltaic, Residential* (viz kapitola 5.1). Nastavované parametry lze rozdělit do dvou skupin:

- parametry zadávané prostřednictvím záložek modelu *Photovoltaic, Residential*;
- parametry zadávané v okně Makra A.

První skupina je určena k volbě a nastavení komponent fotovoltaického systému. Je zde možné specifikovat počet modulů, jejich zapojení, ztráty systému a v neposlední řadě lze vybrat soubor s klimatickými údaji pro příslušnou lokalitu (je možné použít hodnoty ze stávající nabídky programu nebo nahrát nově stažená data). Tomu v modelu odpovídají následující záložky: *Location and Resource, Module, Inverter, System Design, Shading and Layout, Losses a Lifetime and Degradation*. Seznam těchto záložek je s krátkým komentářem uveden také přímo v okně makra v instrukcích pro správné spuštění. Zadávané hodnoty z ostatních záložek nebudou pro simulaci využity. Jedná se zejména o různé finanční parametry určené k tvorbě ekonomické analýzy systému, která nebude v rámci vytvořené simulace prováděna automaticky. Tyto záložky jsou uzpůsobeny především pro americké prostředí, navíc výsledky Makra A jsou vyhodnoceny pouze pro jeden rok. V takovém případě tvorba ekonomické analýzy nedává smysl. Dalším důvodem, proč není simulace vyhodnocována pro více let, je časová

náročnost algoritmu vzhledem k minutovému kroku výpočtu. Nicméně i zde se ukazuje síla makrojazyka LK a SAM lze o ekonomické výpočty rozšířit (není předmětem této práce).

Druhá skupina údajů je nastavována přímo prostřednictvím uživatelského rozhraní makra a jedná se především o parametry zásobníku TV, topného tělesa a teploty vody v zásobníku. Formulář se zadávanými parametry je v Tabulce 4. Program není vybaven detekcí chybného zadání vstupů a předpokládá uživatele dostatečně znalého problematiky. Možnost simulace bez výroby FVE byla přidána pro porovnání, zda se nám uvedený systém vzhledem ke sníženému odběru EE vyplatí. Energetickou úsporu je možné vyjádřit objemem ušetřených peněz, což bude na příkladu ukázáno v kapitole 6. Parametry s * lze obvykle nalézt v datasheetu výrobce.

Tabulka 4: Zadávané parametry Makra A

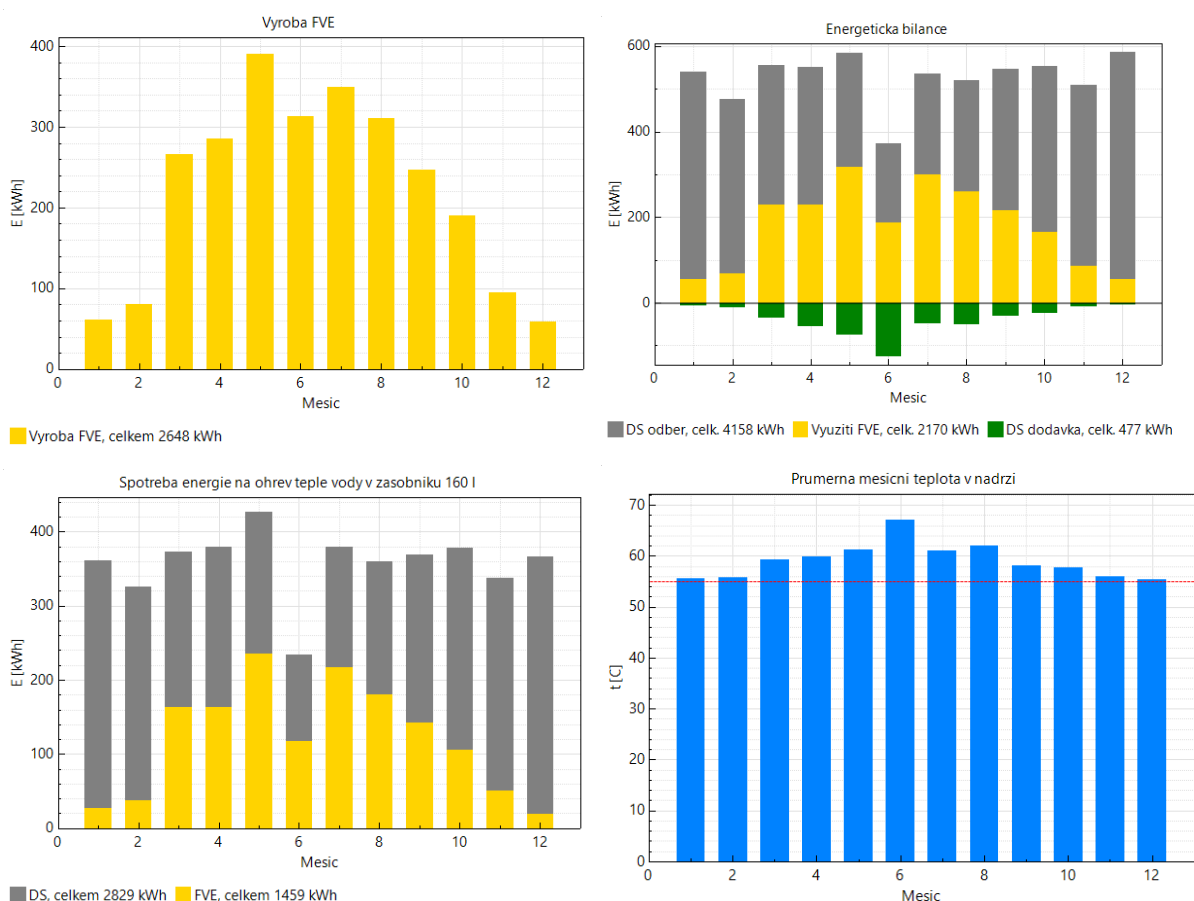
FVE v simulaci	ON <input type="button" value="v"/>	Zahrnutí FV systému v simulaci.
Denní spotřeba teple vody [l/os]	<input type="text" value="45"/>	Denní spotřeba teplé vody v litrech na osobu.
Pocet osob v objektu [os]	<input type="text" value="4"/>	Počet osob žijících v objektu.
Objem zasobniku [l]	<input type="text" value="199"/>	Objem zásobníku v litrech.*
Výkon topného tělesa [W]	<input type="text" value="2200"/>	Výkon topného tělesa ve wattech.*
Vyska zasobniku [m]	<input type="text" value="1.3"/>	Výška zásobníku.*
Prumer zasobniku [m]	<input type="text" value="0.584"/>	Průměr zásobníku.*
Minimalni teplota vody v zasobniku [C]	<input type="text" value="55"/>	Teplota, na kterou se bude voda ohřívat.
Maximalni teplota vody v zasobniku [C]	<input type="text" value="80"/>	Maximální dovolená teplota.
Teplota vody privedene do zasobniku [C]	<input type="text" value="10"/>	Teplota přiváděné vody do zásobníku.
Teplota okoli zasobniku [C]	<input type="text" value="20"/>	Teplota místnosti, kde je zásobník umístěn.
Teplota vody v zasobniku na zacatku simulace [C]	<input type="text" value="55"/>	Počáteční teplota na začátku simulace.
Vykon druheho topného tělesa [W]	<input type="text" value="0"/>	Možnost přidání druhého topného tělesa.
HDO v simulaci	OFF <input type="button" value="v"/>	Řízení ohřevu signálem HDO.
Ukladani vysledku do slozky	ON <input type="button" value="v"/>	Uložení výstupů do složky s výsledky.
Zobrazovat grafy v okne makra	ON <input type="button" value="v"/>	Volba grafického zobrazení výsledků.

Je také důležité zmínit, že některé hodnoty jsou Makrem A načítány z externích CSV souborů. Jedná se o odběrový profil EE, který je nahráván ze souboru vybraným uživatelem. K volbě tohoto souboru je uživatel vyzván po každém spuštění simulace. Ostatní externí soubory jsou načítány automaticky (správné umístění těchto souborů v počítači je upřesněno v návodu, který je přílohou práce). Jedná se o křivku odběrového profilu TV (*krivka_odberovyProfilTV.csv*) a spínání HDO (*HDO_povely.csv*). Křivku odběrového profilu TV lze změnit buď ruční editací souboru nebo si lze vygenerovat nový profil dle postupu v kapitole 4.3. Tvorba povelů HDO a jejich úprava je popsána v kapitole 5.2.4.

5.2.6 Výstupy

Po dokončení výpočtů jsou uživatelům zobrazeny výsledky ve formě grafů. Následující Obrázek 10 ilustruje jejich podobu. Jedná se o modelový příklad, a proto je zde systém popsán jen velmi stručně. Instalovaný výkon FVE je 2,7 kWp, zásobník TV má objem 160 l a jedno topné těleso s příkonem 2,2 kW. Odběrové profily EE a TV jsou použity dle kapitoly 4 (Graf 1 a Graf 4). Klimatické podmínky jsou zvoleny pro oblast hl. m. Prahy.

Výstupem simulace jsou vždy celkem 4 grafy, které se v programu zobrazí automaticky po dokončení výpočtu. Kliknutím a tažením myši lze v prostředí SAM přiblížit jejich detail. V dalších kapitolách budou vždy uváděny jen vybrané grafy, dle potřeby a aplikace. Grafy jsou ve formátu PNG ukládány do složky *Vysledky_SAM*, kde lze rovněž nalézt soubor *vysledky.csv* s podrobnějšími číselnými výpočty. Ten je možné po jednoduché úpravě v MS Excel zobrazit jako tabulku s výsledky pro jednotlivé měsíce. Tabulka s výsledky pro tento konkrétní příklad je uvedena v Příloze B. Adresa složky se všemi výstupy programu je uživateli oznamována prostřednictvím výstupního řádku makra. Po každém opakování simulace lze všechny výsledky uložit do příslušné složky. Jednotlivé výstupy jsou pak odlišeny časovým razítkem v názvu.



Obrázek 10: Příklad grafického zpracování výsledků Makra A

Na uvedeném příkladu stojí za povšimnutí výsledky pro měsíc červen, kdy se projevuje období dvoutýdenní rodinné dovolené (viz kapitola 4.2.2). Důsledkem tohoto nastavení je vyšší teplota vody

v zásobníku, neboť nedochází k jeho „vybití“ a dále pak nižší spotřeba EE. V nastavení pouze s jedním topným tělesem můžeme v grafu energetické bilance pozorovat přetoky do DS.

Pro potřeby detailnější analýzy chování systému lze sledované veličiny zobrazit za celý rok jako pole hodnot s časovým krokem 1 minuta. Vzhledem k velkému objemu generovaných dat nejsou tyto hodnoty standardně vypisovány. Příkazy k jejich vypsání do výstupního řádku makra jsou uvedeny na Obrázku 11. Tato funkce je ve zdrojovém kódu v části #A13 deaktivována pomocí symbolu // pro přidávání komentářů. Pro její aktivaci je potřeba tento symbol v kódu odmazat.

```

395 //===== TISK VSECH HODNOT SLEDOVANEHO PARAMETRU =====
396 //outln('FVE vyroba [kWh/min]: ' + FVEIrokMinALL); //vyroba FV zdroje
397 //outln('DS odber [kWh/min]: ' + E_sitALL); //odber z distribucni site
398 //outln('Odber v NT [kWh/min]: ' + E_sitNTALL); //odber v nizkem tarifu
399 outln('Odber v VT [kWh/min]: ' + E_sitVTALL); //odber ve vysokem tarifu
400 outln('Energie ohrev TV z DS [kWh/min]: ' + E_ohrevSitALL); //ohrev z distribucni site
401 outln('Energie ohrev TV z FVE [kWh/min]: ' + E_ohrevFVEALL); //ohrev z FV zdroje
402 outln('FVE vyuzito celkem [kWh/min]: ' + E_vyuzitaFVEALL); //energie vyuzita z FV zdroje
403 outln('Prebytky do DS [kWh/min]: ' + E_doSiteALL); //prebytky do distribucni site
404 outln('Prumerna teplota vody [C]: ' + TzALL); //teplota vody v nadrzi

```

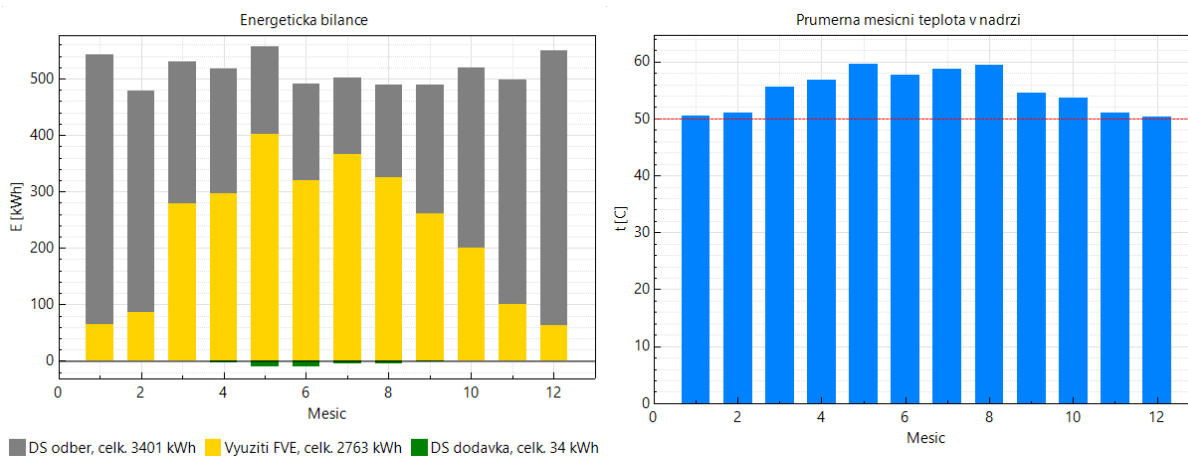
Obrázek 11: Sledované parametry simulace

5.2.7 Porovnání výsledků simulace se softwarem DEKSOFT FVE

Validace některých výstupů simulace již byla částečně provedena v předchozích kapitolách. V kapitole 5.1.1 byla porovnána produkce simulovaného FV zdroje v prostředí SAM s reálnými hodnotami. Dále byla v kapitole 5.2.2 porovnána vypočtená křivka ohřevu vody v nádrži s katalogovými hodnotami. V obou případech byly výsledky simulace vyhodnoceny jako dostatečné. Pro komplexnější srovnání a ověření správnosti navržených algoritmů je vhodné vytvořenou simulaci porovnat s některým z již zavedených softwarů. Na základě vlastního průzkumu dostupných nástrojů a dle [39, str. 34] bylo přistoupeno k volbě české webové aplikace FVE. Hlavním důvodem pro volbu tohoto nástroje je možnost simulovat FVE s ukládáním přebytků do zásobníku TV, navíc se jedná o český software vhodný pro aplikace v podmínkách ČR. Standardně je nástroj zpoplatněný, lze si ovšem vyžádat zkušební licenci na dva týdny zdarma. Tento nástroj se běžně používá například pro tvorbu energetických posudků. Pro porovnání výsledků byl zvolen modelový příklad s parametry uvedenými v tabulce č. 5. Výsledky obou programů jsou uvedeny na další straně.

