

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne

.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat v první řadě vedoucímu práce Ing. Pavlu Baldovi, Ph.D., za jeho náměty, trpělivost a cenné rady, díky kterým se má práce ubírala vždy správným směrem. Zvláštní poděkování pak patří mým rodičům za podporu a pomoc během studia.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem řízením toku elektrické energie v domácnosti s elektromobilem. Současně probíhá i odvození stavového modelu systému a vytvoření modelu v programu Matlab-Simulink. Ten je následně využíván k testování navrženého řízení. Řízení systému využívá predikci osvitů založenou na předpovědi počasí a predikci odběru domácnosti. Návrhový proces probíhá ve třech fázích a to nejprve kompletní realizací v programu Simulink, následným přenesením řídicí části do programu REXYGEN a nakonec oddělením a provozováním řídicí části na samostatném mikropočítači Raspberry PI s nadstavbou Monarco HAT připraveném k využití v praxi.

Klíčová slova: návrh řízení, predikce, matematický model, elektromobil v síti, fotovoltaická elektrárna, simulace, optimalizace nákladů, bateriové úložiště, chytrá domácnost

Abstract

This master thesis deals with the design of electric power flow in a household with an electric car. At the same time the state space model of the system is derived and the model in the Matlab-Simulink is created. This model is later used for control system testing. Control system uses exposure prediction based on weather forecast and household consumption prediction. There are three phases in a design process. First, whole model is created in the Simulink. Then control part of the system is moved to the REXYGEN. In the last step control part is separated and operated on a Raspberry PI microcomputer with Monarco HAT. This configuration is ready to use with real components.

Keywords: control design, prediction, mathematical model, vehicle to grid, photovoltaic power plant, simulation, cost optimization, battery storage, smart home

Seznam symbolů a zkratek

DC	Direct Current
MPPT	Maximum Power Point Tracking
on-grid	Provoz s režimem v síti
off-grid	Provoz s ostrovním režimem
SOC	State of charge
MPC	Model Predictive Control
JSON	JavaScript Object Notation
XML	eXtensible Markup Language
MBD	Model-Based Design
HIL	Hardware In the Loop
MIQP	Mixed Integer Quadratic Programming

Obsah

1 Úvod.....	9
2 Uvažovaná struktura mikrosítě.....	11
2.1 Požadavky na provoz.....	11
2.2 Navržené zapojení mikrosítě.....	12
2.2.1 Mikrosítě bez připojeného elektromobilu.....	15
2.3 Komponenty a části mikrosítě.....	16
2.3.1 Domácnost.....	16
2.3.2 Elektromobil.....	17
2.3.3 Stacionární baterie v domácnosti.....	18
2.3.4 Fotovoltaické panely.....	18
2.3.5 DC-DC měnič s funkcí MPPT.....	19
2.3.6 DC-AC měnič napětí.....	20
2.3.7 Elektrická síť.....	20
2.3.8 Ostatní komponenty.....	20
2.3.9 Řídicí mikropočítač Raspberry Pi s hardwarovou nadstavbou Monarco HAT.....	21
3 Model mikrosítě.....	22
3.1 Odvození modelu.....	22
3.2 Simulace modelu.....	25
3.2.1 Simulace modelu i řízení v programu Simulink.....	25
3.2.2 Simulace s řídicím systémem v programu REXYGEN spuštěným na stejném PC.....	26
3.2.3 Simulace za pomoci Raspberry Pi s nadstavbou Monarco HAT.....	27
4 Návrh a implementace řídicích algoritmů.....	28
4.1 Predikce osvitů a spotřeby.....	28
4.1.1 Predikce osvitů.....	28
4.1.2 Predikce denní spotřeby domácnosti.....	29
4.2 Heuristické řízení s predikcí.....	30
4.3 Prediktivní řízení.....	31

5 Experimentální ověření a prezentace výsledků simulací.....	35
5.1 Odjezd i příjezd elektromobilu v průběhu dne.....	35
5.1.1 Návrh velikosti stacionární baterie a výkonů fotovoltaických panelů.....	35
5.1.2 Test navržené kombinace mimo ideální podmínky.....	45
5.1.3 Výsledné chování navržené kombinace.....	48
5.2 Elektromobil po celý den v mikrosíti.....	50
5.3 Dlouhodobá absence elektromobilu.....	52
5.4 Systém baterie a elektrárny bez řízení.....	54
5.5 Vyhodnocení simulace, vyčíslení úspory.....	56
6 Závěr.....	60

1 Úvod

S dlouhodobě expandujícím oborem automatizace vyvstávají otázky, jak optimalizovat náklady každodenních procesů. V mnoha domácnostech a firmách dochází, i díky podpoře státu a Evropské unie, k realizaci udržitelných nízkouhlíkových technologií. Do takové skupiny spadá například nákup elektromobilů, dobíjecích stanic nebo výstavba fotovoltaických elektráren a bateriových úložišť. Pokud tedy vznikne odběrové místo elektrické energie, u kterého je navíc provozována fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm a elektromobilem, nabízí se možnost inteligentního řízení kooperace jednotlivých zařízení.

V rámci mé spolupráce se značkou elBlesk elektromobily je tato diplomová práce zaměřena na návrh optimálního zapojení zmiňovaných komponent a následné navržení řídicí strategie toku elektrické energie tak, aby náklady na realizaci zapojení byly minimalizovány a provoz vzniklé mikrosítě vedl ke snížení průměrné ceny spotřebované elektrické energie.

Navržený algoritmus využívá při rozhodování predikce počasí a předpokládané spotřeby domácnosti. Na základě získaných informací a aktuálního stavu systému rozhoduje o budoucím nastavení přepínačů, kterými je volen nejen zdroj napájení domácnosti, ale i řízení nabíjení akumulátorů. Volbou času a způsobu nabíjení se mění cena nakoupené energie. Algoritmus počítá s cenou za nákup elektrické energie ve vysokém i nízkém tarifu a zároveň uvažuje bezplatnou energii vyrobenou fotovoltaickými panely.

První část práce je zaměřena na strukturu mikrosítě a návrh vhodného zapojení. Dochází zde taktéž k detailnímu popisu funkce struktury a k uvedení požadavků na vznikající zapojení. Jednotlivé podkapitoly pak popisují hlavní využití komponenty a jejich specifiky.

V další části jsou určeny požadované vstupy a výstupy na jejichž základě jsem odvodil stavový model systému. Získaný model byl přenesen do prostředí programu Matlab-Simulink, kde bude z počátku probíhat simulace řízení i fyzického modelu. Simulace a testování probíhá ve smyslu „model-based design“ (MBD) ve třech krocích a to nejprve kompletním provedením v programu Simulink, dále s odděleným řízením

vytvořeným v programu REXYGEN a provozovaným na totožném PC a nakonec se vzdáleným síťovým řízením pomocí mikropočítače Raspberry Pi s nadstavbou Monarco HAT ve smyslu HIL (Hardware In the Loop) testování.

Předposlední část přibližuje mnou vyvinutý řídicí algoritmus. Popsána je taktéž využívaná predikce osvitu fotovoltaických panelů založená na předpovědi počasí získané ze stránky openweathermap.cz a predikce denní spotřeby založená na statistice o odběru elektrické energie v domácnosti.

V závěrečné kapitole je navržena za pomoci vytvořeného modelu velikost stacionární baterie a výkon fotovoltaické elektrárny ze znalosti spotřeby domácnosti. Výsledky simulačních experimentů taktéž detailně popisují vliv špatné predikce počasí a odběru. Simulace proběhla i pro neřízený systém solární elektrárny a bateriového úložiště. Poslední část této kapitoly se zaměřuje na ekonomickou stránku při nasazení vytvořeného řízení na stávající neřízený systém. V uvedené úvaze bylo vypočteno, že aplikací vytvořeného řízení na systém se stanovenou konfigurací lze ročně ušetřit více než 12 000 Kč pouze řízeným nabíjením v době nízkého tarifu a využíváním této energie v době vysokého tarifu. Další velkou úsporou je pak optimalizace času nabíjení založená na predikci osvitu, díky které lze lépe využít potenciál fotovoltaické elektrárny a tím nejen snížit náklady na energie, ale i zvýšit úroveň využívání ekologické energie z obnovitelného zdroje.

2 Uvažovaná struktura mikrosítě

Při návrhu mikrosítě je uvažováno několik zdrojů elektrické energie. Hlavním zdrojem zůstává elektrická síť střídavého napětí. Jako vedlejší zdroj lze určit fotovoltaickou elektrárnu se stejnosměrným výstupním napětím. Aby došlo k využití největšího možného výkonu elektrárny, je nutné zapojit také speciální DC - DC měnič s funkcionalitou sledování bodu nejvyššího výkonu, takzvaného MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) [1]. Následně jsou využita bateriová úložiště v různé formě sloužící dle aktuálního určení jako zdroj nebo spotřebič. První z nich je elektromobil, který umožňuje odběr i dodání elektrické energie do vnitřní baterie. Výstupní napětí baterie elektromobilu je stejnosměrné, vstup/nabíjení baterie je uvažováno jak ve formě přivedení stejnosměrného napětí, tak i připojením napětí střídavého za pomoci nabíječky. Na stejném principu funguje i stacionární baterie, která může být uložena v domácnosti. Výstupní napětí bude stejnosměrné a vstupní/nabíjecí taktéž stejnosměrné, popř. za pomoci nabíječky střídavé. Protože hlavním spotřebičem je domácnost napájená standardně střídavým napětím, je nutné přidat do obvodu taktéž střídač zajišťující možnost využití baterií pro provoz domácnosti.

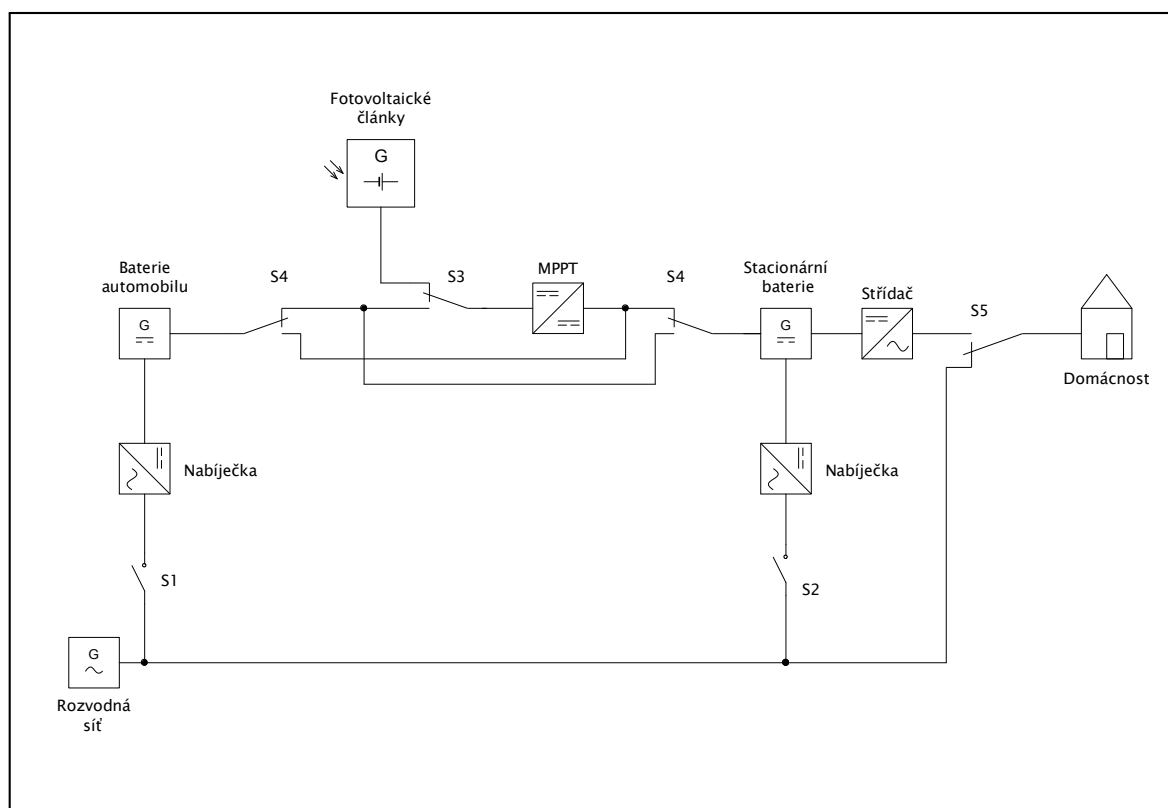
2.1 Požadavky na provoz

Při návrhu byly stanoveny tyto základní podmínky:

1. Zapojení musí splňovat veškerá opatření a předpoklady pro bezpečnost uživatele.
2. Uživatel nesmí být v případě běžného provozu omezen v používání el.energie.
3. V případě poruchy řízení nesmí dojít k přerušení dodávky el.energie do domácnosti.
4. Zapojení předpokládá maximální využití energie z fotovoltaické elektrárny.
5. Přetoky elektrické energie z elektrárny do elektrické sítě nejsou povoleny.
6. Ovládání musí být uživatelsky jednoduché a srozumitelné.
7. Vstupní náklady musí být minimalizovány.