Tabulka 5: Společné parametry simulace v programu SAM a FVE

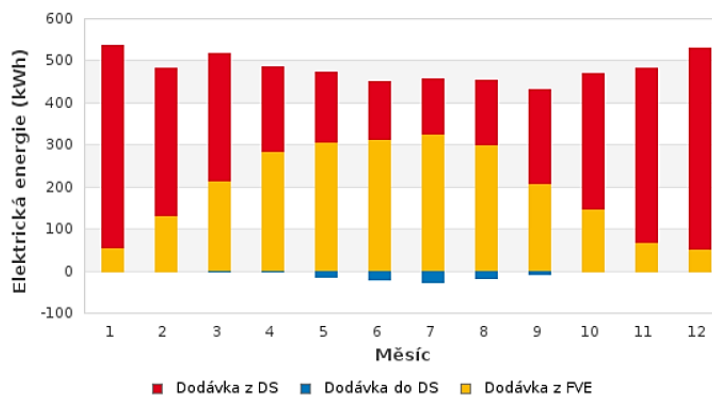
Výkon FVE	2,8 kWp
Fotovoltaické panely	8 x Axitec AXIpremium AC-350M/72S
Střídač	1x Victron Energy Multiplus 24/3000/70
Parametry zásobníku	objem 200 l, min. teplota 50 °C, max. teplota 80 °C
Příkon topného tělesa	2x 2000 W
Celková spotřeba EE	3000 kWh
Odběrový profil EE	TDD č.4 pro rok 2017
Roční spotřeba TV	58,4 m ³
Lokalita	Praha
Teplota okolí	20 °C



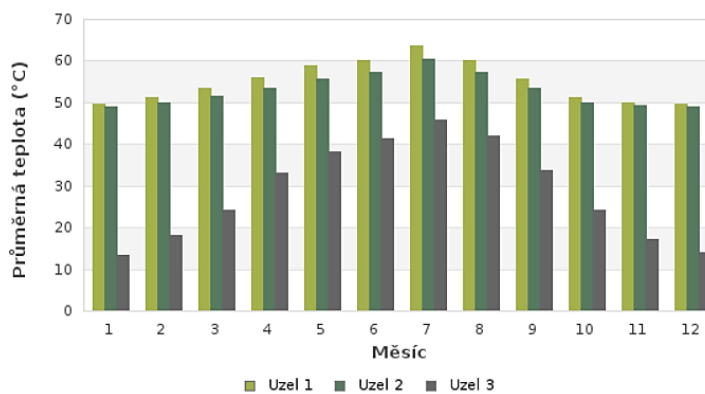
Obrázek 12: Vybrané výsledky Makra A v prostředí SAM

Výsledky výpočtu		
Celková roční spotřeba TV	58,4	m ³
Celková spotřeba elektrické energie	5 764,4	kWh
Celková využitelná produkce elektrické energie z FVE v budově	2 411,2	kWh
Celková produkce elektrické energie dodaná do distribuční soustavy	88,3	kWh
Celková produkce elektrické energie z FVE	2 499,5	kWh
Celkové množství elektrické energie odebrané z distribuční soustavy	3 353,3	kWh

Tabulka 6: Vybrané výsledky simulace v aplikaci FVE



Graf 11: Energetická bilance - aplikace FVE



Graf 12: Průměrná teplota vody v zásobníku - aplikace FVE
Pozn.: Uzel 1 = horní část nádrže, Uzel 2 = střed, Uzel 3 = spodní část

Roční spotřeba EE byla simulací v prostředí SAM vypočtena na 6164 kWh, zatímco dle aplikace *FVE* je tato spotřeba nižší přibližně o 6 %. Produkce FVE je rovněž vyšší ve prospěch vytvořeného programu. To může být zapříčiněno rozdílnými údaji o počasí, které jsou v aplikaci *FVE* volitelné z omezené nabídky (použit formát IWEC). Pro oba případy byl aplikován stejný odběrový profil EE, zároveň vypočtené množství energie odebrané z DS se liší jen nepatrně. Lze tedy předpokládat, že příčinou vyšší roční spotřeby v simulaci SAM je ukládání většího množství dostupných přebytků do zásobníku TV, než kolik je dostupných v aplikaci *FVE*. Akumulované přebytky se totiž také započítávají do celkové spotřeby. Pokud je uvedené tvrzení pravdivé, měla by být průměrná teplota vody v simulaci SAM vyšší. Zde je ovšem porovnání výsledků problematické, neboť aplikace *FVE* uvažuje stratifikační zásobník a teplota je počítána pro tři různá místa. Pokud ale budeme porovnávat teplotu ze středu zásobníku (Graf 12 Uzel 2), je tato teplota skutečně po většinu roku nižší než teplota v levé části Obrázku 12.

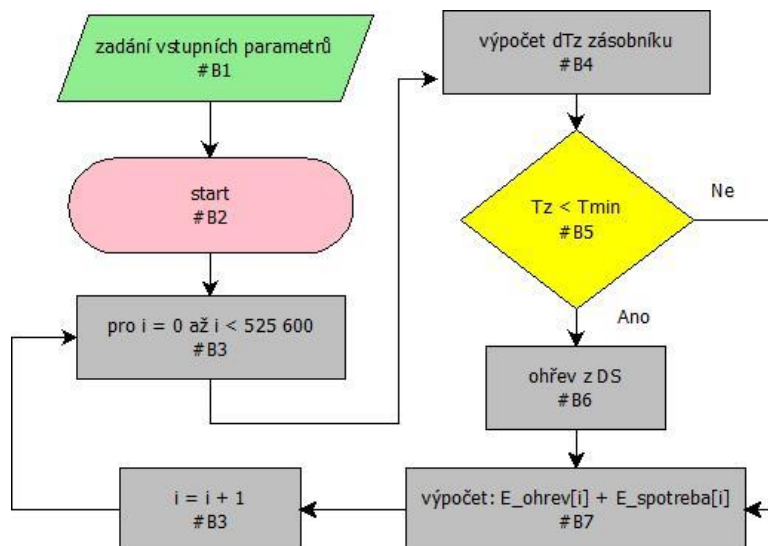
Na základě porovnaných výsledků lze vlastní simulaci v prostředí SAM považovat za spolehlivou.

5.3 Simulace se zásobníkem teplé vody a ukládáním přebytků do bateriového úložiště

Software SAM má v nabídce technicko-ekonomický model, který na základě podrobného nastavení simuluje ukládání přebytků z FVE do bateriového úložiště, viz kapitola 5.1 (*PV-Battery, Residential*). Nastavení modelu bude popsáno později. Při tvorbě této simulace bylo hlavním cílem zakomponovat do již stávajícího modelu zásobník teplé vody. Toho je dosaženo pomocí odběrového profilu EE. Výstupem této simulace je nový profil, který již zahrnuje potřebu energie pro ohřev vody na minimální nastavenou teplotu. Hodnoty vytvořeného profilu představují součet spotřeby běžných elektrospotřebičů a energie spotřebované topným tělesem v daný časový okamžik. Z důvodu přesnosti pozdějších výpočtů v rámci modelu bude odběrový profil obsahovat minutový krok. Profil lze vytvořit pomocí makra s názvem *Makro B – Tvorba odberového profilu EE zahrnující ohrev teple vody* (dále jen jako Makro B), které se spouští z hlavní nabídky maker v prostředí SAM.

Toto makro z velké části využívá funkce Makra A popsané v kapitole 5.2.3. Po vyplnění požadovaných parametrů zásobníku a topného tělesa je možné spustit výpočet. V prvním kroku je uživatel stejně jako v Makru A vyzván k výběru souboru s hodnotami odběrového profilu EE. Tento profil nesmí zahrnovat spotřebu energie pro přípravu TV. Po nahrání dat do programu dojde automaticky k lineární interpolaci údajů na minutový krok a výsledky budou uloženy jako prvky pole `E_spotreba[i]`.

V další fázi výpočtu je s krokem 1 minuta vypočtena spotřeba topného tělesa k ohřevu vody v průběhu celého roku. Ohřev probíhá pouze při poklesu teploty pod minimální nastavenou teplotu, v závislosti na tepelných ztrátách a odběru vody z nádrže. Výsledkem je pole hodnot `E_ohrev[i]`. V průběhu každého opakování cyklu se k prvku pole `E_ohrev[i]` připočte hodnota z odběrového profilu. Výstupem Makra B je nový CSV soubor obsahující aktualizovaný odběrový profil EE, přičemž vygenerovaný soubor bude uložen automaticky v počítači a adresa s názvem souboru se zobrazí ve výstupním řádku okna makra. Výpočetní algoritmus pro tvorbu nového odběrového profilu ilustruje Obrázek 13.



Obrázek 13: Vývojový diagram Makra B pro tvorbu odběrového profilu zahrnujícího ohřev vody

Je potřeba si uvědomit, že v simulaci s bateriovým úložištěm zásobník TV neplní funkci akumulčního zařízení, ale představuje pouze další spotřebič EE, jehož spotřeba musí být v daný moment pokryta buď produkcí FV zdroje, odběrem energie z DS, nebo energií z baterie. K akumulaci přebytků v této simulaci slouží výhradně bateriové úložiště.⁵ Z tohoto důvodu Makro B v parametrizaci zásobníku TV nenabízí možnost přidat druhé topné těleso, které je primárně určeno pro ukládání přebytků. Při tvorbě nového odběrového profilu je již zohledněno, že se voda v nádrži bude ohřívat vždy na minimální teplotu v co nejkratším možném čase a tepelný komfort tak zůstane zachován.

Abychom mohli nově vytvořený profil dále využít v rámci modelu *PV-Battery, Residential*, bude nezbytné klimatické údaje rovněž interpolovat, neboť nezbytnou podmínkou pro spuštění výpočtu je shodný časový krok údajů spotřeby a klimatických dat. Pro tuto úpravu lze využít makra z defaultní nabídky programu.

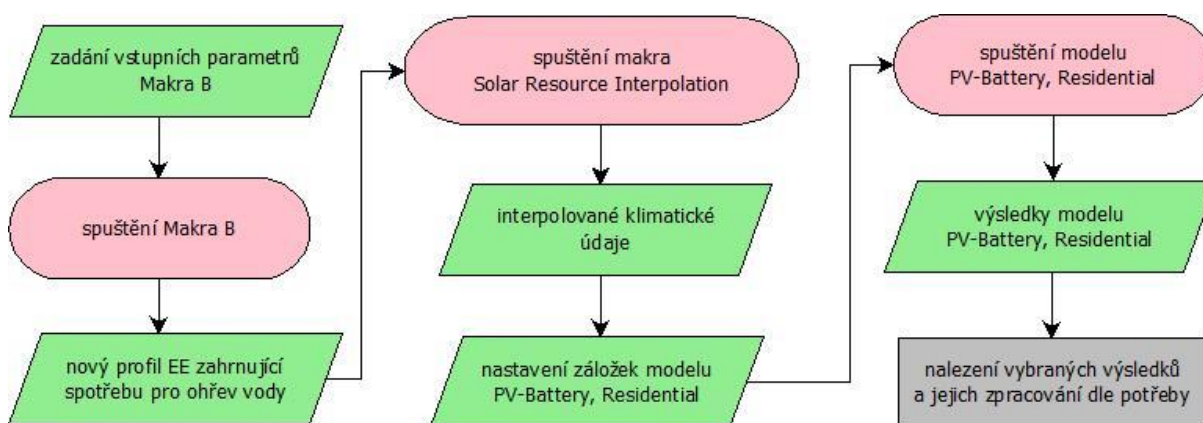
- Makro *Solar Resource File Converter*. Před samotnou interpolací je v některých případech potřeba nejdříve převést zdrojový soubor klimatických dat do formátu požadovaného SAM.
- Makro *Solar Resource Interpolation*. Toto makro již interpoluje hodnoty zdrojového souboru na zvolený časový krok. V našem případě to bude vždy 1 minuta.

V další fázi je již možné přejít k samotné simulaci v rámci modelu s bateriovým úložištěm. Nejdříve je potřeba nastavit parametry všech pro nás důležitých záložek modelu. Ke zjištění energetické bilance systému s baterií je potřeba správně vyplnit tyto záložky: *Location and Resource, Module, Inverter, System Design, Shading and Layout, Losses, Battery Storage, Lifetime and Degradation* a *Electric Load*. V poslední jmenované záložce je potřeba správně zadat údaje o spotřebě, neboť zde budeme nahrávat

⁵ V praxi je možné systém realizovat tak, že v případě plného nabití baterie, je možné případné další přebytky ukládat do zásobníku TV. Při tvorbě této simulace ale bylo cílem využít již stávajících funkcí programu a zároveň zohlednit zásobník TV v celkové spotřebě objektu. Proto bylo přistoupeno k tomuto řešení, které se v praxi rovněž vyskytuje.

nově vytvořený odběrový profil EE. Podrobnější instrukce pro vložení tohoto profilu jsou uvedeny přímo v okně Makra B.