2.2 Navržené zapojení mikrosítě

Na obrázku 1 lze vidět navrženou strukturu mikrosítě. V zapojení jsou využity dva stykače s jednoduchými spínacími kontakty (S1 a S2), dva stykače s jedním spínacím a jedním rozpínacím kontaktem (S3 a S5) a jeden stykač s dvěma spínacími a dvěma rozpínacími kontakty (S4). Zapojením stykače S5 je docíleno dodržení podmínky číslo 3. V případě, že zkolabuje vložená řídicí smyčka mikrosítě, je díky zapojení rozvodné sítě do domácnosti přes rozpínací kontakty stále zachována dodávka elektrické energie. Ze stejného důvodu zůstane taktéž připojena fotovoltaická elektrárna na stacionární baterii, čímž není přerušeno nabíjení a je tak naplněna podmínka číslo 4. Tato stacionární baterie se v navrženém obvodu nachází z důvodu maximálního využití vyrobené energie. Zapojení by bylo možné i bez této baterie, avšak za předpokladu nulového přetoku zpět do sítě by takové zapojení bylo velmi neefektivní a tím by nebyla naplněna podmínka číslo 4.



Obrázek 1: Navržené zapojení mikrosítě

Popis funkce stykačů:

S1 / S2 – Sepnutí nabíjení baterie automobilu / stacionární baterie

S3 – Slouží k možnosti využití měniče s MPPT k vzájemnému nabíjení baterií

S4 – Určuje směr nabíjení:

VYP = elektrárna popř. auto → stacionární baterie

ZAP = elektrárna popř. stacionární baterie → auto

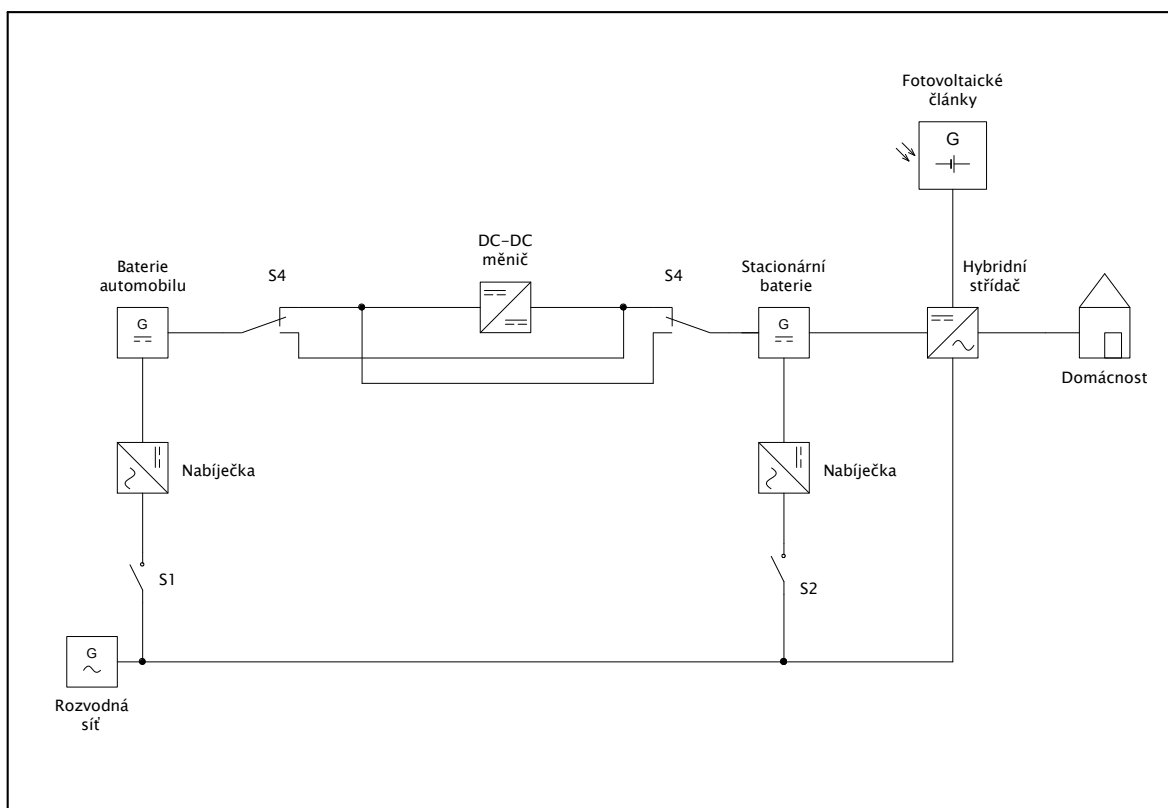
S5 – Přepíná napájení domácnosti ze sítě / ze stacionární baterie

V případě navrženého zapojení lze provozovat domácnost čistě ze stacionární baterie v takzvaném ostrovním režimu (taktéž off-grid). Tato technologie, umožňující pokrývat spotřebu čistě z energie vyrobené fotovoltaickými články, se povětšinou využívá v místech, kde není možné se připojit na elektrickou síť [2]. To však není tento případ. Nespornou výhodou je ale vzniklá nezávislost na elektrické síti, která přináší možnost provozu domácnosti i v případech, kdy je dodávka elektrické energie přerušena. Pro konečného uživatele se tak zvedá komfort ať už v rámci nepřerušeno přístupu k energii, tak i v možnosti dobití elektromobilu.

Klasický střídač	Hybridní střídač
+	+
Dlouhodobě ověřené	Jedno zařízení s funkcí střídače i měniče s MPPT
Velké množství různých provedení	Programovatelný pro maximální účinnost celku a úsporu
-	-
Nutnost využití samostatného střídače + samostatného měniče s MPPT	Omezené možnosti konfigurace v porovnání se samostatným střídačem a měničem s MPPT
Pro maximální účinnost nutné samostatné řízení	Obecně méně účinný než samostatný střídač a měnič s MPPT

Tabulka 1: Porovnání funkcí střídačů [3]

Namísto stykače S5 a klasického střídače převádějícího stejnosměrné napětí na střídavé byl také uvažován takzvaný hybridní střídač (obrázek 2). Takový střídač pak může pracovat jak v ostrovním režimu (off-grid), tak v režimu se sítí (on-grid). V některých případech lze navíc využívat kombinaci zmíněných přístupů a tím určovat poměr odběru elektrické energie ze sítě, z panelů a z baterií [3]. Výše uvedená tabulka 1 shrnuje výhody a nevýhody obou střídačů v případě běžného užití fotovoltaických článků s bateriovým úložištěm.

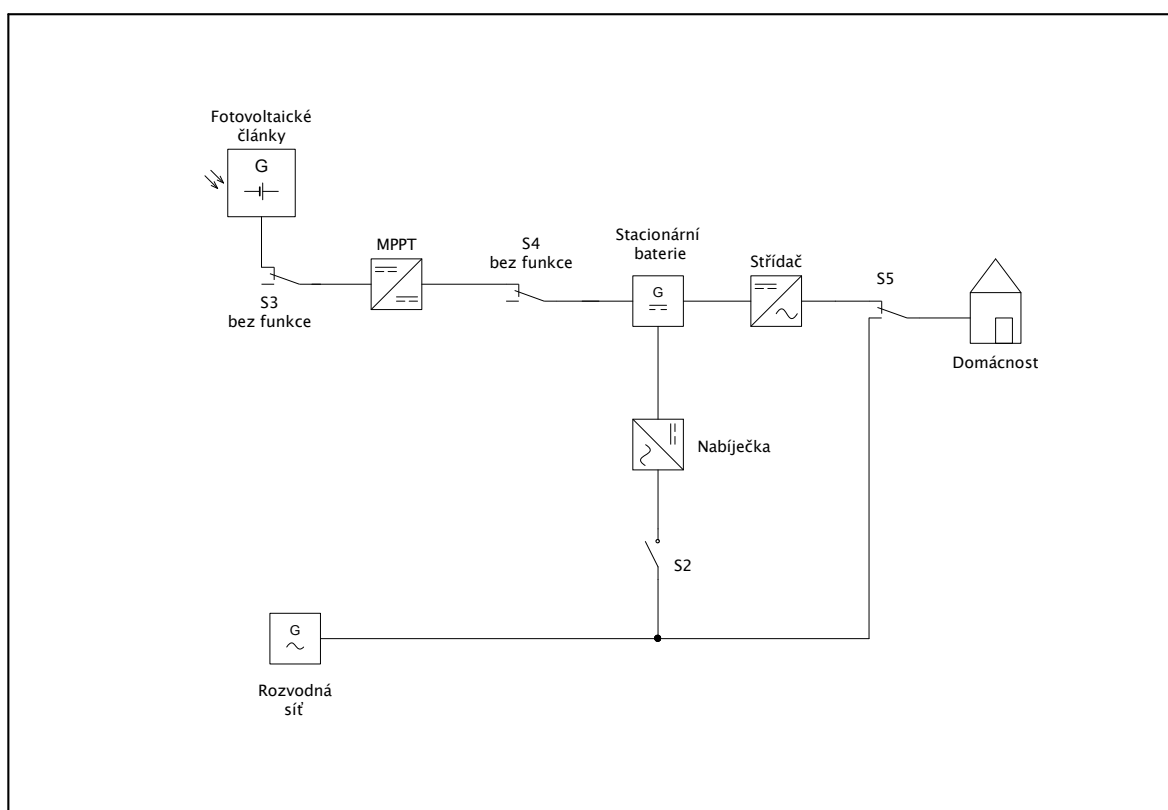


Obrázek 2: Uvažované zapojení s hybridním měničem

V navrženém případě je však pro účely řízení toku elektrické energie v domácnosti se stanovenými podmínkami vhodnější využít klasického střídače a samostatného měniče s MPPT. To umožní využívat měnič s MPPT v případě, kdy budou nabíjeny baterie mezi sebou nebo pomocí stykačů určit, která baterie bude nabíjena z elektrárny. Využitím separovaných zařízení i přes potřebu dvou dodatečných stykačů (S3 a S5 v obrázku 1) ušetříme náklady na pořízení dražšího hybridního střídače (porovnání cen [4,5]). Při konfiguraci s hybridním střídačem by dále vyvstal problém v podobě dvou baterií, z nichž jedna (automobil) není v obvodu zapojena trvale.

2.2.1 Mikrosít' bez připojeného elektromobilu

Speciální případ zapojení mikrosítě nastane v době nepřítomnosti elektromobilu (Obrázek 3). V takové chvíli se výrazně zredukuje možnost řízení. Stykače S1, S3 a S4 musí zůstat v rozepnuté poloze. Řídicí algoritmus tak může využívat pouze stykač nabíjení stacionární baterie S2 a stykač určující napájení domácnosti S5. I v takovém případě však zůstává možnost na základě predikce osvitů panelů a spotřeby domácnosti značně snížit náklady na energie. Může se tak stát například vhodným načasování nabití stacionární baterie.