Po spuštění výpočtu modelu (tlačítko *Simulate*) se uživateli automaticky otevře nabídka s výsledky simulace. V nabídce *Data tables* → *Lifetime Hourly Data* je možné nalézt minutové hodnoty různých veličin za 25 let. Tato data je pak možné dále zpracovávat buď přímo v softwaru SAM, nebo je lze exportovat například do MS Excel. V rámci této práce budou data dále využita pro tvorbu ekonomické analýzy systému v kapitole 6.5, kde nás bude zajímat odběr/dodávka elektřiny z DS (minutové hodnoty *Electricity to/from grid*). Komplexnější pohled pro nastavení této simulace znázorňuje diagram na Obrázku 14.



Obrázek 14: Procesní diagram pro práci s modelem s ukládáním přebytků do baterie

Řízení ohřevu signálem HDO není při vytváření nového odběrového profilu zahrnuto. Je ovšem možné přijmout určitá zjednodušení, na základě kterých lze předpokládat blokováný ohřev vody ze sítě v době VT. Většina přebytků se do baterie ukládá v průběhu dne, kdy je výroba FVE největší. Nejvyšší odběr teplé vody nastává typicky ve večerních hodinách, kdy již obvykle platí VT. Ohřev z DS by tak měl být blokován a baterie dostatečně nabitá. Z tohoto důvodu předpokládáme, že ohřev na minimální teplotu bude v této době pokryt energií uloženou v baterii a nebude docházet k ohřevu ze sítě, který by měl být teoreticky blokován.

Výhodou Makra B je tvorba odběrového profilu s ohledem na zadané parametry zásobníku TV. Dále pak minutový krok profilu, který bude zachován pro přesnější výsledky simulace s ukládáním přebytků do baterie. Pokud bychom měli k dispozici odběrový profil, který již zahrnuje spotřebu energie pro přípravu TV, je možné uvedený postup přeskočit a přejít rovnou k nastavení záložek modelu *PV-Battery, Residential*. Vždy je ovšem důležité nahrávat správné údaje o spotřebě.

6 Případová studie

V této kapitole si na příkladu ukážeme použití vytvořených simulací. Cílem bude vzájemné porovnání různých variant fotovoltaického systému s akumulací. Hlavní rozdíl mezi jednotlivými variantami je ve způsobu ukládání přebytků výroby FVE. Porovnávat budeme následující varianty:

- Varianta 0 – Výchozí stav, bez fotovoltaického systému a s elektrickým ohřevem TV;
- Varianta 1 – Fotovoltaický systém s akumulací přebytků do zásobníku TV;
- Varianta 2 – Fotovoltaický systém s akumulací přebytků do fyzické baterie;
- Varianta 3 – Fotovoltaický systém s akumulací přebytků do virtuální baterie (a zásobníku TV).

Do porovnání naopak nebudeme zahrnovat variantu s prodejem všech přebytků obchodníkovi, neboť v současné době obecně platí, že využít vyrobenou energii pro vlastní spotřebu je vždy výhodnější než její prodej za sjednanou výkupní cenu.⁶ Navíc cílem je zjistit, která forma akumulace je z pohledu zákazníka nejvýhodnější. Dále zde také nebudeme uvažovat variantu s přímým ohřevem vody, neboť v takovém případě nelze vyrobenou energii využít pro jiné účely z důvodu absence střídače, stejně tak ani nelze energii dodávat do sítě.

Uvedené možnosti budou vyhodnoceny z kvantitativního hlediska, kdy rozhodujícím kritériem bude výše hodnoty NPV a doba návratnosti. Diskutovány budou také některá neekonomická specifika. Důležitým aspektem při návrhu systému bude možnost využít některý z dotačních titulů.

6.1 Popis objektu

Uvažovat budeme modelový rodinný dům, který obývá čtyřčlenná rodina. Objekt se nachází na území hl. m. Prahy, městské části Praha-Kunratice. Roční spotřeba objektu je 2040 kWh, přičemž odběrový profil EE je stejný jako v kapitole 4.1.1. Spotřeba energie pro ohřev vody bude dopočítána až dodatečně v rámci simulace v závislosti na parametrech zásobníku a topného tělesa. Odběrový profil TV bude použit stejný jako výstup ze simulátoru LPG uvedený v části 4.2.2, ovšem tentokrát již nebudeme uvažovat období dvoutýdenní rodinné dovolené. V simulaci se tento profil bude nahrávat v poměrných jednotkách. Spotřeba teplé vody je dle [40] uvažována 45 l/os denně. Celková roční spotřeba potom dosahuje 65,7 m³. Pro 4člennou rodinu se doporučuje velikost zásobníku v rozmezí 160 až 200 litrů. V případě dvoutarifní sazby je vhodné volit spíše vyšší objem. Jako výchozí stav budeme předpokládat, že je v objektu instalován ohřívač vody OKCE 200 o objemu 199 l. Minimální teplota vody v nádrži bude nastavena na 55 °C, neboť tato hodnota je doporučována některými výrobci kvůli dostatečnému tepelnému komfortu a jako ochrana proti šíření bakterie Legionella. Velikost jističe bude stejná jako v použitém odběrovém profilu EE, tedy 3x25 A. Z důvodu přidání elektrického ohřevu vody byla tato hodnota ještě znovu ověřena kalkulátorem PRE [41]. Pro střešní FVE předpokládáme pevný sklon 35° a orientaci k jihu bez zastínění.

⁶ Tvzení je založeno na analýze výkupních cen některých dodavatelů. Z důvodu obchodního tajemství nebývá tato cena na webových stránkách jednotlivých dodavatelů uváděna, nicméně s ohledem na informace dohledatelné na internetu by se měla pohybovat maximálně kolem 1 Kč/kWh.

Tabulka 7: Společné parametry porovnávaných variant

Klimatické údaje	TMY 2007-2016 pro souř. 50.013N; 14.483E (Kunratice)
Orientace panelů	180° - Jih
Sklon střechy	35°
Denní spotřeba TV	45 l/os
Počet osob v objektu	4 os
Objem zásobníku	199 l
Min. teplota vody	55 °C
Max. teplota vody	80 °C
Teplota studené vody	10 °C
Teplota okolí	20 °C
Teplota vody na začátku simulace	55 °C

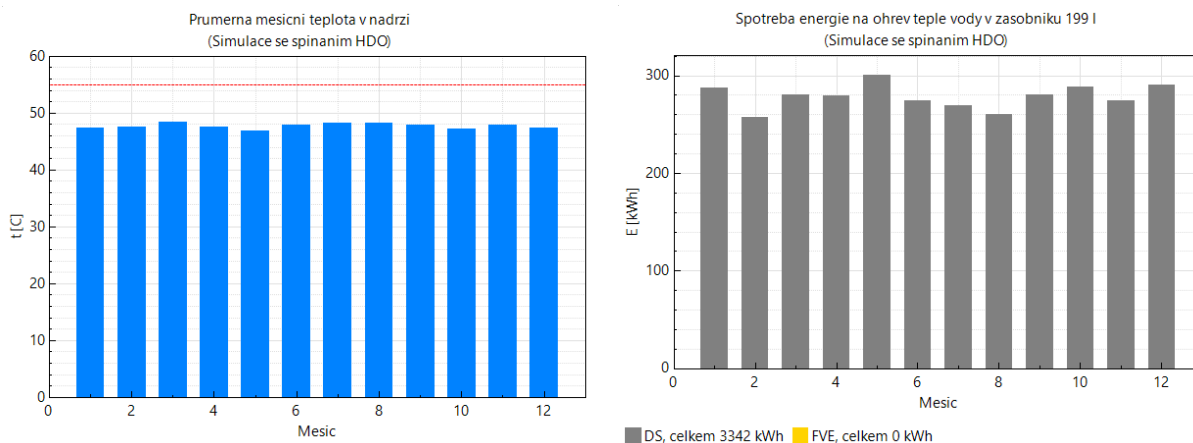
6.2 Obecné předpoklady

Varianty budou posuzovány za dobu životnosti 20 let. Roční spotřebu EE předpokládáme pro všechny roky stejnou. Počet používaných elektrospotřebičů se sice bude spíše navyšovat, na druhou stranu jejich efektivita bude s postupujícím vývojem vyšší. Eskalace růstu ceny elektřiny je vzhledem k výši inflace v posledních letech stanovena na 3 % ročně. Jelikož se objekt nachází na území hl. m. Prahy, za případné přetoky do DS nebudou provozovateli účtovány žádné poplatky (distribuční území PREDistribuce, viz kapitola 3.1). Produkce FVE bude každým rokem v důsledku degradace komponent klesat o 0,25 %. Jedná se o referenční hodnotu, která byla zvolena na základě výsledků neveřejné studie Laboratoře diagnostiky fotovoltaických systémů ČVUT v Praze. Provozní náklady FVE byly stanoveny na 1 500 Kč ročně. Tato částka zahrnuje provádění běžné roční prohlídky (např. pomocí dronu), pravidelnou revizi každé dva roky, drobné opravy a čištění. Životnost zásobníku uvažujeme 20 let, výhodné je v tomto případě volit typ s vyjímatelným topným tělesem, což usnadní údržbu a servis. Životnost střídače výrobci standardně udávají na 5 let. V některých případech ji lze prodloužit až na dvojnásobek, nicméně během života projektu je potřeba počítat s minimálně jednou výměnou. Tu předpokládáme po 10 letech provozu. Výše diskontní sazby byla odvozena od výše zhodnocení některých spořicíh účtů na 2 %. Ceny jednotlivých položek budou vždy uváděny včetně DPH.

6.3 Varianta 0 – Výchozí stav

V této části bude definován výchozí stav, se kterým budou následně porovnávané další varianty. Pro zjištění celkové roční spotřeby EE je nezbytné pomocí Makra A dopočítat energii potřebnou pro ohřev vody. K tomu musíme znát parametry zásobníku, které pro výše zmíněný typ (OKCE 200) najdeme v Příloze A. Makro bude spuštěno v režimu bez FVE. Zároveň v této kapitole porovnáme výsledky pro systém řízený signálem HDO a systém s jednotarifní sazbou.

Na následujícím Obrázku 15 jsou vybrané výsledky pro systém s funkcí HDO. Předpokládáme, že rodina má dvoutarifní distribuční sazbu D25d pro elektrický ohřev vody. Časy spínání HDO jsou dle [42] nastaveny pro povel přijímače 504.



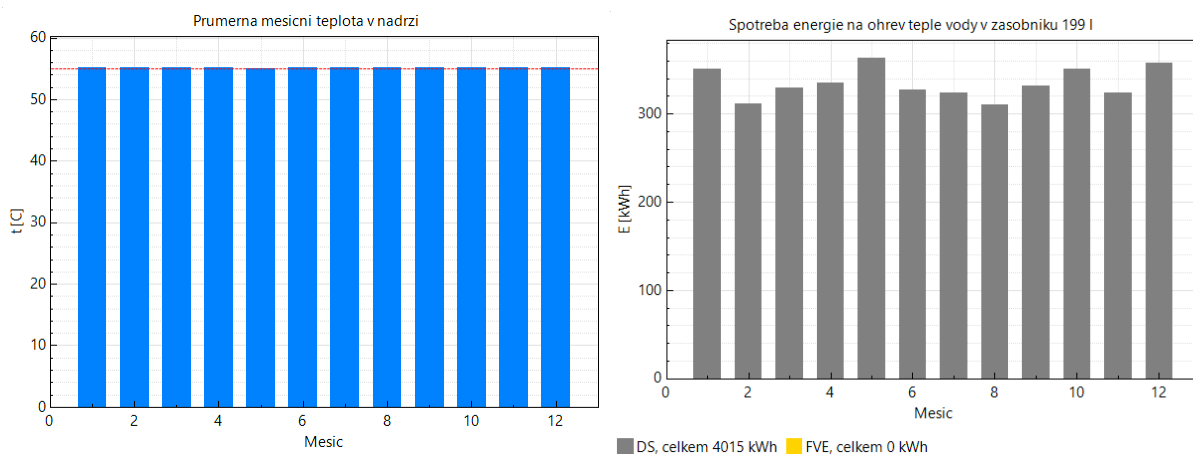
Obrázek 15: Vybrané výsledky Makra A pro variantu 0 s funkcí HDO

Celková spotřeba objektu je 5382 kWh, z toho 3342 kWh bylo spotřebováno na ohřev vody. Podrobnější výsledky včetně informace o odběru v době NT a VT lze získat z tabulky s číselnými výsledky, která je makrem generována pod názvem *vysledky.csv*. Ke stanovení celkových ročních nákladů na odběr EE byl využit online kalkulačtor cen ERÚ. [43] Jako dodavatel byla vybrána společnost Yello a její produkt YELLO Double. Celkové náklady jsou uvedeny v Tabulce 8.

Tabulka 8: Výpočet ročních nákladů na odběr elektrické energie ve variantě 0 s funkcí HDO

Položka	Jednotková cena		Množství		Cena celkem	
Stálá platba ⁷	228,58	Kč/měsíc	12	měsíců	2 743,0	Kč
Vysoký tarif	4,61721	Kč/kWh	1 555,5	kWh	7 177,5	Kč
Nízký tarif	2,6923	Kč/kWh	3 827,4	kWh	10 304,5	Kč
Celkové náklady					20 224,9	Kč

Pro systém bez HDO uvažujeme jednotarifní sazbu D02d, stejného dodavatele a produkt YELLO Watt. Výsledky simulace pro tento případ jsou v Obrázku 16.



Obrázek 16: Vybrané výsledky Makra A pro variantu 0 bez funkce HDO

⁷ Zahrnuje pevnou cenu za měsíc, poplatek za rezervovaný příkon a činnost OTE.

Jelikož ohřev vody není v tomto případě nikdy blokován, je celková spotřeba energie ze sítě vyšší než v předchozím případě (nyní celkem 6 055 kWh). Celkové náklady za odběr elektřiny s využitím jednotarifní sazby jsou uvedeny v Tabulce 9.

Tabulka 9: Výpočet ročních nákladů na odběr elektrické energie ve variantě 0 bez HDO

Položka	Jednotková cena		Množství		Cena celkem	
Stálá platba	203,17	Kč/měsíc	12	měsíců	2 438,0	Kč
Vysoký tarif	4,62999	Kč/kWh	6 055	kWh	28 034,6	Kč
Celkové náklady					30 472,6	Kč

Porovnáním výsledků obou možností zjistíme, že ve variantě bez HDO je vždy dosaženo průměrné minimální teploty vody v nádrži, přičemž ale celkové náklady za odběr EE jsou výrazně vyšší. To je způsobeno absencí výhodnější sazby a blokování ohřevu v době VT. Je tedy otázkou, který ukazatel pro nás vyhodnotíme jako přínosnější - dodržení požadované teploty, nebo nižší náklady. V případě dvoutarifní sazby lze problém částečně vyřešit nastavením vyšší minimální teploty, ovšem toto řešení má zároveň několik nedostatků. Nahřívání vody na vyšší nastavenou teplotu zvýší tepelné ztráty a rovněž také odběr EE v době NT. Navíc častější vysoká teplota vody v nádrži urychluje degradaci komponent zásobníku a zvyšuje riziko opáření například při koupání. Optimální nastavená teplota by měla být v rozmezí 55 až 60 °C. Je tedy zřejmé, že toto řešení by nepřineslo dostatečný efekt.

Odběrový profil TV, se kterým v simulaci pracujeme, je generován předem s ohledem na potřeby jednotlivých členů domácnosti v průběhu dne. Návyky a potřeby jednotlivých osob lze v LPG částečně modifikovat, nicméně ne v takovém rozsahu, aby šlo v jejich „chování“ zohlednit střídání tarifů během dne. Proto je pro tento odběrový profil simulace s HDO nevhodná.

S ohledem na výše uvedené důvody budeme za výchozí variantu dále považovat systém bez HDO.

6.4 Varianta 1 – Fotovoltaický systém s akumulací přebytků do zásobníku teplé vody

Podmínky pro získání dotace

Jak již bylo řečeno, jedním z cílů při návrhu tohoto systému bude snaha využít některý z dotačních titulů. Dle [19] se v tomto případě jedná o podoblast podpory C.3.4 pro fotovoltaické systémy bez akumulace elektrické energie s tepelným využitím přebytků a celkovým využitelným ziskem minimálně 1 700 kWh ročně, přičemž míra využití vyrobené energie musí být alespoň 70 %. Minimální požadovaný objem zásobníku TV pro akumulaci přebytků ve formě tepla je 120 l. Dále by měl být použit měnič s funkcí MPPT a minimální účinností 94 % (Euro účinnost). Systém tedy bude navržen tak, aby splnil všechny požadavky pro přiznání státního příspěvku ve výši 55 000 Kč.

Návrh systému a volba komponent

Zjednodušeně lze předpokládat, že 1 kWp instalovaného výkonu vyrobí v podmínkách ČR přibližně 1000 kWh za rok. Abychom vyhověli požadavkům pro získání dotace, a zároveň si ponechali určitou rezervu, neměl by tedy být instalovaný výkon nižší než 2 kWp. Vzhledem k celkové roční spotřebě EE ve variantě 0 a dle potřebné velikosti střešní plochy pro instalaci (přibližně 5 m²/kWp), bylo prozatím přistoupeno k volbě systému o velikosti 2,7 kWp. Jedná se spíše o nižší návrhovou hodnotu, která bude v případě nepříznivých ekonomických výsledků přehodnocena. Zároveň takováto velikost systému je některými společnostmi nabízena tzv. „na klíč“, čehož bude v rámci návrhu využito. Ačkoliv si případný zájemce může celý systém kompletně navrhnout sám, budeme předpokládat, že časová úspora v případě využití znalostí odborné firmy převáží nad možnou finanční úsporou.

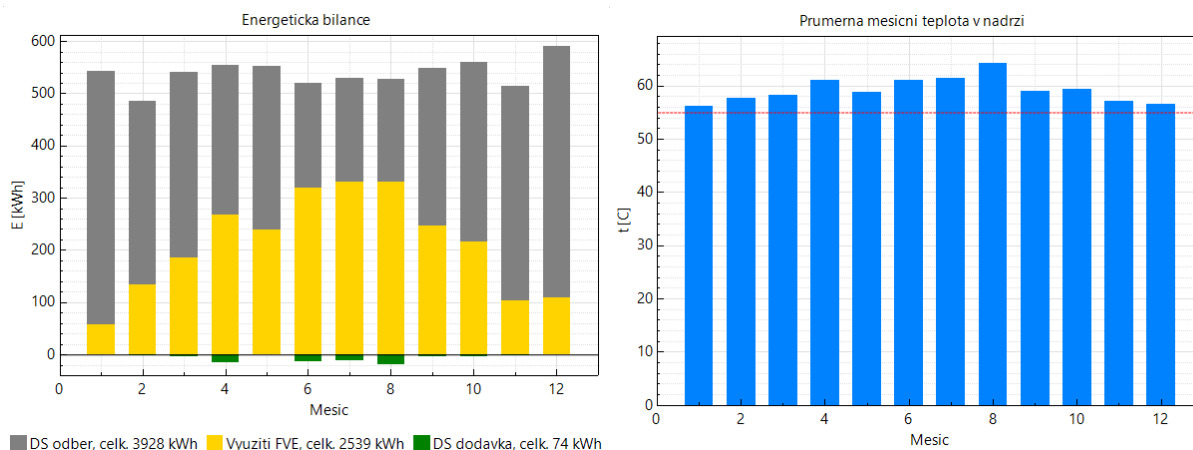
Vybrána byla nabídka od společnosti Solární Experti s.r.o. [44], která zahrnuje střešní instalaci FVE o instalovaném výkonu 2,7 kWp včetně možnosti akumulovat přebytky do teplé vody. Součástí nabídky je dodání a montáž střídače, WATTrouteru a vyřízení dotace ve výši 60 000 Kč (zahrnuje též státní příspěvek 5 000 Kč na zpracování odborného posudku a dokumentace). Dodání a instalace zásobníku TV není v nabídce zahrnuta. V rámci návrhu budeme nicméně uvažovat výměnu stávajícího zásobníku za nový, který nám vydrží po celou dobu životnosti projektu. Vybrán byl ohřívač vody se dvěma topnými tělesy OKCE 200 2/4 kW, který je zároveň vhodný pro kombinaci s WATTrouterem. Cena tohoto zásobníku se na trhu pohybuje přibližně okolo 12 000 Kč.

Tabulka 10: Nabídka fotovoltaického systému od společnosti Solární Experti s.r.o. [44]

Přehled nabízeného systému o výkonu 2,7 kWp	
Fotovoltaické panely	AEG AS-M1443-H (6 x 450 Wp)
Montážní systém	IBC TopFix 200 (vhodný pro všechny typy střešní krytiny)
Střídač	GoodWE GW3000-NS
Rízení vlastní spotřeby	WATTrouter
Připojení do sítě	jednofázově (230 V)
Využití přebytků	ohřev teplé vody
Dodávka přebytků do sítě	možná
Zásobník teplé vody	není součástí nabídky
Cena včetně DPH	62 000 Kč (po odečtení dotace NZÚ)

Ekonomické zhodnocení

Nejdříve provedeme vypočet v Makru A v prostředí SAM, čímž zjistíme toky energie v objektu a výsledky budeme moci použít pro ekonomické výpočty. Parametry panelu, střídače a zásobníku TV byly do programu zadány dle datasheetů. Na Obrázku 17 jsou vybrané výstupy programu pro variantu 1. Je zřejmé, že podmínka využít alespoň 70 % vyrobené elektřiny pro vlastní spotřebu byla splněna, stejně jako podmínka minimálního využitelného zisku 1 700 kWh za rok.



Obrázek 17: Vybrané výsledky Makra A pro variantu 1

Velikost ročního odběru EE ze sítě je 3928 kWh. Celkové náklady na odběr elektřiny jsou pak počítány stejným způsobem jako ve variantě 0 bez HDO pro sazbu D02d. Jak již bylo zmíněno, velikost finanční úspory vypočteme jako rozdíl ročních nákladů na odběr EE z DS pro variantu 0 a pro variantu 1, což v tomto případě činí 9 848 Kč.

Tabulka 11: Výpočet ročních nákladů na odběr elektrické energie ve variantě 1

Položka	Jednotková cena		Množství		Cena celkem	
Stálá platba	203,17	Kč/měsíc	12	měsíců	2 438,0	Kč
Vysoký tarif	4,62999	Kč/kWh	3 928	kWh	18 186,6	Kč
Celkové náklady					20 624,6	Kč

Ačkoliv produkce FVE v důsledku degradace panelů klesá, budeme množství uspořené energie uvažovat po celé sledované období konstantní. Většina přebytků se do zásobníku akumuluje kolem poledne, kdy je spotřeba teplé vody v objektu nižší nebo žádná. Část přebytků je potom ukládána nad rámec nezbytné potřeby. Ze stejného důvodu je také zejména v letních měsících průměrná teplota vody v nádrži vyšší, než je nastavená minimální mez, viz Obrázek 16. Zde bylo přijato zjednodušení, že energie, o kterou se produkce každoročně sníží (0,25 %), bude brána právě z této „rezervy“, která je navíc větší, než pokles produkce za 20 let.

Přehled všech vstupních údajů pro výpočet kritéria NPV je uveden v Tabulce 12. Ceny položek jsou uvedeny včetně DPH. Výměnu střídače uvažujeme po 10 letech provozu, přičemž cenu předpokládáme v 11. roce přibližně stejnou jako je dnes, k tomu dále ještě připočteme náklady za elektromontážní práce. Celkem nás tak výměna střídače vyjde na 17 000 Kč. Cena instalace nového zásobníku byla stanovena orientačně dle udávaných cen některých firem pro lokalitu hl. m. Prahy.

Tabulka 12: Vstupní údaje pro výpočet kritéria NPV ve variantě 1

Životnost	20	let
FV systém od společnosti Solární Experti s.r.o.	62 000	Kč
Zásobník TV Dražice OKCE 200 2/4 kW	12 089	Kč
Instalace zásobníku TV (vč. demontáže a likvidace stávajícího)	5 000	Kč
Náklady na odběr EE (1. rok)	20 625	Kč
Úspora za odběr EE proti variantě 0 (1. rok)	9 848	Kč
Náklady na provoz	1 500	Kč
Výměna střídače po 10 letech provozu	17 000	Kč
Eskalace ceny EE	3	%
Diskontní sazba	2	%

Výpočet kritéria NPV je uveden v Příloze C. Výsledky pro ekonomická kritéria jsou uvedeny v následující tabulce. Na webových stránkách společnosti nabízející vybraný solární systém je uvedena doba návratnosti necelých 8 let. V našem případě je prostá doba návratnosti jen o rok vyšší. Dle výsledků v Tabulce 13 se tato varianta jeví z pohledu investora jako velmi zajímavá. Příznivých výsledků je dosaženo i vzhledem k uvažované výměně zásobníku a střídače.

Tabulka 13: Výsledky ekonomických kritérií pro variantu 1

NPV	94 897	Kč
Prostá doba návratnosti	9	let
Diskontovaná doba návratnosti	10	let

Za povšimnutí stojí levá část Obrázku 17, kde je uvedena průměrná teplota vody v nádrži. I přes akumulování všech přebytků průměrná teplota vody v nádrži nepřesáhne v žádném měsíci 65 °C. Je ovšem potřeba připustit, že zejména v letních měsících teplota opakovaně atakuje povolené maximum 80 °C. Abychom snížili riziko opáření, případně rychlost degradace komponent zásobníku, lze nastavit nižší maximální teplotu a neakumulované přebytky dodávat do DS. Je také možné dodatečně přidat do Makra A další funkci, která by pro jednotlivé měsíce nastavovala jinou maximální teplotu. Optimalizace teploty vody uvnitř nádrže však není cílem této práce, a proto se ji nebudeme dále zabývat.