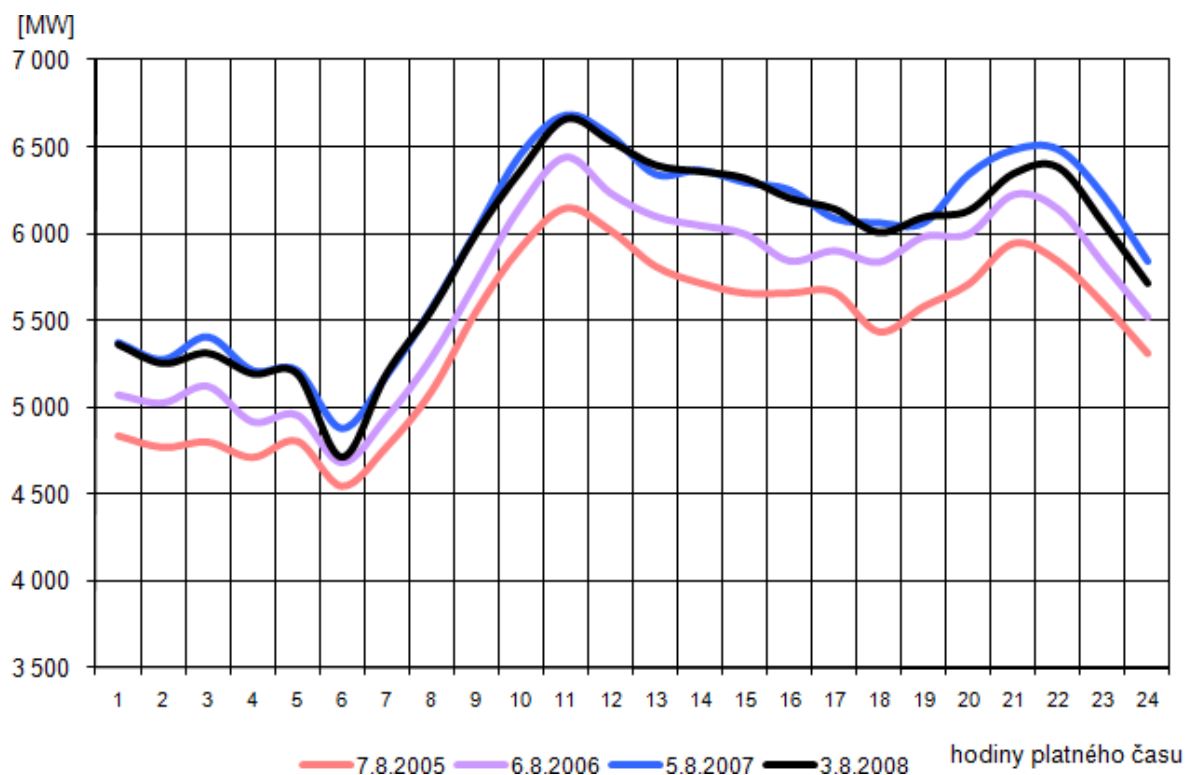


Obrázek 3: Mikrosít' v případě nepřítomnosti elektromobilu

2.3 Komponenty a části mikrosítě

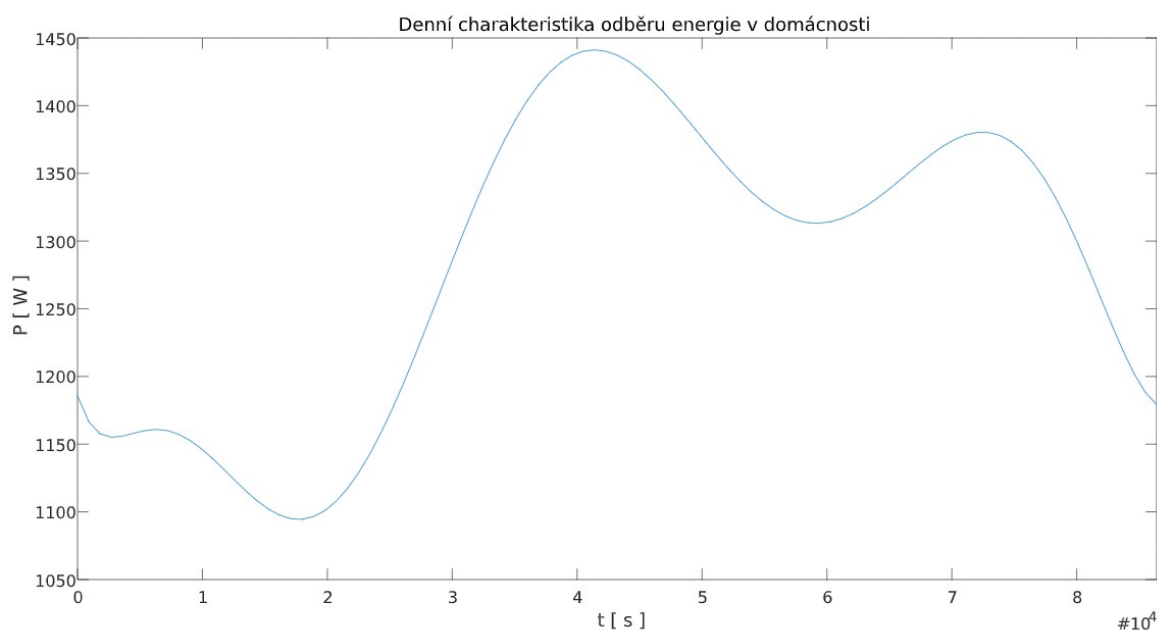
2.3.1 Domácnost

Hlavní uvažovanou komponentou je domácnost spotřebovávající elektrickou energii. Jako priorita zůstává i přes zapojení do mikrosítě nepřerušovaná dodávka energie, jejíž nákupní cenu je snaha minimalizovat. V této diplomové práci se počítá s rodinným domem, jehož odběr je značně vyšší než v bytové jednotce, a proto má minimalizace nákladů větší dopady. Navržený řídicí algoritmus a model sítě využívá predikce spotřeby takové domácnosti a z tohoto důvodu dochází až už před nasazením řízení, nebo v průběhu k zaznamenání dat o běžné denní spotřebě. Na základě znalosti běžné denní/týdenní odběrové charakteristiky následně dochází k ovlivnění požadovaného stavu nabití baterií. Při výpočtech a modelování byl využit tvar odběrové charakteristiky odvozený z obrázku 4.



Obrázek 4: Porovnání celorepublikové odběrové charakteristiky za 24 hodin [6]

Na obrázku 4 se jedná o celorepublikovou denní odběrovou charakteristiku. Pro vytvořený model byla tato křivka aproximována a přizpůsobena odběru jedné domácnosti. Obrázek 5 pak zobrazuje příklad křivky využívané pro modelování odběru energie v mikrosíti. Vyobrazené křivce odpovídá průměrný odběr 1280 W, což v denním součtu znamená spotřebu domácnosti 30.72 kWh.



Obrázek 5: Příklad uvažovaného denního odběru pro simulaci

2.3.2 Elektromobil

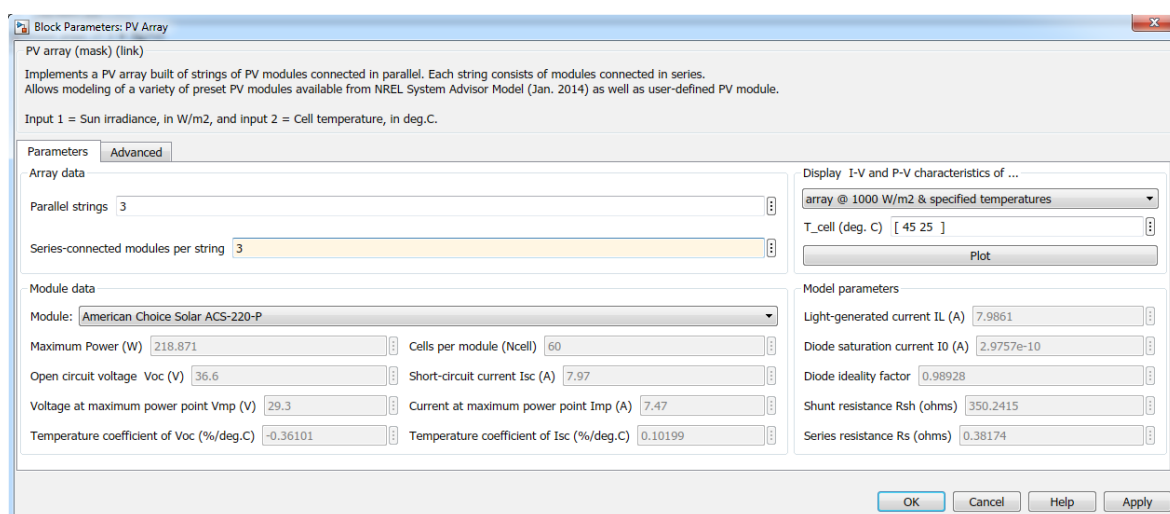
Vzhledem ke spolupráci se značkou elBlesk byl pro modelování vybrán dvoumístný elektromobil CITY S. Tento model se v základní verzi nabízí s baterií o kapacitě 100 Ah, kdy nominální napětí baterií je 72 V [7]. Jako komponenta ve vytvořené mikrosíti může elektromobil působit v roli zdroje energie i spotřebiče. V řídicím algoritmu pak vzhledem k proměnné využitelnosti baterie výrazně ovlivňuje zvolenou řídicí strategii. Tu má v tomto případě možnost přímo ovlivnit i uživatel, který při zapojení elektromobilu do nabíjecí stanice může určit očekávaný odjezd auta a požadovanou míru nabití.

2.3.3 Stacionární baterie v domácnosti

Hlavním úložištěm energie je v navrženém zapojení stacionární baterie. Vzhledem k navržené mikrosíti a požadavku na minimalizaci nákladů bude toto úložiště provozováno se stejným nominálním napětím baterií a to 72 V. Kapacita baterií se bude v průběhu testování jednotlivých modelů měnit. Díky možnosti ukládání energie ve stacionární baterii lze naplnit požadavek na maximální využití elektrické energie vyrobené fotovoltaickými panely.

2.3.4 Fotovoltaické panely

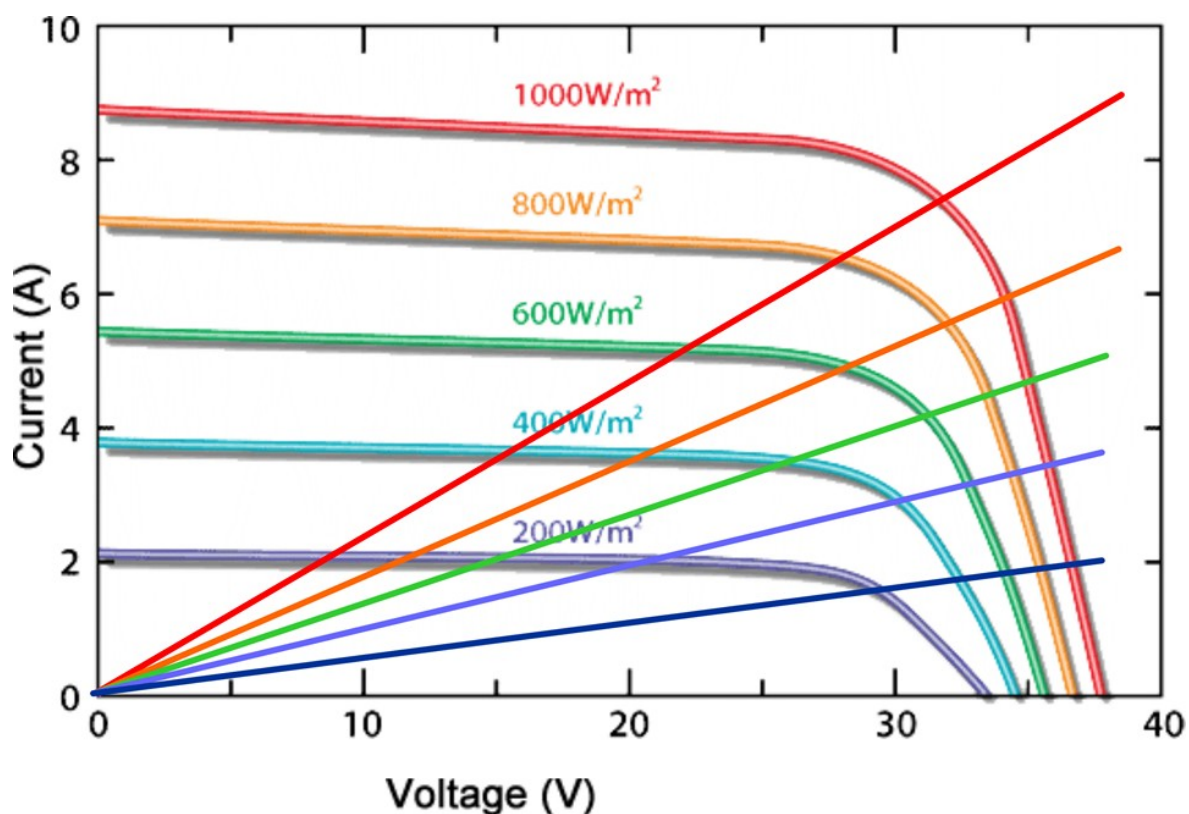
Fotovoltaické panely, jakožto čistý zdroj energie, vnáší do rozhodování největší nejistotu zejména z důvodu omezené přesnosti předpovědi počasí/osvitu. Výroba energie fotovoltaickými články závisí nejen na aktuální míře zatažení oblohy, ale i na úhlu dopadajících paprsků, teplotě panelů i na aktuální prostupnosti vrstvy atmosféry [8]. Za pomoci Fotovoltaického geografického informačního systému (dostupného z [15]) bylo zjištěno, že v měsíci srpnu, podle kterého je taktéž odvozena křivka odběru domácnosti, je maximální osvit panelů ve městě Plzeň 800 W/m^2 . Pro modelování panelů byl v nabídce programu Matlab-Simulink zvolen článek American Choice Solar ACS-220-P, jehož maximální výkon dle Simulinku je téměř 219 W. Ostatní parametry panelu lze nalézt v obrázku číslo 6. V průběhu simulace bude uvažován různý počet serioparalelně zapojených panelů a tím docíleno různého maximálního výkonu celku.