6.5 Varianta 2 – Fotovoltaický systém s akumulací přebytků do fyzické baterie

Podmínky pro získání dotace

V této variantě budeme opět cílit na získání státní podpory formou dotace. Pro akumulaci přebytků do fyzické baterie je určena podoblast podpory C.3.5, C.3.6 a C.3.7 programu NZÚ. Pro všechny kategorie musí být splněna podmínka minimální měrné kapacity akumulátorů, kdy platí, že na 1,25 kWp instalovaného výkonu FVE připadá minimálně 1,75 kWh instalované kapacity baterie. Dále musí být splněna podmínka využití 70 % generované energie v místě výroby. Tepelná akumulace přebytků je pro všechny zmíněné kategorie povolena. Výše dotace se liší v závislosti na množství využitelného zisku (70 000, 100 000 nebo 150 000 Kč). [19]

Návrh systému a volba komponent

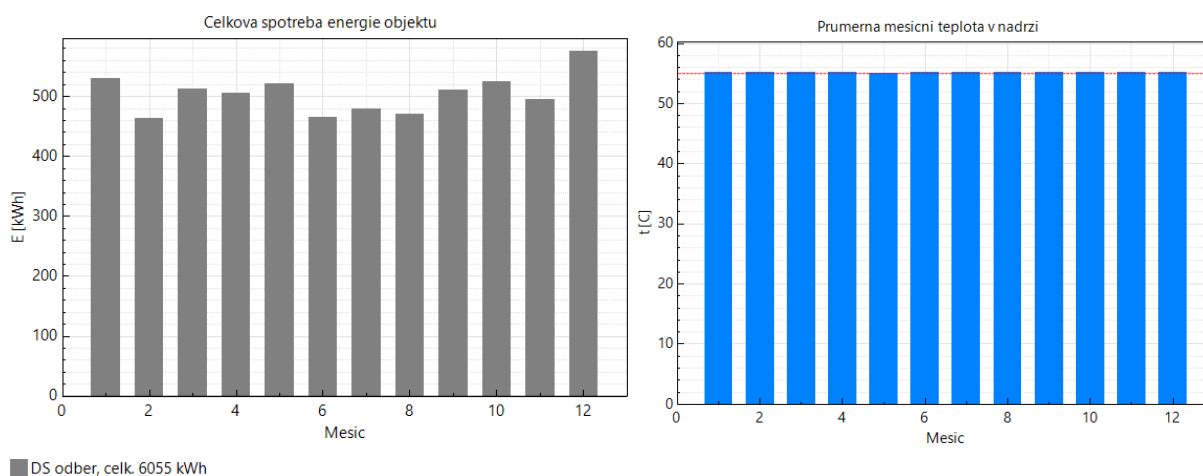
Stejně jako ve variantě s akumulací přebytků ohřevem vody, i tentokrát si návrh systému zjednodušíme a budeme uvažovat komplexní nabídku systému „na klíč“ od společnosti Solární Experti s.r.o. [45] V nabídce této společnosti je zahrnuto dodání a montáž FVE o instalovaném výkonu 3,6 kWp s akumulací přebytků do baterií LiFePO₄. Nabízená kapacita baterie je 4,8 kWh, přičemž je ale možné kapacitu navyšovat přikupováním dalších modulů. Tato možnost bude uvažována jen v případě, pokud by se ukázalo, že dochází i tak k velkým přetokům energie do sítě. Akumulace přebytků do zásobníku TV nebude v tomto případě uvažována, neboť by si tento krok dle nabídky společnosti vyžádal navýšení celkových nákladů o 11 500 Kč. Navíc z pohledu investora dává větší smysl navyšovat kapacitu bateriového úložiště. Hlavní komponenty a parametry této nabídky shrnuje Tabulka 14. Celková cena nabízeného systému již zahrnuje dotaci ve výši 105 000 Kč (vč. příspěvku 5 000 Kč na dokumentaci).

Tabulka 14: Nabídka fotovoltaického systému s baterií od společnosti Solární Experti s.r.o. [45]

Přehled nabízeného systému o výkonu 3,6 kWp s baterií 4,8 kWh	
Fotovoltaické panely	AEG AS-M1443-H (8 x 450 Wp)
Montážní systém	IBC TopFix 200 (vhodný pro všechny typy střešní krytiny)
Hybridní střídač	GoodWE GW3648D-ES
Baterie	Pylontech US2000B Plus (2x modul 2,4 kWh)
Připojení do sítě	jednofázově (230 V)
Využití přebytků	lithiová baterie
Dodávka přebytků do sítě	možná
Cena včetně DPH	135 000 Kč (po odečtení dotace NZÚ)

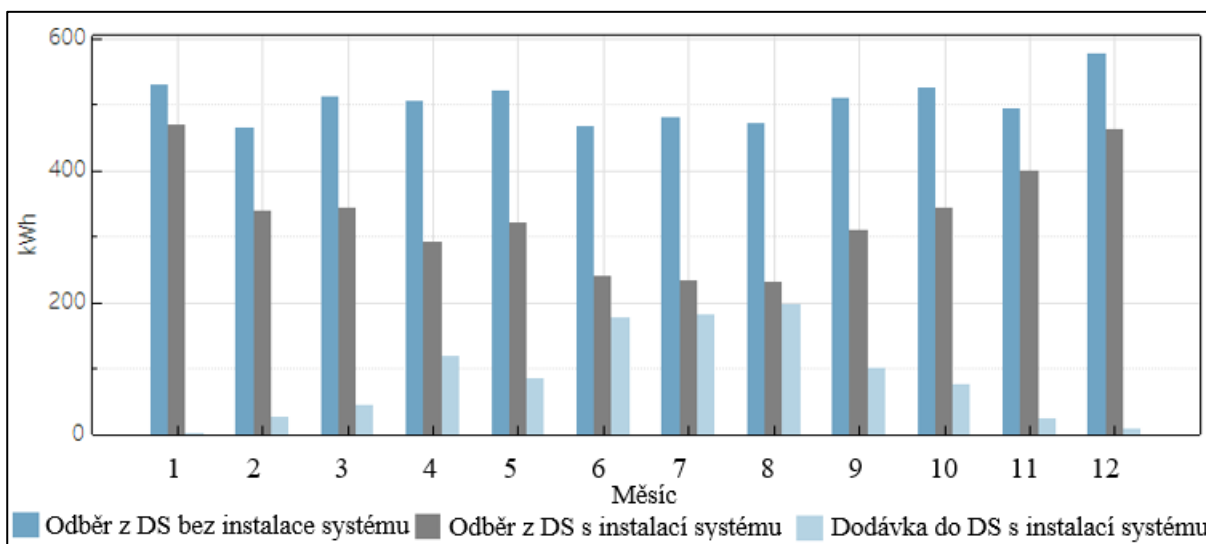
Ekonomické zhodnocení

Pro výpočet energetických veličin bude potřeba pracovat s odběrovým profilem EE, který již zahrnuje spotřebu energie pro ohřev vody. K jeho získání bude využito Makro B, viz kapitola 5.3. Jelikož zásobník TV nebudeme měnit za nový, nastavíme parametry v okně makra pro výchozí typ OKCE 200. Na Obrázku 18 je spotřeba energie objektu včetně teploty vody v jednotlivých měsících.

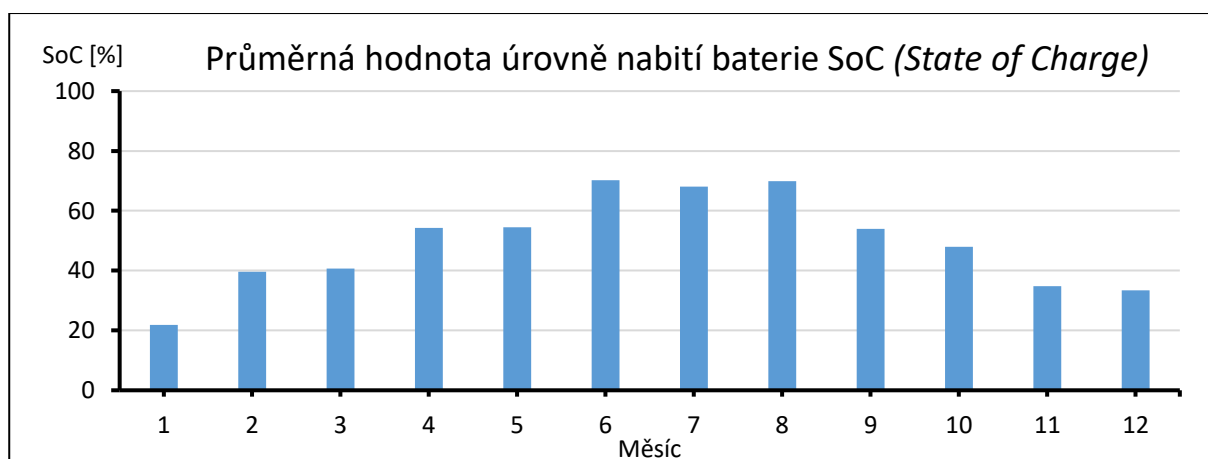


Obrázek 18: Vybrané výsledky Makra B pro variantu 2

Vygenerovaný profil budeme dále nahrávat v modelu SAM (*PV-Battery, Residential*). Parametry všech komponent zde vyplníme dle datasheetů. Porovnání o kolik se sníží spotřeba elektřiny v jednotlivých měsících při instalaci uvažovaného fotovoltaického systému s baterií je znázorněna na následujícím Obrázku 19. Celkem je produkce FVE v prvním roce 3 103 kWh, odběr EE z DS 3 991 kWh a dodávka do DS 1 039 kWh. Zde tak stojí za zvážení, zda by se vyplatilo systém rozšířit přikoupením dalšího bateriového modulu, neboť velikost přetoků je značná (podmínka využití 70 % produkce v místě výroby však byla splněna). Nicméně nejdříve systém posoudíme ve stávajícím návrhu.



Obrázek 19: Grafické zpracování vybraných výsledků pro variantu 2
Zdroj: model SAM, upraveno



Graf 13: Průměrná hodnota úrovně nabití baterie v jednotlivých měsících

Tab. 6-1: Výpočet ročních nákladů na odběr elektrické energie ve variantě 2

Položka	Jednotková cena		Množství		Cena celkem	
Stálá platba	203,17	Kč/měsíc	12	měsíců	2 438,0	Kč
Vysoký tarif	4,62999	Kč/kWh	3 991	kWh	18 478,3	Kč
Celkové náklady					20 916,3	Kč

V rámci hodnocení budeme opět předpokládat výměnu střídače v 11. roce. Uvedený typ lze dnes získat přibližně za 36 400 Kč. Cenu uvažujeme po 10 letech stejnou. Předpokládaná výměna nás tak včetně práce vyjde na 38 800 Kč. Životnost baterie je uváděna jako 6 000 cyklů při 80 % DoD. Pokud budeme uvažovat 1 cyklus denně, dosáhneme hranice životnosti přibližně v 16. roce. Nicméně předpokládáme, že baterie půjde i tak dále používat s omezenou kapacitou 80 % původní velikosti. Parametry pro výpočet kritéria NPV jsou uvedeny v Tabulce 15.

Tabulka 15: Vstupní údaje pro výpočet kritéria NPV ve variantě 2

Životnost	20	let
FV systém s baterií od společnosti Solární Experti s.r.o.	135 000	Kč
Náklady na odběr EE (1.rok)	20 916	Kč
Úspora za odběr EE proti variantě 0 (1. rok)	9 556	Kč
Náklady na provoz	1 500	Kč
Výměna střídače po 10 letech provozu	38 800	Kč
Degradace výkonu panelů	0,25	%
Eskalace ceny EE	3	%
Diskontní sazba	2	%

Velikost odběru EE z DS pro jednotlivé roky lze získat přímo z výsledků modelu, čehož bude v kalkulaci využito. Výpočet NPV lze nalézt v Příloze C. Výsledky jsou uvedeny v Tabulce 16. Je zřejmé, že investice do tohoto systému není z pohledu časové návratnosti příliš atraktivní. Na stránkách dodavatele je uvedeno, že předpokládaná doba návratnosti by měla být menší než 10 let, ovšem není přesně známo, za jakých předpokladů byla tato hodnota stanovena. Pozitivním výhledem do blízké budoucnosti může být očekávané snížení cen bateriových systémů. Nicméně na základě výsledků uvedených v tabulce zatím nelze tuto investici doporučit. Zároveň je ale potřeba vždy zvážit také některé nefinanční benefity, které tento systém nabízí, jako je například větší nezávislost na distribuční síti při výpadku dodávky elektřiny.

Tabulka 16: Výsledky ekonomických kritérií pro variantu 2

NPV	3 492	Kč
Prostá doba návratnosti	19	let
Diskontovaná doba návratnosti	20	let

Přidáním dalšího bateriového modulu se výsledky spíše zhorší, neboť dodatečná úspora za EE je minimální a náklady na koupi modulu relativně vysoké. Grafy v Příloze D znázorňují roční odběr EE ze sítě při využití bateriové úložiště s kapacitou 4,8 kWh a 7,2 kWh.

6.6 Varianta 3 – Fotovoltaický systém s akumulací přebytků do virtuální baterie

Virtuální baterie je spíše než technickým řešením zajímavým obchodním modelem, který je nabízen některými dodavateli elektřiny majitelům malých FVE. Koncept zjednodušeně funguje tak, že generované přebytky jsou „akumulovány“ v distribuční síti. Později lze stejné množství ze sítě opět

odebrat za výhodnějších podmínek, než by tomu bylo při běžném odběru. Je důležité vědět, že při odběru uložené energie ze sítě zpět jsou zákazníkovi stále účtovány poplatky za distribuci, OZE, systémové služby a další. Úspory tak lze dosáhnout pouze v ceně silové elektřiny.

Podmínky pro získání dotace

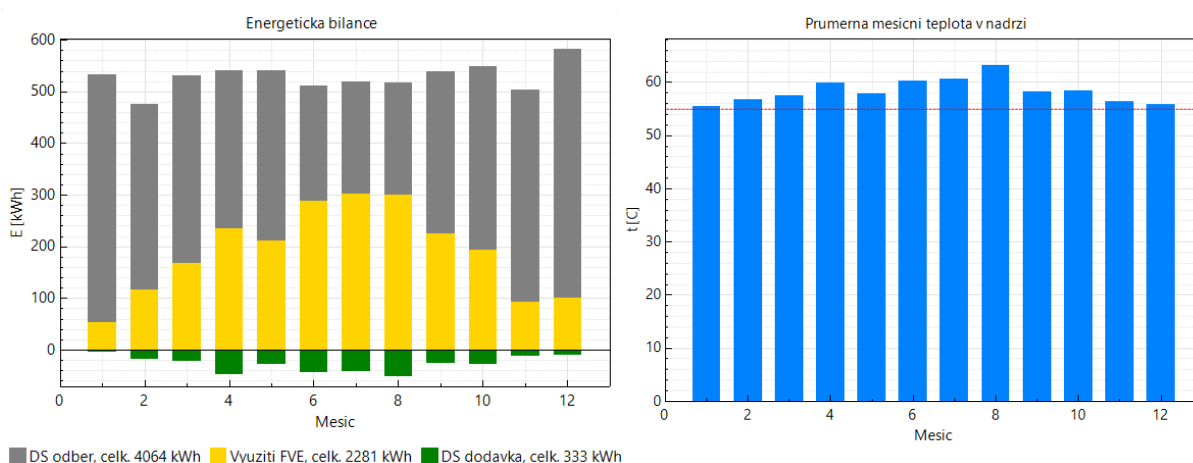
Pro FVE s akumulací přebytků pouze do virtuální baterie nelze získat dotaci z programu NZÚ. Tento koncept je proto vhodné kombinovat s akumulací přebytků do zásobníku TV nebo fyzické baterie, případně obojího, čímž bude možnost získat dotaci zachována. S ohledem na ekonomické výsledky varianty 1 a 2 budeme uvažovat kombinaci s ohřevem TV. Ve variantě 1 byl použit zásobník se dvěma topnými tělesy v důsledku čehož byly pro ohřev vody využity téměř všechny přebytky. Zároveň ale docházelo zejména v letních měsících k ohřevu vody na zbytečně vysokou teplotu. Stojí tedy za zvážení, zda by nebylo výhodnější část přebytků zkusit zpeněžit pomocí virtuální baterie namísto tepelné akumulace.

Návrh systému a volba komponent

Místo zásobníku TV se dvěma topnými tělesy zde budeme uvažovat využití stávajícího zásobníku (OKCE 200) s jedním topným tělesem, čímž se sníží množství akumulovaných přebytků v zásobníku. Nabídku na fotovoltaický systém nyní uvažujeme stejnou jako byla ve variantě 1 (viz Tabulka 10).⁸

Ekonomické zhodnocení

Z výsledků Makra A je zřejmá teoretická výše přetoků do DS, která dosahuje 333 kWh. Toto množství budeme ukládat do virtuální baterie. Ve srovnání s variantou 1 se v důsledku pouze jednoho topného tělesa navýšil celkový odběr z DS, neboť nedochází k tak výraznému využití přebytků. Zároveň se také mírně snížila průměrná teplota vody v nádrži.



Obrázek 20: Vybrané výsledky Makra A pro variantu 3

⁸ Řada dodavatelů nabízí virtuální baterii pouze jako součást svého balíčku, který zahrnuje také novou instalaci FVE. Přesná částka za instalaci se pak odvíjí od konkrétní nabídky. Jelikož se jedná o modelový příklad a detailní podmínky společnosti Yello se nepodařilo dohledat, pracujeme dále s námi vybranou nabídkou instalace.

Pracovat budeme dále s virtuální baterií od společnosti Yello (produkt Férová baterie). Během prvních dvou let nejsou s užíváním produktu spojeny žádné poplatky. V dalších letech je již služba zpoplatněna paušálně částkou 200 Kč/měsíc. Výše roční úspory díky virtuální baterii bude počítána jako rozdíl ceny uloženého množství energie, odebraného ze sítě za standardní cenu a stejného množství odebraného za výhodnějších podmínek, tedy bez platby za odběr silové elektřiny. To v praxi může být až kolem 40 % z celkové ceny. Následující Tabulka 17 shrnuje všechny důležité hodnoty pro výpočet kritéria NPV.

Tabulka 17: Vstupní údaje pro výpočet kritéria NPV ve variantě 3

Životnost	20	let
FV systém od společnosti Solární Experti s.r.o.	62 000	Kč
Náklady na odběr EE (1. rok)	21 254	Kč
Úspora za odběr EE proti variantě 0 (1. rok)	9 886	Kč
Náklady na provoz	1 500	Kč
Výměna střídače po 10 letech provozu	17 000	Kč
Degradace výkonu panelů	0,25	%
Eskalace ceny EE	3	%
Diskontní sazba	2	%
Cena kWh z virtuální baterie (1. rok)	2,62	Kč/kWh
Cena kWh z DS (1. rok)	4,63	Kč/kWh

Tabulka s výpočtem NPV je uvedena v Příloze C. Již na první pohled je zřejmé, že vyjma prvních dvou let jsou poplatky za službu Férová baterie vyšší, než kolik reálně s tímto produktem ušetříme za odběr EE. Využívání tohoto produktu tak negativně ovlivňuje celkovou ekonomiku provozu. To je zřejmé i z porovnání výše NPV s variantou 1, kde jsme uvažovali stejný fotovoltaický systém, ovšem veškeré přebytky byly ukládány do zásobníku TV. Řešením tohoto negativního projevu může být využití virtuální baterie od jiné společnosti, která si účtuje nižší paušální poplatky, případně je má vztažené na objem „uloženého“ množství (například firma E.ON). Nicméně i tak by bylo vhodné, aby množství energie uložené do virtuální baterie bylo vyšší. K tomu by bylo potřeba vybrat větší FV systém, čímž by se ale zároveň zvýšila vstupní investice. Cílem této analýzy není najít optimální velikost systému vzhledem k využívání produktu virtuální baterie, ale spíše na příkladu ukázat některá možná úskalí, která jsou s touto službou spojena.

Tabulka 18: Výsledky ekonomických kritérií pro variantu 3

NPV	81 216	Kč
Prostá doba návratnosti	9	let
Diskontovaná doba návratnosti	9	let

Diskontovaná doba návratnosti je v tomto případě nižší než ve variantě 1. To je způsobeno nižšími investičními náklady, neboť zde neuvažujeme výměnu ohřívače vody pro akumulování všech přebytků pomocí druhého topného tělesa. Nicméně není pravděpodobné, že by stávající zásobník vydržel po celou dobu životnosti projektu, záleží vždy na momentálním technickém stavu a stáří komponent.

6.7 Shrnutí výsledků

Výsledky pro všechny tři varianty jsou uvedeny v Tabulce 19. Je zřejmé, že jako nejvýhodnější se jeví varianta 1 s tepelnou akumulací všech přebytků. Jako nejméně výhodná pak varianta 2 využívající pro ukládání přebytků bateriové úložiště. Varianta 3 pak v tomto konkrétním návrhu nedává vůbec smysl, neboť využívání služby virtuální baterie obnáší vysoké poplatky, které sledované ukazatele akorát zhoršují.

Tabulka 19: Souhrn ekonomický výsledků pro jednotlivé varianty

Ekonomické kritérium	Jednotka	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
NPV	Kč	94 897	3 492	81 216
Doba návratnosti	rok	9	18	9
Diskontovaná doba návratnosti	rok	10	20	9

Je velmi důležité podotknout, že všechny varianty jsou posuzovány pouze pro jeden konkrétní příklad (velikost FVE, modelový objekt atp.). Vyvozené závěry tak nelze aplikovat obecně a vždy je potřeba každý případ individuálně posoudit. Zároveň je také potřeba zvážit i různé technické aspekty jednotlivých variant, které nelze při ekonomickém zhodnocení zohledňovat. Může to být například teplota vody v nádrži, nebo odolnost systému s baterií proti výpadkům.

Obecně však lze tvrdit, že bezlicenční fotovoltaické systémy se stávají výhodnějšími, pokud je využití přebytků pro vlastní spotřebu maximalizováno. Jakákoliv forma prodeje nadprodukce do DS nebude ekonomicky tak přínosná, jako využití přebytků v rámci objektu, což ostatně potvrzuje varianta 3. S ohledem na současné ceny bateriových systémů se zdá, že je stále výhodnější investovat do systému s tepelnou akumulací přebytků. V takovém případě je ale důležité monitorovat teplotu uvnitř nádrže a případně přijmout některá opatření vedoucí k zajištění dostatečného tepelného komfortu a ochraně proti opaření například při koupání. Jednou z otázek do budoucna také zůstává, zda bude docházet k postupnému zavádění konceptu tzv. energeticky soběstačných komunit, kde by větší bateriové úložiště sdílelo klidně i několik domácností. Sdílené náklady by pak teoreticky mohly velmi příznivě ovlivnit ekonomickou návratnost projektu s baterií pro jednotlivé členy.

V každém případě, pro vybraný modelový objekt je nejvýhodnější zvolit fotovoltaický systém s ukládáním přebytků do zásobníku TV.

7 Závěr

V této diplomové práci jsme se zabývali bezlicenčními fotovoltaickými zdroji s instalovaným výkonem do 10 kWp. V první části byly popsány hlavní komponenty těchto systémů. Dále jsme se blíže věnovali některým legislativním specifikům, která jsou platná v podmínkách ČR. Zde uvedené informace jsou důležité zejména při návrhu a ekonomickém posouzení těchto systémů.

V další kapitole byly představeny možnosti tvorby odběrových profilů elektrické energie a teplé vody. K tomuto účelu posloužila reálná, průběhově naměřená data, statistické údaje anebo také program LPG, který na základě předvolených vstupů dokáže profily vygenerovat. Příklady profilů uvedených v této kapitole jsme pak využili v dalších částech práce.

Stěžejní kapitolou je tvorba simulací fotovoltaických systému včetně instalovaných odběrů a akumulace v prostředí SAM. V tomto nástroji byly vytvořeny vlastní nové funkce pomocí skriptovacího jazyka LK. Vytvořený program umožňuje modelovat domácnost s fotovoltaickým systémem a ukládáním přebytků do zásobníku teplé vody. Výstupy simulace jsou zobrazovány v grafech a zároveň také podrobněji zpracovány ve vygenerovaném CSV souboru. Výsledky byly ověřeny a porovnány s jiným, již zavedeným programem. V prostředí SAM lze program spustit jako samostatné makro, které pro modelování produkce FVE využívá již stávajících funkcí softwaru. Tento simulační mechanismus zohledňuje všechny důležité aspekty, jako je velikost produkovaných přebytků nebo parametry zásobníku, které lze libovolně zadat v rámci uživatelského rozhraní makra. Jednou z funkcí, kterou lze rovněž v makru nastavit je možnost řízeného ohřevu vody signálem HDO. Pro generování povelů spínání HDO byl vytvořen vlastní nástroj v programu MS Excel. Všechny tyto nástroje jsou včetně návodu pro jejich spuštění přílohou diplomové práce. Hlavním přínosem této kapitoly je tedy vytvořené makro s funkcí akumulace přebytků ohřevem vody v zásobníku a také popularizace softwaru SAM, který zatím není v ČR příliš rozšířen. Makro je možné dále obohacovat o další nové funkce. Do budoucna to může být například inteligentní řízení systému, kde by byla využita predikce osvitu a podobně. Pro případné rozšiřování programu jsou v práci uvedeny odkazy, které poslouží pro lepší orientaci uvnitř zdrojového kódu.

V závěrečné kapitole byly stávající a nově vytvořené funkce softwaru SAM demonstrovány na případové studii. Zde byly posouzeny různé konfigurace fotovoltaického systému a akumulace, které jsme následně podrobili ekonomické analýze. Porovnávané varianty se lišily způsobem skladování přebytků. Jednalo se o akumulaci přebytků do zásobníku teplé vody, do fyzické baterie a virtuální baterie. Z uvedeného porovnání vyplývá, že pro případného majitele bezlicenčního fotovoltaického systému je nejvýhodnější zvolit variantu tepelné akumulace, tedy ukládání přebytků ohřevem vody v zásobníku. V případě bateriového systému jsou hlavním nedostatkem obecně vyšší investiční náklady, zatímco koncept virtuální baterie obnáší poměrně vysoké měsíční poplatky za službu. Navíc mnoho společností tento koncept nabízí pouze jako součást svého balíčku, který mimo jiné zahrnuje také fotovoltaickou střešní instalaci.

Autor práce konstatuje, že všechny body zadání byly splněny.

Použitá a citovaná literatura

- [1] HYLSKÝ, Josef, David STRACHALA a Jiří VANĚK. *Nejstarší fotovoltaická elektrárna v České republice*. [online]. 2015 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/13447-nejstarsi-fotovoltaicka-elektrarna-v-ceske-republice>
- [2] BECHNÍK, Bronislav. *Obnovitelné zdroje energie - vývoj výkupních cen*. [online]. 2010 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/6950-obnovitelne-zdroje-energie-vyvoj-vykupnich-cen>
- [3] Úspory i ochrana klimatu. Češi berou program Nová zelená úsporám útokem. *Nová zelená úsporám* [online]. MŽP, 2020 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.novazelenausporam.cz/tiskove-zpravy/detail-tiskove-zpravy/?id=14>
- [4] Solární asociace. *Česká fotovoltaika se v roce 2019 zvedla ze dna, i tak výrazně zaostává za okolními státy*. [online]. 2020 [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/20184-ceska-fotovoltaika-se-v-roce-2019-zvedla-ze-dna-i-tak-vyrazne-zaostava-za-okolnimi-staty>
- [5] ARDANI, K., E. O'SHAUGHNESSY, E. FU, C. MCCLURG, J. HUNEYCUTT a R. MARGOLIS. *Installed Cost Benchmarks and Deployment Barriers for Residential Solar Photovoltaics with Energy Storage: Q1 2016* [online]. In: Denver: NREL, 2017 [cit. 2021-03-21]. Dostupné také v PDF z: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67474.pdf>
- [6] BENDA, Vítězslav: *Přednášky z předmětu Aplikace solárních systémů (B1M13ASS)*, FEL ČVUT v Praze, 2020.
- [7] *Fotovoltaická elektrárna - pojmy. FVEsystemy* [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: https://www.fvesystemy.cz/Terminologie-a5_0.htm
- [8] Czech RE Agency. *Fotovoltaický střídač - účinnost není vše: Důležitější je maximální výnos energie*. [online]. 2009 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5571-fotovoltaicky-stridac-ucinnost-neni-vse>
- [9] *Baterie pro fotovoltaiku – typy, výhody, nedostatky. Bohemia civil engineering* [online]. 2020 [cit. 2021-4-5]. Dostupné z: <https://www.bce.cz/baterie-pro-fotovoltaiku-typy-vyhody-nedostatky/>
- [10] VEGA-GARITA, V., A. HANIF, N. NARAYAN, L. RAMIREZ-ELIZONDO a P. BAUER. *Selecting a suitable battery technology for the photovoltaic battery integrated module* [online]. Elsevier, 2019, 1-11 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227011>
- [11] ZILVAR, Jiří. *Domácí fotovoltaika s bateriemi dále zlevňuje a stává se dostupnější pro stále více zákazníků*. [online]. 2020 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/20746-domaci-fotovoltaika-s-bateriemi-dale-zlevnuje-a-stava-se-dostupnejsi-pro-stale-vice-zakazniku>
- [12] BYD B-Box Premium HVM 8.3 battery storage 8.28 kWh. *mg-solar eshop* [online]. Dostupné z: <https://www.mg-solar-shop.com/byd-b-box-premium-hvm-8.3-battery-storage-8.28-kwh>
- [13] Lithium battery BYD B-BOX 2.5. *Merkasol eshop* [online]. Dostupné z: <https://merkasol.com/Lithium-battery-BYD-B-BOX-25>
- [14] *Odporový ohřev, základní výpočty a materiály, el. odporové pece* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/elz/elz2.htm>
- [15] CALDA, M., M. SIMEK, P. HEJTMÁNEK, M. POKORNÝ, P. WOLF, P. HRZINA a L. POSPÍŠIL. *Zásady protipožárního zabezpečení střešních instalací FVE a opatření požární prevence*. Praha: Photon Energy Operations CZ s.r.o, 2016.