Obrázek 6: V Matlabu uváděné vlastnosti zvoleného panelu

2.3.5 DC-DC měnič s funkcí MPPT

V případě konstantního osvitu fotovoltaického panelu existuje na voltampérové charakteristice (obrázek 7) bod, ve kterém má panel nejvyšší výkon. Tento bod se však v průběhu změny osvitu mění a v případě přímého zapojení panelu na zátěž nebo baterii by nedocházelo k provozu v bodě maximálního výkonu. K docílení provozu s nejvyšším výkonem bez závislosti na zátěži se využívá speciálního DC-DC měniče s MPPT, jenž automaticky sleduje bod maximálního výkonu [1]. Rozdíl v případě provozu panelů bez sledování bodu maximálního výkonu a s ním může být 30 až 50 % [8].



2.3.6 DC-AC měnič napětí

Měnič stejnosměrného napětí na střídavé slouží v navržené mikrosíti jako spojovací člen ostrovní části systému s domácností. V uvažovaném případě průměrné odběrové křivky (obrázek 5) lze vidět, že maximální hodnota nepřekročí 1450 W. Mohlo by se tak zdát, že postačí měnič o výkonu 1500 W. Protože se ale jedná o průměrný odběr, není v křivce možné vidět skokové změny odběru způsobené zapnutím spotřebičů o vyšším výkonu, jako je například rychlovarná konvice či elektrický sporák. V takovém případě by nebyl maximální výkon 1500 W dostatečný. Lze tedy v zásadě uvažovat dvě možnosti. Využití měniče s nižším výkonem a softwarovým přepínáním na síťový provoz v případě vyššího odběru nebo využití měniče s odpovídajícím výkonem. V modelovaném případě byla zvolena varianta s měničem o odpovídajícím výkonu a to především z důvodu zamezení nežádoucího častého přepínání ostrovního/síťového provozu.

2.3.7 Elektrická síť

Hlavním zdrojem, i přes možnost přepnutí do ostrovního systému, zůstává elektrická síť. Pro domácnosti s elektromobilem v současné době nabízí distributoři elektrické energie speciální tarif D27d, který umožňuje levnější dobíjení v době nízkého tarifu. Celková cena jedné MWh ve vysokém tarifu je 4300,26 Kč a v nízkém 2044,88 Kč s DPH [9]. To pro navržený systém znamená, že na každé MWh nakoupené v nízkém tarifu a spotřebované v tarifu vysokém lze ušetřit 2255,38 Kč. Příklad nastavení časového průběhu vysokého a nízkého tarifu lze najít v příloze.

2.3.8 Ostatní komponenty

Další součástí vzniklé mikrosítě jsou nabíječky baterií z elektrická sítě, které spolu s použitými bateriemi udávají nabíjecí křivku. Dále jsou v obvodu využity spínací prvky jako stykače (popř. relé), určující aktuální nastavení toku elektrické energie.

2.3.9 Řídicí mikropočítač Raspberry Pi s hardwarovou nadstavbou Monarco HAT

Řídicím počítačem byl pro navrženou mikrosít' zvolen mikropočítač Raspberry Pi s hardwarovou nadstavbou Monarco HAT od firmy REX Controls. V takové sestavě vystupuje řídicí počítač jako PLC či průmyslový počítač. Protože se v navrženém konceptu mikrosítě uvažuje využití 5 digitálních výstupů na stykače/relé a dva analogové vstupy pro získání informace o procentech nabití baterií, je využití tohoto mini průmyslového počítače dostačující. Výhodou je také možnost využití grafického programování, které systém REXYGEN nabízí.[10]

3 Model mikrosítě

Tvorba modelu mikrosítě vychází z navržené struktury uvedené v první části na obrázku číslo 1. Vstupem modelu tak bude procento nabití stacionární a automobilové baterie. Výstupem poté poloha jednotlivých stykačů S1 až S5.

3.1 Odvození modelu

Odvození modelu systému proběhlo na základě znalostí získaných v doporučené literatuře [11],[12]. Model byl tvořen vzhledem k plánovanému nasazení prediktivního řízení.

Vstupy: S1, S2, S3, S4, S5 , kde 1 = zapnuto, 0 = vypnuto

Stavy: S_A, S_B, T , kde S_A, S_B = stav nabití baterií a T = prahová hodnota (určuje kdy nabíjet)

S ohledem na zapojení mikrosítě byly sestaveny následující diferenční rovnice popisující činnost modelu.

$$\begin{aligned}
 T(k+1) &= T(k) + \Delta T(k) \\
 S_A(k+1) &= S_A(k) - \alpha_A [S_{AL} P_L(k) - S_{AS} P_S(k) - S_{AB} P_B(k) - T(k)] \\
 S_B(k+1) &= S_B(k) - \alpha_B [S_{BL} P_L(k) - S_{BS} P_S(k) - S_{BA} P_A(k) - T(k)]
 \end{aligned} \tag{1}$$

kde podle kombinace spínačů S1, S2, S3, S4 a S5 jsou vyhodnoceny následující koeficienty S_{xx} jako 1 či 0.

S_{AL} - baterie automobilu dodává energii do domácnosti

S_{AS} - fotovoltaické panely dobíjí baterii automobilu

S_{AB} - baterie automobilu je dobíjena baterií stacionární

S_{BL} - stacionární baterie dodává energii do domácnosti

S_{BS} - fotovoltaické články dobíjí stacionární baterii

S_{BA} - stacionární baterie je dobíjena z automobilu

P_L - předpokládaný výkon domácnosti

P_S - předpokládaný výkon fotovoltaických článků

P_A - odebíraný výkon ze stacionární baterie

P_B - odebíraný výkon z baterie automobilu

α_A - koeficient nabíjení baterie automobilu

α_B - koeficient nabíjení stacionární baterie

Při provozu může nastat i situace, kdy je více než jeden koeficient $S_{xx} = 1$. V tabulce 2 (stránka 34) lze vidět vyhodnocení jednotlivých kombinací spínačů. Objevují se zde případy, které by teoreticky mohly nastat, ale nastalý stav nemá opodstatnění.

Rovnice (1) mohou být vyjádřeny ve stavovém popisu modelu jako

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= Ax_k + B_u u_k + B_v v_k, \\ y_k &= Cx_k,\end{aligned}\tag{2}$$

kde stav řízeného systému je

$$x_k = [T(k), S_A(k), S_B(k)]^T \in \mathbb{R}^3,\tag{3}$$

vstupní (řídící) vektor

$$u_k = [\Delta T(k)] \in \mathbb{R}\tag{4}$$

a vektor poruch

$$v_k = [P_L(k), P_S(k)]^T.\tag{5}$$

Matice stavového popisu jsou pak ve tvaru:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \alpha_A & 1 + \alpha_A X_A S_{AB} & 0 \\ \alpha_B & 0 & 1 + \alpha_B X_B S_{BA} \end{bmatrix},$$

$$B_u = [1 \quad 0 \quad 0], \quad (6)$$

$$B_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\alpha_A S_{AL} & \alpha_A S_{AS} \\ -\alpha_B S_{BL} & \alpha_B S_{BS} \end{bmatrix},$$

kde koeficienty X_A a X_B jsou odvozeny z nabíjecí křivky omezené maximálním výkonem měniče s MPPT.

$$P_B = X_A S_A$$

$$P_A = X_B S_B \quad (7)$$

3.2 Simulace modelu

Simulace modelu systému probíhá ve smyslu takzvaného MBD („model-based design“). Tato metoda návrhu umožňuje rychlý a efektivní vývoj řízení dynamických systémů. Základem takového návrhu je model vytvořený v programu Simulink, který slouží k jednoduššímu stanovení základních požadavků, vytvoření struktury systému a testování prototypů řízení. Návrh v rámci MBD umožňuje rychlou reakci na změnu požadavků, snadnou opravu chyb nebo možnost průběžného testování [20]. Simulace mého modelu řízení byla rozdělena do tří částí. V první části byl vytvořen model systému v programu Matlab-Simulink, ve kterém byl taktéž implementován zjednodušený řídicí algoritmus. Následně došlo k oddělení řídicí části a vytvoření řízení v programu REXYGEN. Obě tyto části stále pracovaly na stejném PC. Jako poslední došlo k přenesení vytvořeného algoritmu v programu REXYGEN na platformu Raspberry Pi s nadstavbou Monarco HAT, kde již došlo k využití reálných vstupních/výstupních konektorů pro připojení v praxi. Toto zařízení již komunikuje vzdáleně s PC provozujícím model systému. Testování, kdy je ve smyčce zapojena řídicí jednotka, která komunikuje s modelem systému, je často nazýváno jako HIL (Hardware In the Loop) testování. Při takovém testu simulátor (zde model v Simulinku) velmi přesně imituje reálné prostředí (zde kompletní mikrosít) a simuluje společnou komunikaci (např. se snímači, aktuátory,...). Výhodou takového testování je možnost vyzkoušení chování systému v extrémních případech, které by v realitě měly negativní dopad například na zdraví lidí. [21].

3.2.1 Simulace modelu i řízení v programu Simulink

V první fázi simulace došlo k navržení simulačního modelu mikrosítě. Vzhledem k vysoké komplexnosti systému byl kladen důraz na dodržení veškerých závislostí mezi komponentami a model procházel průběžnou kontrolou reálné proveditelnosti. Celkový model se skládá z 9 subsystémů kdy každý, s výjimkou měniče s MPPT rozděleného na dvě části, zastupuje právě jednu z hlavních komponent. Obrázek struktury modelu lze nalézt v příloze. Všechny komponenty v modelu mikrosítě byly brány jako ideální (s účinností 100%) a tudíž bezztrátové. Díky tomu bylo možné simulovat kompletní model

na úrovni stejnosměrného napětí a tím výrazně snížit výpočetní a časové nároky na provedení simulace.

Řídicí algoritmus byl navržen a sestaven jako Matlab function, která byla následně v průběhu simulace volána pomocí bloku „interpreted Matlab function“. Řízení systému je založeno na základě vstupních dat o aktuálním času simulace, procentu nabití baterie automobilu a stacionární baterie a informaci o slunečním svitu. Dále do funkce vstupuje informace o předpokládaném denním svitu slunce, očekávaném odběru domácnosti, času odjezdu, času příjezdu, požadovaném procentu nabití baterie elektromobilu a poslední hodnota přepínače ostrovního/síťového provozu. Čas příjezdu, jako reálně neznámá hodnota, není nikterak využíván v rozhodovacím algoritmu, ale slouží pouze k odhadu požadovaného nabití a simulaci nepřítomnosti auta. Výstupem je pak stav všech použitých stykačů a simulační informace o vysokém/nízkém tarifu.

3.2.2 Simulace s řídicím systémem v programu REXYGEN spuštěným na stejném PC

Druhá část simulace vyžadovala přenesení a úpravu řídicího algoritmu s cílem provozování logiky řízení v programu REXYGEN. Hlavní změnou oproti řízení v rámci matlab function je možnost využití zapamatování posledních výstupů. Při oddělení řídicí části v systému REXYGEN došlo dále k přenesení následujících součástí:

1. Simulace informace o počasí
2. Zadání očekávaného času odjezdu
3. Simulace náhodného času příjezdu
4. Zadání/výpočet požadovaného procenta nabití baterie elektromobilu
5. Výpočet očekávaného odběru domácnosti

V systému REXYGEN byla vytvořena taktéž simulace předpovědi počasí a navíc připraven systém zpracování dat z reálné předpovědi počasí pro následující praktické nasazení vzniklého algoritmu. Protože v reálném nasazení bude zadávání očekávaného odjezdu a požadovaného nabití probíhat prostřednictvím programu REXYGEN, byly tyto části včetně simulace náhodného příjezdu taktéž přesunuty. Přesunuta a vytvořena byla

i část simulující očekávaný odběr domácnosti a to z důvodu následného průběžného sběru a vyhodnocení dat o spotřebě při praktickém nasazení.

3.2.3 Simulace za pomoci Raspberry Pi s nadstavbou Monarco HAT

Poslední část simulace je založena na využití mikropočítače Raspberry Pi s nadstavbou Monarco HAT. Při takovém zapojení probíhá komunikace modelu v Simulinku s řídicím systémem po síti. Do simulace je tak již vneseno reálné zpoždění komunikace a reakce na předchozí změnu. V řídicím algoritmu v tomto kroku došlo k nastavení reálných vstupních a výstupních pinů konektoru, které jsou tím připraveny pro připojení odpovídajících zařízení (relé, stykače,...). Pro účely simulace byla v rámci kontroly funkčnosti výstupních pinů využita LED světla. Vstupní analogové piny pak byly přímo spojeny s analogovými výstupy, simulujícími procenta nabití baterií.



Obrázek 8: Raspberry Pi + Monarco HAT s připojenými vstupy/výstupy

4 Návrh a implementace řídicích algoritmů

První návrh řídicího algoritmu proběhl v programu Matlab ve tvaru funkce, která byla následně volána z modelu vytvořeného v nadstavbě Simulink. Nevýhodou takové funkce je absence paměti, a proto bylo nutné využívat zpětnou vazbu o předchozích výstupech. V druhé a třetí části při využití programu REXYGEN byl algoritmus upraven do podoby využívající informace o předchozím nastavení proměnných bez nutnosti zavedení zpětné vazby. Program REXYGEN v základu nabízí širokou škálu možností grafického programování a v případě potřeby blok pro napsání vloženého programu REXLANG [10]. Ten byl využíván pro vytvoření řídicího algoritmu mikrosítě a nabízí možnost tvorby kódu ve skriptovacím jazyce založeném na bázi jazyka C [13]. Program tak byl následně vytvořen ve vývojovém prostředí Eclipse. Vytvořené algoritmy jsou dostupné na příloženém CD.

4.1 Predikce osvitů a spotřeby

Navržený model má dvě hlavní proměnné a to sluneční osvit fotovoltaických článků a denní spotřebu domácnosti. Aby byla snížena chyba a tím zvýšena efektivita, vzniklý algoritmus predikuje tyto hodnoty na základě dostupných dat.

4.1.1 Predikce osvitů

Určit přesný průběh denního osvitů je téměř nemožné. Lze však zpracovat data o počasí a pokusit se predikovat celkový denní osvit. Vytvořený algoritmus vyhledá odpovídající data na serveru www.openweathermap.org. Tento server umožňuje využití dat vzhledem k danému/zakoupenému plánu uživatele. Rozdíly mezi jednotlivými plány zobrazuje obrázek číslo 9. Protože jedním z požadavků na vznikající mikrosítě je minimalizovat vstupní náklady, rozhodl jsem se pro využití bezplatného plánu. Ten

povoluje maximální počet 60 požadavků na aktuální počasí za minutu a poskytuje předpověď na 5 dnů po 3 hodinách počínaje půlnocí [14].

Name	Calls per minute (no more than)	Hourly forecast (days)	3 hour forecast (days)	Daily forecast (days)	Price per month (excl. VAT)
Free plan	60	unavailable	5	unavailable	Free
Startup plan	600	unavailable	5	16	40 USD
Developer plan	3000	4.5	5	16	180 USD
Professional plan	30000	4.5	5	16	470 USD
Enterprise plan	200000	4.5	5	16	2000 USD

Obrázek 9: Plány určující dostupná data o počasí [upraveno z 14]

Pro získání dat, ať už ve formátu JSON nebo XML, tedy bylo nutné nastavit pevnou frekvenci volání. Po stažení předpovědi ve formátu JSON (ukázka v příloze) dojde k filtraci odpovídajících informací a to procent oblačnosti. Tato informace je následně využita po částech dle požadavku na čas. Z jednotlivých dat o oblačnosti se v požadovaném intervalu vypočte průměrná hodnota. Ta na základě znalosti průměrného výkonu fotovoltaických článků poslouží k odhadu předpokládané hodnoty vyrobené energie, která se následně projeví při výpočtu požadovaného nabití baterií v nočních hodinách.

4.1.2 Predikce denní spotřeby domácnosti

Většina lidí má do velké míry opakující se týdenní plán, ať už je to práce, škola, koníčky nebo návštěvy příbuzných. Tyto opakující se činnosti pozitivně ovlivňují možnost odhadu spotřeby domácnosti. Na základě měřených dat z jednotlivých dní v týdnu tak lze průběžně tvořit a dále upřesňovat průměrný denní/týdenní odhad spotřeby domácnosti. Tato hodnota následně ovlivňuje výpočet požadovaného nabití baterií v nočních hodinách. Pro potřeby simulace byla měněna denní hodnota odebrané energie, obalová křivka ale zůstávala nezměněna (obrázek 5).

4.2 Heuristické řízení s predikcí

Smyslem heuristického řízení s predikcí bylo navrhnout algoritmus určující čas a dobu sepnutí jednotlivých řídicích spínacích prvků. K tomu byly využity následující informace:

1. kapacita baterie v elektromobilu a domácnosti
2. nabíjecí křivky baterií
3. maximální výkon měniče s MPPT
4. maximální výkon nabíječek baterií
5. predikce slunečního svitu
6. predikce denního odběru energie
7. výkon instalované fotovoltaické elektrárny

Uživatelé jsou následně při výchozím nastavení algoritmu určeny limity stavu nabití baterie jako:

1. minimální hodnota nabití elektromobilu,
2. minimální hodnota nabití stacionární baterie ,
3. minimální hodnota nabití v době nízkého tarifu,
4. maximální požadovaná hodnota nabití baterií (v případě potřeby).

Při každém zapojení elektromobilu do mikrosítě pak uživatel zadá:

1. očekávaný odjezd
2. požadované procento nabití baterie elektromobilu

Řízení je složeno z velkého množství menších rozhodnutí, která jsou průběžně měněna na základě predikce počasí a odběru.

Hlavní rozhodovací část postupuje dle následujících kroků:

1. Výpočet aktuálních časů nabíjení jednotlivých baterií z různých zdrojů
2. Kontrola přítomnosti elektromobilu v mikrosíti
3. Rozhodnutí o struktuře mikrosítě
4. Kontrola stavu nabití stacionární baterie
5. Rozhodnutí o spuštění napájení z ostrovního systému
6. Kontrola zbývajících času do změny tarifu
7. Rozhodnutí o dobití baterií před ukončením nízkého tarifu
8. Kontrola času odjezdu elektromobilu
9. Rozhodnutí o spuštění nabíjení ze stacionární baterie
10. Kontrola stavu nabití elektromobilu
11. Rozhodnutí o dobití elektromobilu z elektrická síť
12. Rozhodnutí o využití baterie elektromobilu pro domácnost
13. Kontrola aktuálního výkonu fotovoltaických panelů
14. Rozhodnutí o nabíjení elektromobilu nebo stacionární baterie

Algoritmus dále obsahuje několik částí, které vzhledem k praktickému nasazení nejsou relevantní a slouží pouze pro účely simulace. Kompletní vytvořený software je k nahlédnutí na přiloženém CD.

4.3 Prediktivní řízení

Druhým uvažovaným přístupem je prediktivní řízení často popisované anglickou zkratkou MPC (model predictive control). MPC je uzavřenou smyčkou, která má možnost kompenzovat poruchy vzniklé vysokou proměnlivostí výroby energie z obnovitelných zdrojů. Z tohoto důvodu se často v energetice nasazuje v systémech obsahující fotovoltaické články nebo větrné elektrárny. Hlavní myšlenkou je na základě modelu systému vypočítat očekávané budoucí stavy v každém kroku řízení a sledováním jejich vývoje najít nejefektivnější cestu vzhledem k zadané odcenovací funkci. Principiálně řízení napodobuje chování lidí, kdy na základě aktuální situace a informací dojde k rozhodnutí,

jaká akce bude v budoucnu provedena, aby bylo dosaženo vytouženého cíle. Algoritmus tak v každém okamžiku vypočítá všechny reálné možnosti řízení v rámci zavedeného horizontu predikce a zadaných omezení. Poté na základě zavedené oceňovací funkce rozhodne o optimální cestě. Z této cesty je pak proveden první krok řízení a následně znovu spuštěn kompletní algoritmus výpočtu na základě nových informací [12,16].

Formulování úlohy prediktivního řízení

Při sestavení úlohy prediktivního řízení byl uvažován horizont predikce N a horizont řízení M . Hlavní úlohou prediktivního řízení je minimalizace cenové funkce J a tím dosažení optimálního řízení.

$$J = \sum_{k=1}^N [w_1 C(k) + w_2 (S_A(k) - S_{Aref}(k))^2 + w_3 (S_B(k) - S_{Bref}(k))^2], \quad (8)$$

kde

$C(k)$ - funkce určující cenu energie

w_1 - váhový koeficient nejnižší ceny energie

w_2 - váhový koeficient efektivního využití baterie automobilu

w_3 - váhový koeficient efektivního využití stacionární baterie

S_{aref}, S_{bref} - predikovaný stav nabití baterie.

Výpočet J dále probíhá s následujícími omezujícími podmínkami:

$$\begin{aligned} S_{Amin} &\leq S_A \leq S_{Amax} \\ S_{Bmin} &\leq S_B \leq S_{Bmax} \end{aligned} \quad (9)$$

Cena energie $C(k) = \begin{cases} 0 & \text{pro energii z fotovoltaických článků} \\ c_{NT} & \text{pro nízký tarif} \\ c_{VT} & \text{pro vysoký tarif} \end{cases}$

Model systému odvozený výše (kapitola 2.1) v průběhu výpočtu výrazně mění svoji strukturu změnou hodnot S_{XX} zavedených pro popis aktuálního zapojení mikrosítě. Tabulka 2 popisuje jednotlivé možnosti zapojení (pro přehlednost byly v popisu stavů S_{XX} vynechány nuly). Po prozkoumání všech možností bylo zjištěno, že model se může měnit do minimálně 13 různých zapojení. Tyto změny jsou skokové a t-variantní, což vede na velmi složitou strukturu.