- [16] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 16/2016 Sb. Vyhláška o podmínkách připojení k elektrizační soustavě. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-16>
- [17] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 458/2000 Sb. Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). In: *Sbírka zákonů*. 2009. ISSN 1211-1244. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458>
- [18] ČEZ, a.s. [online]. *Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 4 Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy*. 2020. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds/pravidla-provozovani-distribucni-soustavy-2021>
- [19] NOVÁ ZELENÁ ÚSPORÁM. *Závazné pokyny pro žadatele a příjemce podpory z podprogramu Nová zelená úsporám – Rodinné domy* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.novazelenausporam.cz/dokumenty/>
- [20] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 408/2015 Sb. Vyhláška o Pravidlech trhu s elektřinou. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-408>
- [21] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 359/2020 Sb. Vyhláška o měření elektřiny. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-359>
- [22] HRZINA, Pavel. Laboratoř diagnostiky fotovoltaických systémů ČVUT v Praze. *Problém fázového měření – stručný průvodce*. Praha, 2020.
- [23] ČEZ. *Přehled distribučních sazeb elektřiny* [online]. [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/podpora/vsechny-clanky/prehled-distribucnich-sazeb-elektřiny-93426>
- [24] MICHEK, Martin a KOLEKTIV AUTORŮ. Úvod do liberalizované energetiky – Trh s elektřinou. Asociace energetických manažerů, 2. aktualizované vydání, Praha 2016. ISBN 978-80-260-9212-4. Dostupné také v PDF z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/kniha-trh-s-elektřinou.pdf>
- [25] OTE, a.s. [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/typove-diagramy-dodavek-elektřiny/normalizovane-tdd?date=2021-01-01>
- [26] TRUNKÁTOVÁ, Tereza. *Analýza návratnosti fotovoltaických systémů instalovaných v Evropské unii*. Praha, 2020. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Ladislava Černá, Ph.D.
- [27] PFLUGRADT, Noah Daniel. *Modellierung von Wasserund Energieverbräuchen in Haushalten*. Chemnitz, 2016. Dizertační práce. Technischen Universität Chemnitz.
- [28] MAZUR, Matěj. *Zátěžový profil ohřivačů teplé vody*. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Roman Vavříčka, Ph.D.
- [29] ČSÚ Spotřeba paliv a energií v domácnostech. [online]. 2017 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/prumerne-rocni-spotreby-a-penezni-vydani>
- [30] DOBOS, Aron P. *LK Scripting Language Reference* [online]. NREL, 2017. Dostupné také v PDF z: <https://sam.nrel.gov/lk-script.html>
- [31] SolarEdge. *Three Phase Inverter SE12.5K – SE27.6K* [online]. 2018 [cit. 2021-04-16]. Dostupné také v PDF z: <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-three-phase-inverter-extended-power-datasheet.pdf>
- [32] Holleis. *Holleis Lotus G2 Black 245 Wp* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné také v PDF z: https://www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/27825?utm_source=ENF&utm_medium=panel_profile&utm_campaign=enquiry_company_directory&utm_content=8746

- [33] PVGIS. *Typical meteorological year* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#TMY
- [34] FVE pro vlastní spotřebu o výkonu 4,5 kWp. *Solární Experti* [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.solarniexperti.cz/solarni-systemy/fotovoltaika/fotovoltaicka-elektrarna-fve-pro-vlastni-spotrebu-312-kwp/>
- [35] SOLAR controls s.r.o. *WATTROUTER ECO - UŽIVATELSKÁ PŘÍRUČKA* [online]. Plzeň, 2014. Dostupné také v PDF z: http://www.solar-elektro.cz/data/dokumenty/1869_wattroutereco_cz.pdf
- [36] SINHA, R., B. BAK-JENSEN a KOLEKTIV AUTORŮ. *Modelling of hot water storage tank for electric grid integration and demand response control* [online]. IEEE, 2017, 1-8. [cit. 2021-04-02]. DOI: 10.1109/UPEC.2017.8231964. ISBN 978-1-5386-2344-2. Dostupné také v PDF z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8231964>
- [37] POPELKA, Aleš. *Kogenerace s akumulací tepla*. Praha, 2014. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Jan Kyncl
- [38] ČEZ. *Přehled distribučních sazeb elektřiny* [online]. [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/podpora/vsechny-clanky/prehled-distribucnich-sazeb-elektriny-93426>
- [39] ŠTAMBERA, Vít. *Fotovoltaický systém jako lokální zdroj elektrické energie pro residenční bydlení*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Wolf, Ph.D.
- [40] VRÁNA, Jakub. *Potřeba vody a tepla pro přípravu teplé vody*. [online]. 2010 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/6950-obnovitelne-zdroje-energie-vyvoj-vykupnich-cen>
- [41] PŘEMĚŘENÍ. *Návrh proudové hodnoty jističe*. [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.premereni.cz/cs/dulezite-informace/kalkulacky-energie/jistic/navrh-proudove-hodnoty-jistic/>
- [42] PŘEDISTRIBUCE. *Stav HDO*. [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.predistribuce.cz/cs/potrebuji-zaridit/zakaznici/stav-hdo/>
- [43] ERÚ. *Cenový kalkulátor*. [online]. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <http://kalkulator.eru.cz/>
- [44] Solární elektrárna o výkonu 2,7 kWp na klíč. *Solární Experti* [online]. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.solarniexperti.cz/solarni-systemy/fotovoltaika/fotovoltaicka-elektrarna-fve-o-vykonu-26-kwp-na-klic>
- [45] Hybridní solární elektrárna 3,6 kWp s baterií. *Solární Experti* [online]. [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://www.solarniexperti.cz/solarni-systemy/fotovoltaika/hybridni-solarni-elektrarna-s-bateriemi-li-ion-354-kwp-na-klic/>
- [46] Návod k obsluze a instalaci: Zásobníkový ohříváč vody pro svislou montáž. *Dražice: Dokumenty ke stažení* [online]. 2021 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.dzd.cz/podpora/ke-stazeni>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Konstrukce fotovoltaického krystalického modulu	5
Obrázek 2: Konstrukce zásobníku teplé vody	8
Obrázek 3: Fázové měření elektrické energie	13
Obrázek 4: Střecha budovy UCEEB	22
Obrázek 5: Schéma systému s akumulací přebytků do zásobníku teplé vody	24
Obrázek 6: Vývojový diagram pro simulaci v Makru A s ukládáním přebytků do zásobníku TV	28
Obrázek 7: Uživatelské rozhraní generátoru povelů HDO v programu MS Excel	30
Obrázek 8: Tvorba povelů HDO pro celý rok.....	31
Obrázek 9: Vývojový diagram pro simulaci v Makru A s ukládáním přebytků do vody a funkcí HDO	31
Obrázek 10: Příklad grafického zpracování výsledků Makra A	34
Obrázek 11: Sledované parametry simulace	35
Obrázek 12: Vybrané výsledky Makra A v prostředí SAM.....	36
Obrázek 13: Vývojový diagram Makra B pro tvorbu odběrového profilu zahrnujícího ohřev vody....	38
Obrázek 14: Procesní diagram pro práci s modelem s ukládáním přebytků do baterie	39
Obrázek 15: Vybrané výsledky Makra A pro variantu 0 s funkcí HDO	42
Obrázek 16: Vybrané výsledky Makra A pro variantu 0 bez funkce HDO	42
Obrázek 17: Vybrané výsledky Makra A pro variantu 1	45
Obrázek 18: Vybrané výsledky Makra B pro variantu 2.....	47
Obrázek 19: Grafické zpracování vybraných výsledků pro variantu 2	48
Obrázek 20: Vybrané výsledky Makra A pro variantu 3	50

Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozdělení distribučních sazeb dle charakteru odběru	11
Tabulka 2: Odběrové profily a jejich význam dle [28].....	18
Tabulka 3: Spínání topných těles pro ohřev vody	28
Tabulka 4: Zadávané parametry Makra A	33
Tabulka 5: Společné parametry simulace v programu SAM a FVE.....	35
Tabulka 6: Vybrané výsledky simulace v aplikaci FVE	36
Tabulka 7: Společné parametry porovnávaných variant	41
Tabulka 8: Výpočet ročních nákladů na odběr elektrické energie ve variantě 0 s funkcí HDO.....	42
Tabulka 9: Výpočet ročních nákladů na odběr elektrické energie ve variantě 0 bez HDO.....	43
Tabulka 10: Nabídka fotovoltaického systému od společnosti Solární Experti s.r.o.	44
Tabulka 11: Výpočet ročních nákladů na odběr elektrické energie ve variantě 1	45
Tabulka 12: Vstupní údaje pro výpočet kritéria NPV ve variantě 1.....	46
Tabulka 13: Výsledky ekonomických kritérií pro variantu 1	46
Tabulka 14: Nabídka fotovoltaického systému s baterií od společnosti Solární Experti s.r.o.....	47
Tabulka 15: Vstupní údaje pro výpočet kritéria NPV ve variantě 2.....	49
Tabulka 16: Výsledky ekonomických kritérií pro variantu 2.....	49
Tabulka 17: Vstupní údaje pro výpočet kritéria NPV ve variantě 3.....	51
Tabulka 18: Výsledky ekonomických kritérií pro variantu 3	51
Tabulka 19: Souhrn ekonomický výsledků pro jednotlivé varianty	52

Seznam grafů

Graf 1: Roční odběrový profil elektrické energie pro rodinný dům se sazbou D02d.....	15
Graf 2: Roční odběrový profil elektrické energie získaný pomocí normalizovaného TDD č.4	16
Graf 3: Porovnání týdenních profilů - reálná data a TDD č.4 pro roční spotřebu 2 040 kWh	16
Graf 4: Odběrový profil teplé vody.	18
Graf 5: Porovnání denních odběrových profilů teplé vody.	19
Graf 6: Porovnání výroby FVE na střeše UCEEB s výsledky simulace	23
Graf 7: Relativní odchylka výsledků simulace od skutečné produkce systému	24
Graf 8: Průběh teploty vody v zásobníku při procesech ohřevu a ochlazování.....	27
Graf 9: Průběhy vypočtených hodnot	29
Graf 10: Průběhy vypočtených hodnot včetně řízení HDO	32
Graf 11: Energetická bilance - aplikace FVE.....	36
Graf 12: Průměrná teplota vody v zásobníku - aplikace FVE.....	36
Graf 13: Průměrná hodnota úrovně nabití baterie v jednotlivých měsících	48

Seznam příloh

Tištěné přílohy:

1. Parametry zásobníkových ohřivačů pro svislou montáž – viz příloha A
2. Příklad číselných výsledků generovaných Makrem A – viz příloha B
3. Výpočet kritéria NPV pro jednotlivé varianty – viz příloha C
4. Odběr elektrické energie z distribuční sítě pro variantu 2 – viz příloha D

Elektronické přílohy:

Elektronické přílohy jsou uvedeny v souborovém formátu .zip, který si lze u této práce stáhnout na webové adrese ČVUT DSpace.