Původním záměrem diplomové práce bylo řešit problém prediktivního řízení převedením na kvadratické programování. Výhodou kvadratického programování je existence globálního extrému a existence efektivních a spolehlivých algoritmů. Výše zformulovaná úloha je však úlohou prediktivního řízení hybridních systémů nebo přepínaných systémů (switched systems), pro kterou se kvadratické programování nedá použít. Tato úloha je řešitelná pomocí tzv. smíšeného celočíselného kvadratického programování (mixed integer quadratic programming, MIQP) [22]. Velikou nevýhodou MIQP je to, že na rozdíl od kvadratického programování jde o úlohu tzv. NP-úplnou, pro kterou neexistuje obecné řešení v polynomiálním čase a doba výpočtu roste exponenciálně se zvětšováním dimenze a horizontu úlohy. Navíc v [22] je uvedeno, že takové úlohy je možné omezeně řešit pro periody řízení v řádu hodin a nikoliv minut nebo sekund, jak by bylo zapotřebí v uvažovaném případě. Z tohoto důvodu bylo od přesného řešení této úlohy v této práci upuštěno.

Legenda:

ANO = může nastat, NE = určitě nenastane, O = případ nemá logiku (ale může nastat)

Případ	S1	S2	S3	S4	S5	S _{AI}	S _{AS}	S _{AR}	S _{RI}	S _{RS}	S _{RA}	ANO/NE/O
1	1	1	1	1	1			1	1			O
2	0	1	1	1	1			1	1			O
3	1	0	1	1	1			1	1			ANO
4	0	0	1	1	1			1	1			ANO
5	1	1	0	1	1		1		1			O
6	0	1	0	1	1		1		1			O
7	1	0	0	1	1		1		1			ANO
8	0	0	0	1	1		1		1			ANO
9	1	1	1	0	1	1			1		1	O
10	0	1	1	0	1	1			1		1	O
11	1	0	1	0	1	1			1		1	NE
12	0	0	1	0	1	1			1		1	ANO
13	1	1	0	0	1				1	1		O
14	0	1	0	0	1				1	1		O
15	1	0	0	0	1				1	1		O
16	0	0	0	0	1				1	1		ANO
17	1	1	1	1	0			1				NE
18	0	1	1	1	0			1				NE
19	1	0	1	1	0			1				ANO
20	0	0	1	1	0			1				ANO
21	1	1	0	1	0		1					NE
22	0	1	0	1	0		1					NE
23	1	0	0	1	0		1					ANO
24	0	0	0	1	0		1					ANO
25	1	1	1	0	0						1	NE
26	0	1	1	0	0						1	O
27	1	0	1	0	0						1	NE
28	0	0	1	0	0						1	ANO
29	1	1	0	0	0					1		ANO
30	0	1	0	0	0					1		O
31	1	0	0	0	0					1		O
32	0	0	0	0	0					1		ANO

Tabulka č.2: Možnosti zapojení mikrosítě vzhledem ke stavu stykačů

ANO = 13 , NE = 7 , NEROZHODNUTO = 12

Logicky vyloučeno: S2 = 1 & S5 = 1

5 Experimentální ověření a prezentace výsledků simulací

Jednotlivé simulační případy jsou rozděleny do 3 hlavních skupin. První uvažuje nejčastější případ, a to odjezd automobilu v průběhu dne a následný návrat. Druhá skupina pak modeluje situaci, kdy automobil za celý den neodjede, což může nastat například o víkendových dnech. Poslední část předpokládá dlouhodobou absenci elektromobilu ve vzniklé mikrosíti. Veškeré simulace probíhají v délce 3 dnů. V případě, že je měněn jeden z parametrů, zůstávají ostatní v ideálním nastavení. Většina níže uvedených průběhů, pro lepší orientaci ve výsledcích, uvažuje ideální neskokové změny odběru. To však reálně není, a proto jsou vždy na konci uvedeny průběhy, které zahrnují skokové zapínání/vypínání spotřebičů.

5.1 Odjezd i příjezd elektromobilu v průběhu dne

Případ uvažuje běžnou denní rutinu v pracovní den, kdy elektromobil ráno odjíždí a vrací se zpět v průběhu dne. Protože se jedná o nejčastější denní průběh, bude na tomto případě navržena velikost baterií a fotovoltaických článků dle průměrných denních odběrů energie.

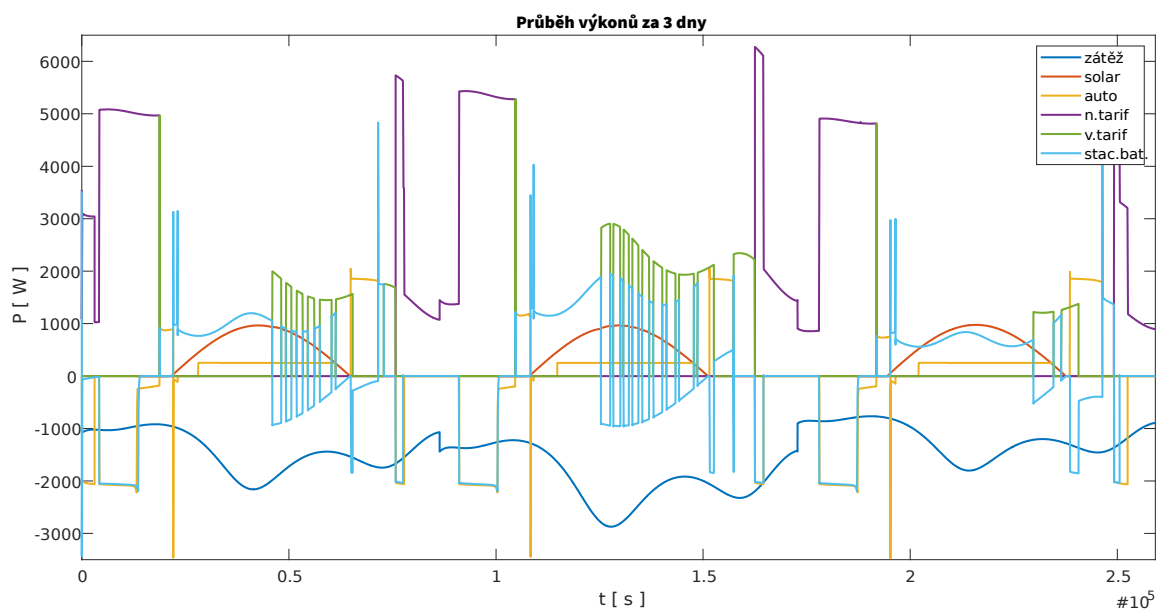
5.1.1 Návrh velikosti stacionární baterie a výkonů fotovoltaických panelů

Návrh bude probíhat pro domácnost o 3 osobách v domě s rozlohou 100 m². Na základě informací z dodavatelelektriny.cz [18] by taková domácnost měla při ohřevu teplé vody, využívání běžných spotřebičů a nižší spotřebě elektrické energie na vytápění celkovou roční spotřebu 14,6 MWh. Simulace tak bude probíhat ve třech dnech, kdy je postupně denní odběr v době vysokého tarifu přibližně 25, 33, 21 kWh (bez zahrnutých

skokových změn) a celkový průměrný odběr z těchto 3 dnů je 40 kWh (40 kWh * 365 dní = 14,6 MWh). V průběhu testování jednotlivých možností je uvažován ideální stav, kdy denní výroba energie je 100 % výkonu solární elektrárny a odhad osvitů i odběru je přesný. Elektromobil opouští domácnost v 7:45 a vrací se v 17:00. Cílem návrhu je najít kombinaci velikosti baterií a elektrárny, která by při běžném provozu pokrývala co největší (ideálně celou) spotřebu v době vysokého tarifu a tím zajistit snížení nákladů na energie.

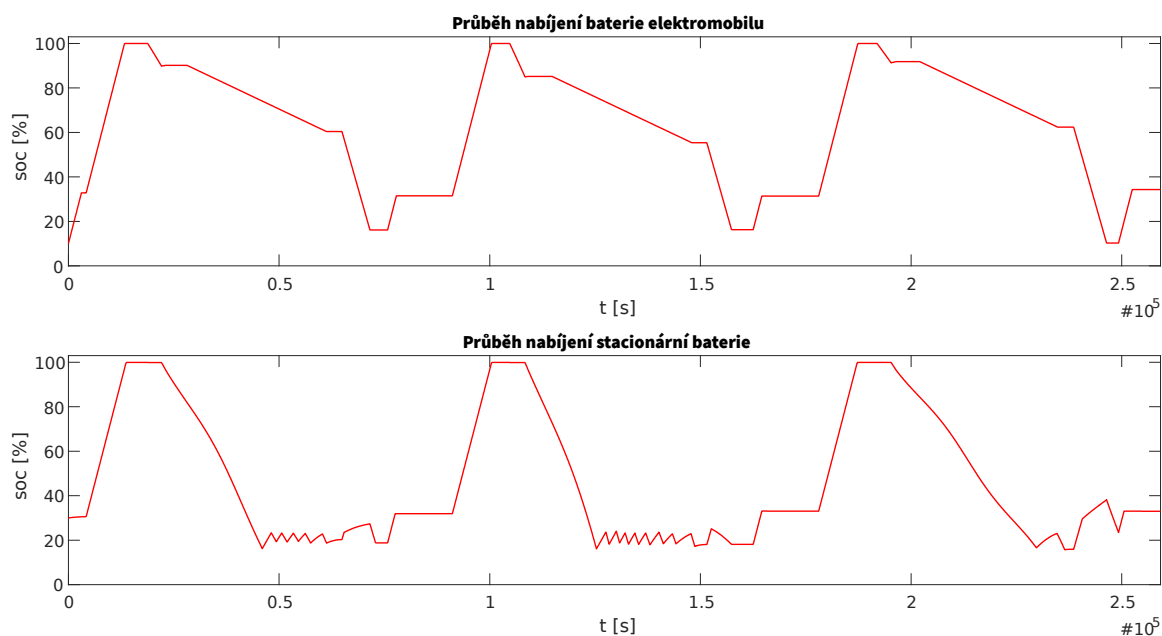
Stacionární baterie 7.2 kWh, výkon elektrárny 1kW

V první možnosti byla stacionární baterie stanovena o stejné velikosti jako baterie automobilu a to 7.2 kWh. Výkon elektrárny při lokálních podmínkách, tedy maximálním osvitů 800 W/m^2 , dosahuje maxima 1 kW a může v podmínkách stanovených simulací vyrobit 7.2 kWh/den. Na obrázku 10 lze vidět průběhy výkonů v mikrosíti po dobu 3 dnů, dále pak na obrázku 11 a 12 odpovídající průběhy nabití baterií a stavy přepínačů, jež znázorňují chování mikrosítě v průběhu simulace.

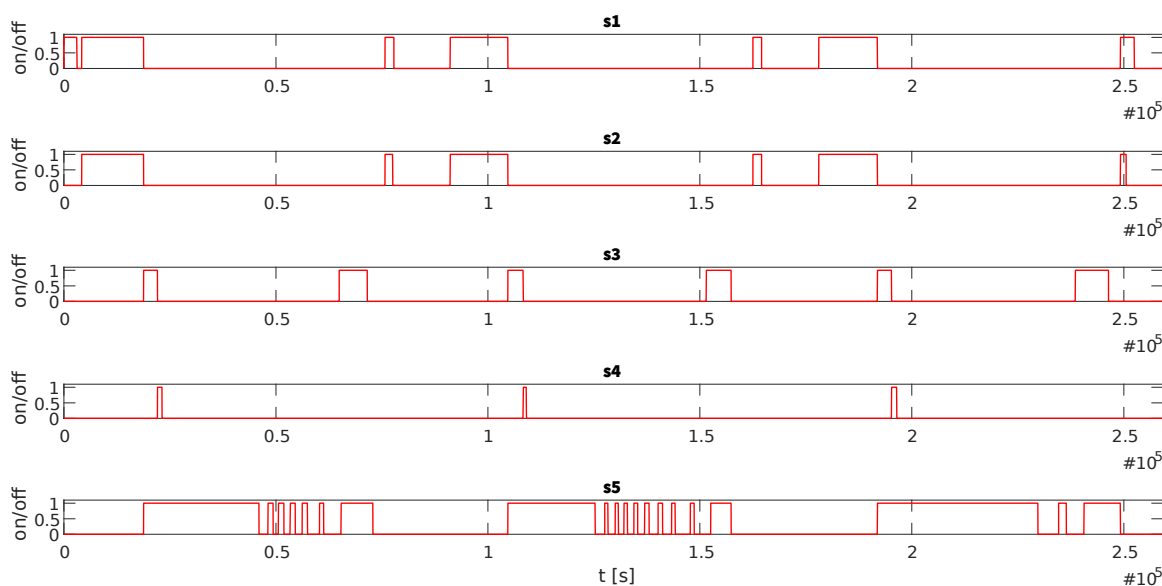


Obrázek 10: Průběhy výkonů v mikrosíti s baterií 7.2 kWh a panely o výkonu 1 kW

Lze si všimnout, že i přes 100% nabití obou baterií a maximální výkon fotovoltaických článků není v žádném dni pokryta kompletní spotřeba v průběhu vysokého tarifu. Pro domácnost se simulovaným odběrem tak není tato konfigurace nejvhodnější.