1. Makro A – viz příloha *Makro A - Instalace FVE s akumulací prebytku do vody.lk*
2. Obrázek pro uživatelské rozhraní Makra A – viz příloha *Makro_A_ilustrace.jpg*
3. Makro B – viz příloha *Makro B - Tvorba odberového profilu EE zahrnující ohrev teple vody.lk*
4. Generátor povelů HDO – viz příloha *generator_povelu_HDO.xlsm*
5. Soubor s povelů HDO nahrávaný programem SAM a modifikovatelný generátorem povelů HDO – viz příloha *HDO_povely.csv*
6. Příklad odběrového profilu EE – viz příloha *spotřeba.csv*
7. Příklad křivky odběrového profilu TV – viz příloha *krivka_odberovy_profil_TV.csv*
8. Tabulka s výpočtem kritéria NPV – viz příloha *Ekonomicke_zhodnoceni.xlsx*
9. Návod pro spuštění simulací – viz příloha *Návod.pdf*

Příloha A: Parametry zásobníkových ohřivačů vody pro svislou montáž

TYP		OKCE 50	OKCE 80 OKHE 80	OKCE 100 OKHE 100	OKCE 125 OKHE 125	OKCE 160 OKHE 160	OKCE 200
OBJEM	l	49	75	97 100	122 121	149 153	199
MAX. PROVOZNÍ PŘETLAK V NÁDOBĚ	bar	6					
ELEKTRICKÉ PŘIPOJENÍ		1/N/PE ~ 230V/50 Hz					
DOPORUČENÝ JISTIČ		16 A					
PŘÍKON	W	2200					
EL. KRYTÍ		IP 44					
MAX. PROVOZNÍ TEPLOTA V NÁDOBĚ	°C	80					
DOPORUČENÁ TEPLOTA TV	°C	60					
VÝŠKA OHŘÍVAČE	mm	585	757 740	902 885	1067 1050	1255 1235	1300
PRŮMĚR OHŘÍVAČE (jen OKCE)	mm	524	524	524	524	524	584
ROZMĚR OHŘÍVAČE šířka x hloubka (jen OKHE)	mm	520x550					
MAX. HMOTNOST OHŘÍVAČE BEZ VODY	kg	28	32 34	39 38	43 45	49 51	66
DOBA OHŘEVU EL. EN. Z 10 °C NA 60 °C	hod	1,3	2,0	2,6	3,2	3,9 4,0	5,3
SMÍŠENÁ VODA V40	l	80,84	138,70 124,83	165,41 151,66	231,10 180,40	242,83 219,82	331,26
ZÁTĚŽOVÝ PROFIL		M	M	M	M	L	XL
TŘÍDA ENERGETICKÉ ÚČINNOSTI		C	C	C	C	C	C
ENERGETICKÁ ÚČINNOST	%	38	38 37	38 37	36 38	39 38	38
ROČNÍ SPOTŘEBA EL.ENERGIE	kWh	1365	1342 1391	1362 1395	1409 1353	2622 2715	4403

Zdroj: [46]

Příloha B: Příklad číselných výsledků generovaných Makrem A

(soubor *vysledky.csv*)

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Suma
FVE výroba [kWh]	61.0	80.8	265.6	285.3	390.7	312.6	349.2	311.3	247.3	190.3	95.0	58.3	2647.5
DS odběr celkem [kWh]	486.4	408.1	325.6	320.4	266.8	184.5	234.8	259.6	331.0	387.4	421.8	531.6	4158.0
Odběr v NT [kWh]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Odběr ve VT [kWh]	486.4	408.1	325.6	320.4	266.8	184.5	234.8	259.6	331.0	387.4	421.8	531.6	4158.0
Energie ohřev TV celkem [kWh]	360.8	325.0	372.3	379.2	426.0	233.6	380.0	359.8	368.3	378.6	337.8	366.8	4288.3
Energie ohřev TV z DS [kWh]	333.6	287.4	209.6	216.0	190.4	116.6	162.7	178.9	225.6	272.4	287.9	348.2	2829.2
Energie ohřev TV z FVE [kWh]	27.3	37.6	162.8	163.3	235.5	117.0	217.3	180.9	142.7	106.2	49.9	18.5	1459.1
FVE využito celkem [kWh]	54.2	68.8	229.4	229.8	316.6	187.9	300.7	259.9	216.1	165.9	87.0	54.1	2170.4
Přebytky do DS [kWh]	6.8	11.9	36.2	55.6	74.2	124.7	48.5	51.4	31.2	24.4	8.0	4.2	477.1
Průměrná teplota vody [°C]	55.5	55.9	59.3	59.9	61.3	67.1	61.1	62.1	58.2	57.8	55.9	55.3	59.1

Pozn.: Barva, ohraničení tabulky a diakritika byla doplněna ruční editací vygenerovaného CSV souboru.

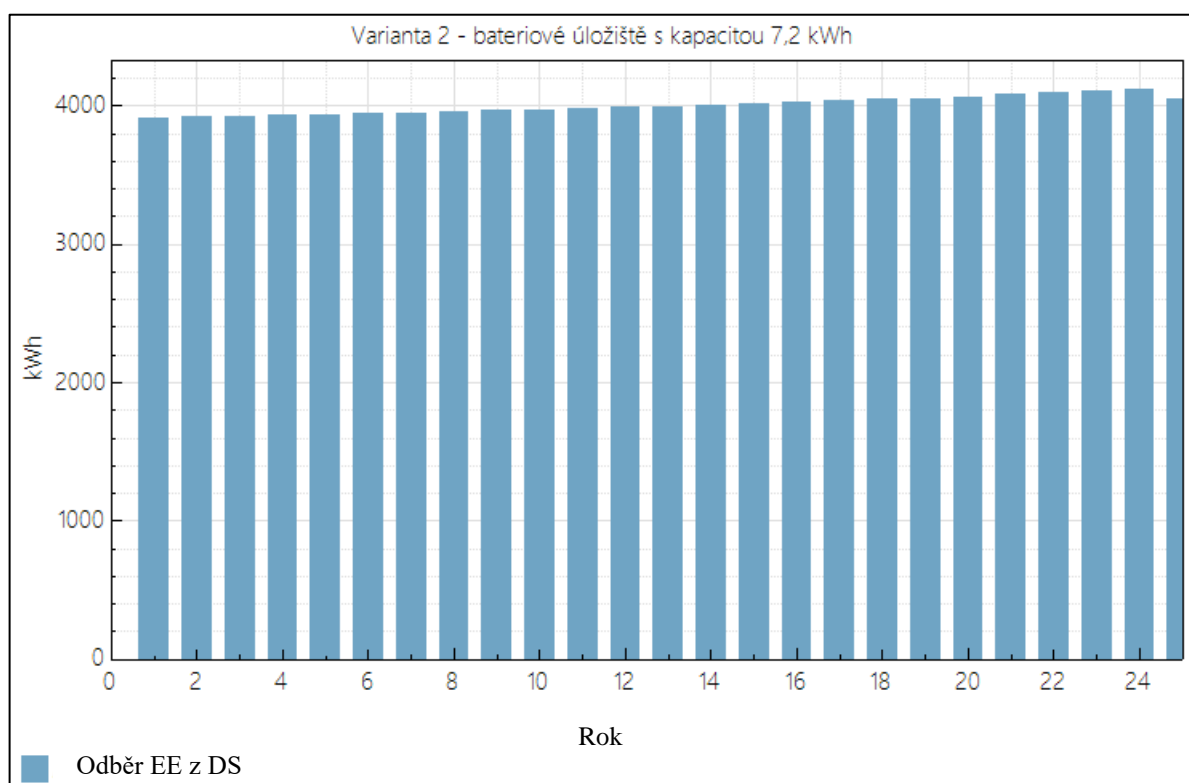
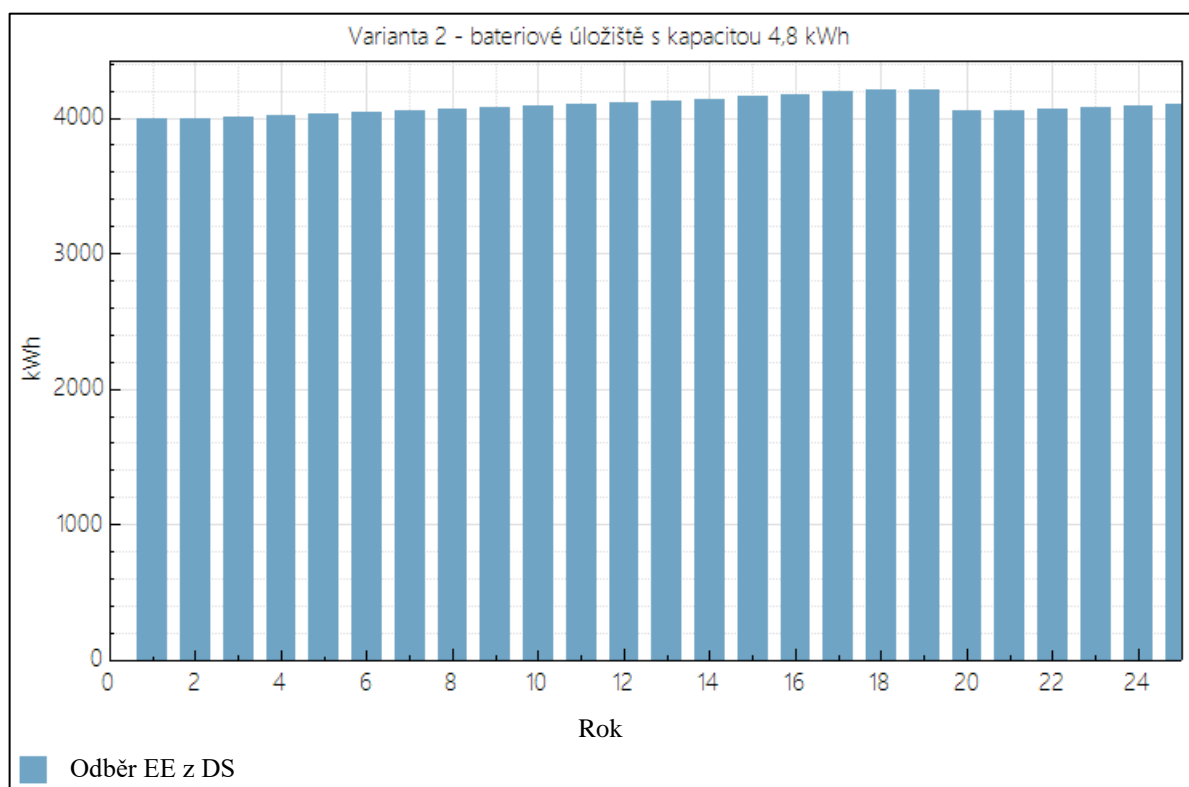
Příloha C: Výpočet kritéria NPV pro jednotlivé varianty

Varianta 1																						
Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Investiční náklady	Kč	-79089																				
Výměna střídače	Kč											-17000										
Náklady na provoz	Kč	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Platba za EE varianta 0	Kč	30473	31387	32328	33298	34297	35326	36386	37477	38602	39760	40953	42181	43447	44750	46093	47475	48900	50367	51878	53434	55044
Platba za EE varianta 1	Kč	20625	21243	21881	22537	23213	23910	24627	25366	26127	26910	27718	28549	29406	30288	31197	32133	33096	34089	35112	36165	37244
Úspora za EE proti variantě 0	Kč	9848	10143	10448	10761	11084	11416	11759	12112	12475	12849	13235	13632	14041	14462	14896	15343	15803	16277	16765	17268	17788
CF	Kč	-79089	8348	8643	8948	9261	9584	9916	10259	10612	10975	11349	11732	12132	12541	12962	13396	13843	14303	14777	15265	15768
DCF	Kč	-79089	8184	8308	8432	8556	8680	8806	8931	9057	9183	9310	9435	9566	9694	9824	9953	10084	10215	10346	10479	10612
NPV	Kč	94 897 Kč																				

Varianta 2																						
Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Investiční náklady	Kč	-135 000																				
Výměna střídače	Kč											-38800										
Náklady na provoz	Kč	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Odběr EE z DS	kWh	3991	3999	4009	4018	4028	4039	4050	4062	4074	4087	4100	4113	4127	4142	4157	4173	4190	4206	4208	4049	4049
Platba za EE varianta 0	Kč	30473	31387	32328	33298	34297	35326	36386	37477	38602	39760	40953	42181	43447	44750	46093	47475	48900	50367	51878	53434	55044
Platba za EE varianta 2	Kč	20916	21587	22290	23010	23760	24539	25344	26182	27047	27948	28878	29838	30838	31878	32954	34073	35238	36434	37545	38670	39810
Úspora za EE proti variantě 0	Kč	9556	9800	10038	10288	10537	10787	11041	11295	11555	11812	12075	12343	12609	12872	13139	13402	13661	13933	14333	14724	15112
CF	Kč	-135 000	8056	8300	8538	8788	9037	9287	9541	9795	10055	10312	10568	10825	11083	11342	11602	11861	12121	12381	12641	12901
DCF	Kč	-135 000	7898	7977	8046	8119	8185	8246	8306	8360	8413	8460	8500	8537	8572	8608	8648	8670	8685	8705	8809	9009
NPV	Kč	3 492 Kč																				

Varianta 3																						
Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Investiční náklady	Kč	-62 000																				
Výměna střídače	Kč											-9886										
Náklady na provoz	Kč	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Platba za EE varianta 0	Kč	30473	31387	32328	33298	34297	35326	36386	37477	38602	39760	40953	42181	43447	44750	46093	47475	48900	50367	51878	53434	55044
Poplatky Yello Férová baterie	Kč	0	0	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Uloženo ve virtuální baterii	kWh	333	326.47	319.95	313.44	306.96	300.49	294.03	287.6	281.18	274.77	268.38	262.01	255.65	249.31	242.98	236.67	230.38	224.1	217.84	211.59	205.34
Úspora díky virtuální baterii	Kč	668	674.53	680.9	687.07	693.04	698.78	704.29	709.54	714.5	719.17	723.52	727.53	731.18	734.43	737.27	739.67	741.59	743.03	743.93	744.27	744.54
Platba za EE varianta 3	Kč	21254	21892	22549	23225	23922	24640	25379	26140	26924	27732	28564	29421	30304	31213	32149	33114	34107	35130	36184	37270	38384
Platba za EE varianta 3 (vč. úspory a poplatků za virtuální baterii)	Kč	20586	21217	24268	24938	25629	26341	27074	27831	28610	29413	30241	31093	31972	32878	33812	34774	35765	36787	37840	38925	40044
Úspora za EE proti variantě 0	Kč	9886	10169	8061	8360	8668	8985	9311	9647	9992	10347	10712	11088	11474	11872	12281	12701	13134	13579	14037	14509	15000
CF	Kč	-62 000	8386	8669	6561	6860	7168	7485	7811	8147	8492	8847	9192	9538	9884	10230	10577	10924	11271	11618	11965	12312
DCF	Kč	-62 000	8222	8333	6182	6338	6493	6647	6800	6953	7106	7258	7410	7560	7710	7861	8010	8160	8309	8458	8606	8754
NPV	Kč	81 216 Kč																				

Příloha D: Odběr elektrické energie z distribuční sítě pro variantu 2



Pozn.: Uvedené grafy jsou výstupem modelu PV-Battery, Residential v prostředí SAM. Popisky byly upraveny.