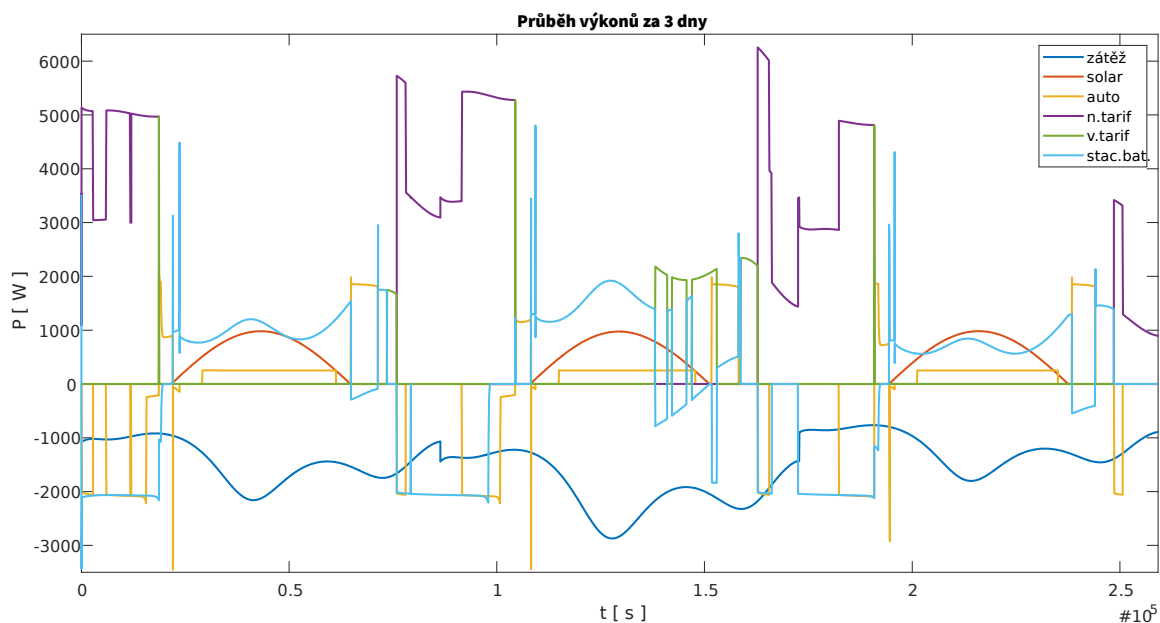
Obrázek 11: Průběhy stavu nabití baterií se stac. baterií 7.2 kWh a panely o výkonu 1 kW



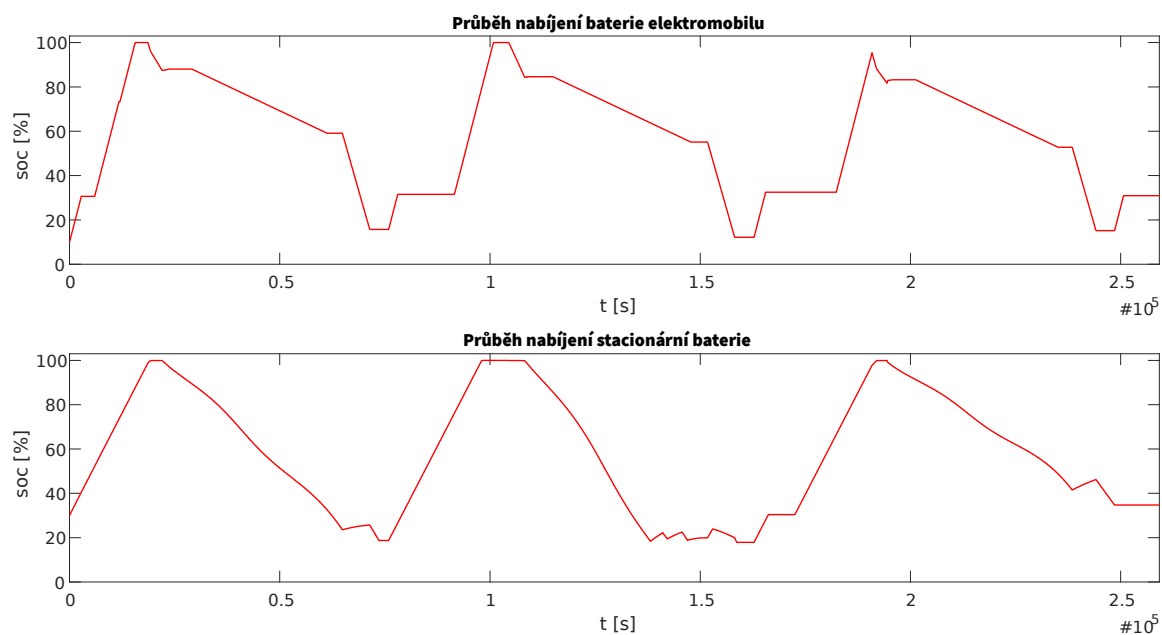
Obrázek 12: Průběh stavu přepínačů s baterií 7.2 kWh a panely o výkonu 1 kW

Stacionární baterie 14.4 kWh, výkon elektrárny 1kW

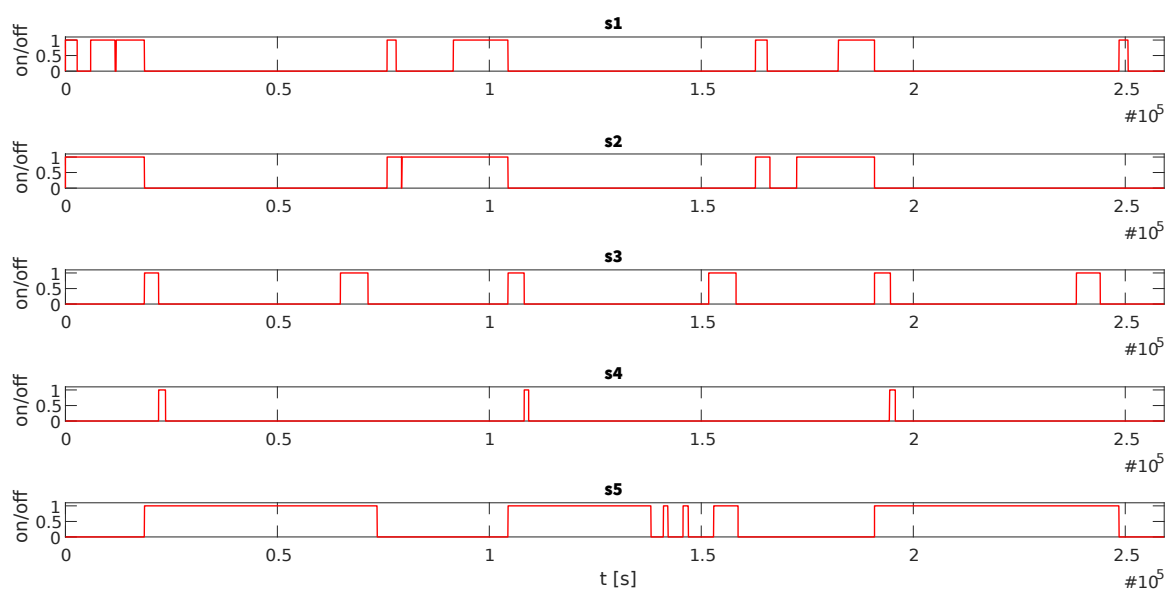
Z důvodu popsaného výše byla velikost stacionární baterie zdvojnásobena a výkon fotovoltaické elektrárny ponechán. V obrázku níže si lze všimnout, že ve 3.dni s nejnižší spotřebou je již pokryta kompletní spotřeba energie v době vysokého tarifu.



Obrázek 13: Průběhy výkonů v mikrosíti s baterií 14.4 kWh a panely o výkonu 1 kW



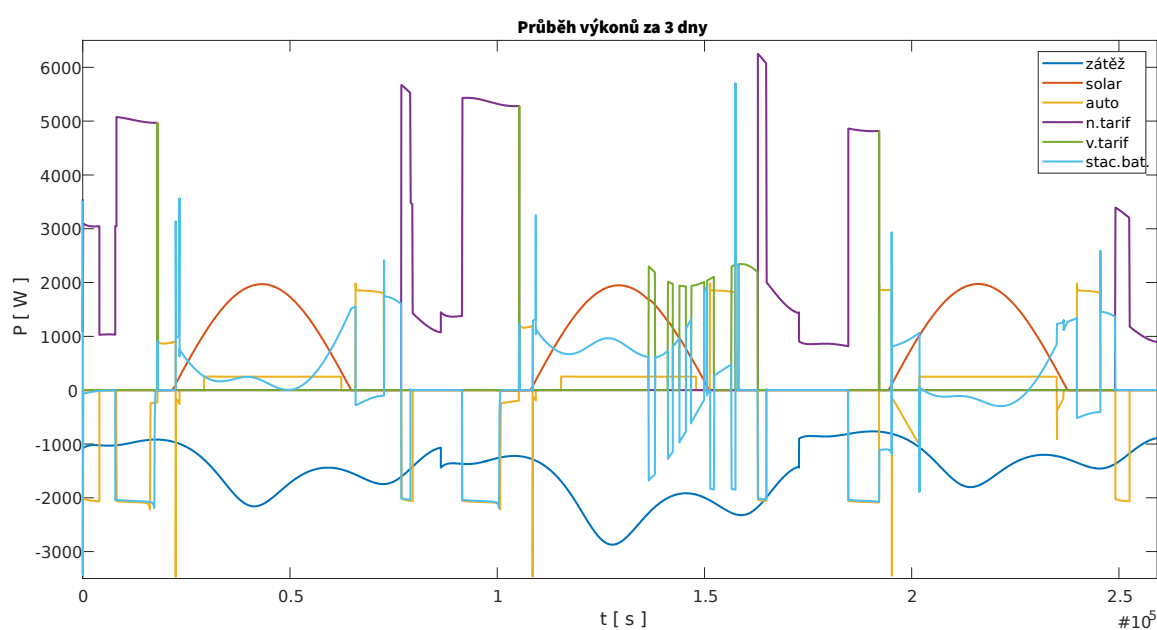
Obrázek 14: Průběhy stavu nabití baterií se stac. baterií 14.4 kWh a panely o výkonu 1 kW



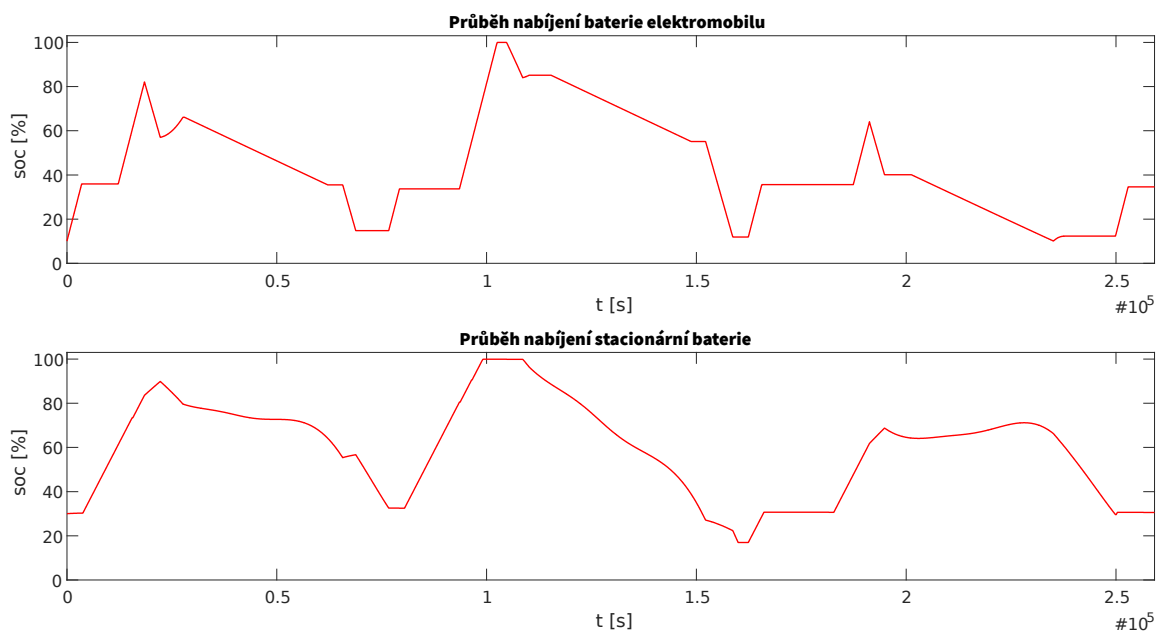
Obrázek 15: Průběh stavu přepínačů s baterií 14.4 kWh a panely o výkonu 1 kW

Stacionární baterie 7.2 kWh, výkon elektrárny 2kW

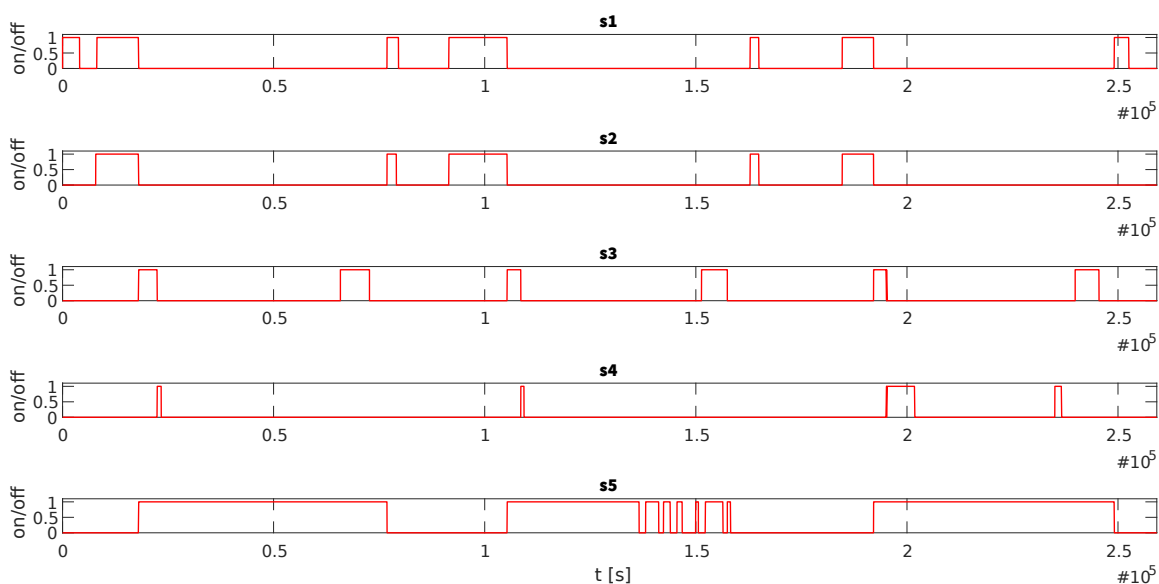
V této variantě uvažovaný výkon elektrárny při lokálních podmínkách byl zvětšen, dosahuje maxima 2 kW a může v podmínkách stanovených simulací vyrobit 14.4 kWh/den. Baterii byla ponechána velikost 7.2 kWh. Z obrázku 16 lze vidět, že spotřeba je již ve dvou dnech pokryta. Tento případ však uvažuje 100% denní výrobu energie z fotovoltaické elektrárny, což nenastává pravidelně.



Obrázek 16: Průběhy výkonů v mikrosíti s baterií 7.2 kWh a panely o výkonu 2 kW



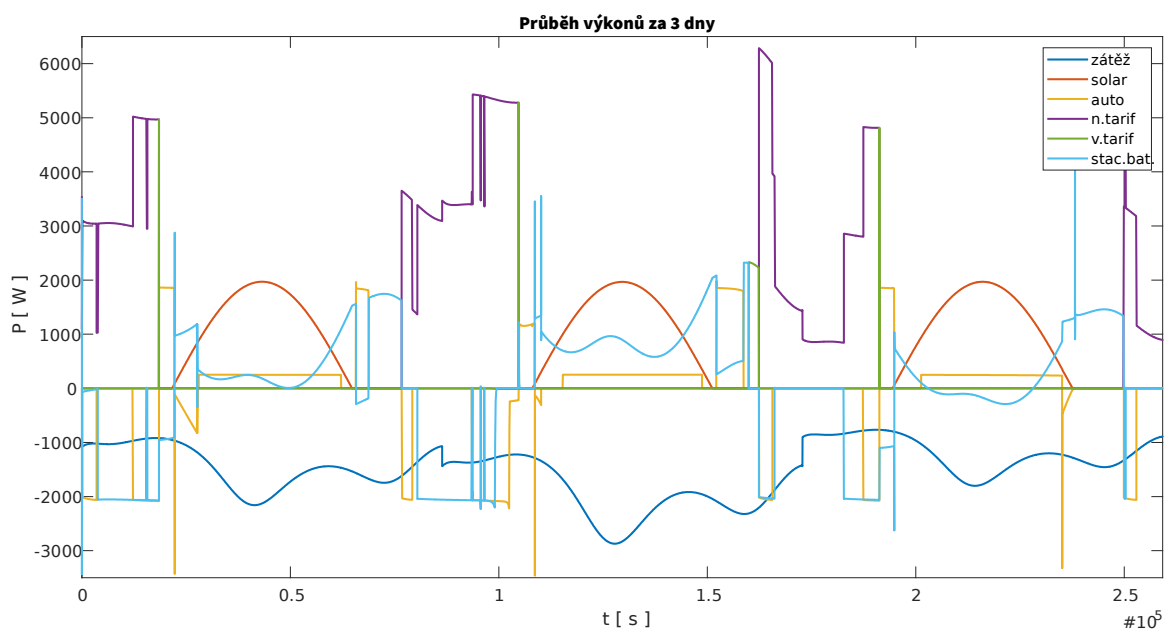
Obrázek 17: Průběhy stavu nabití baterií se stac. baterií 7.2 kWh a panely o výkonu 2 kW



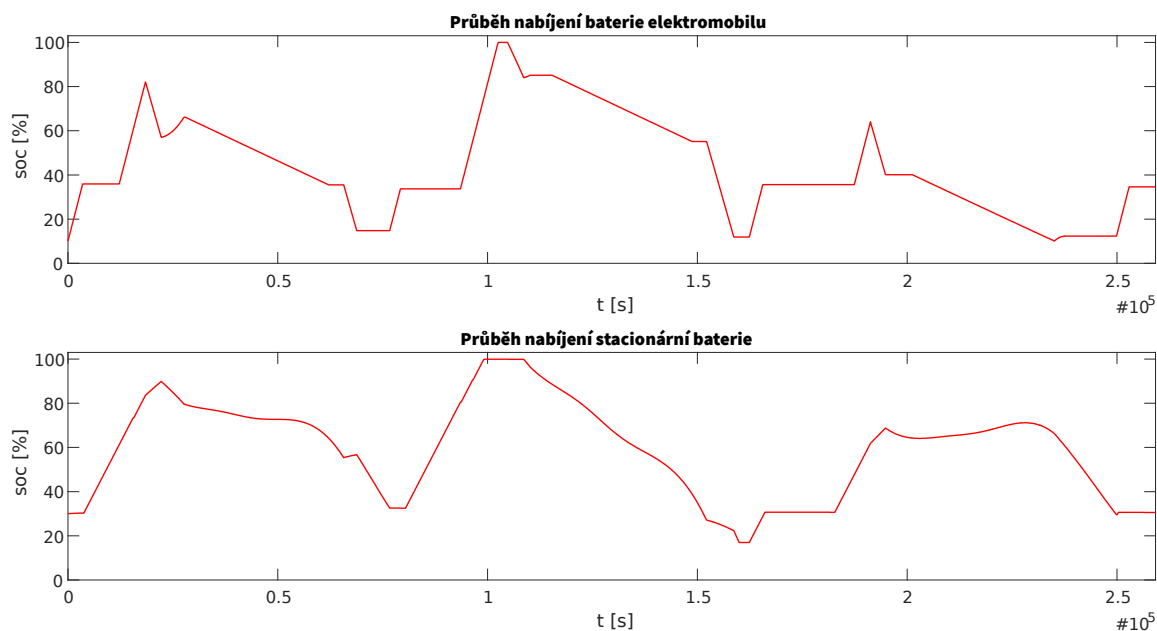
Obrázek 18: Průběh stavu přepínačů s baterií 7.2 kWh a panely o výkonu 2 kW

Stacionární baterie 14.4 kWh, výkon elektrárny 2kW

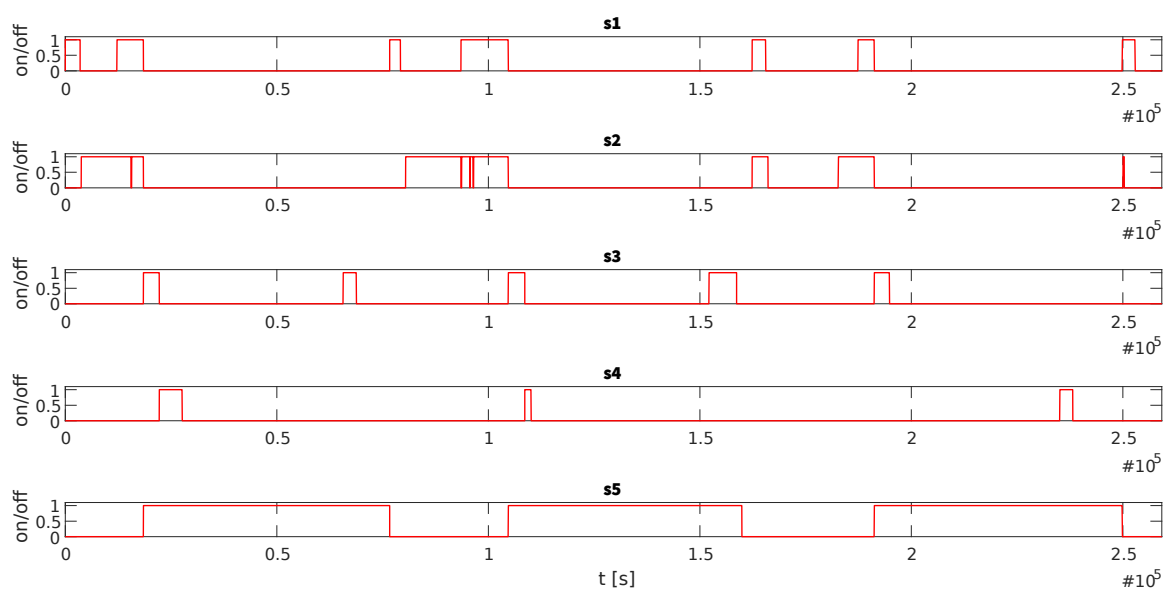
Případy výše se zdvojenou kapacitou baterie a zdvojeným výkonem elektrárny jsou nyní zkombinovány. Stacionární baterie tak má kapacitu 14.4 kWh a maximální výkon elektrárny v lokálních podmínkách je 2 kW. Průběh výkonů v obrázku 19 dokazuje, že i ve dni s neobvykle vysokým odběrem je pokryta téměř kompletní denní spotřeba. V simulaci se uvažuje ideální denní osvit panelů, který nenastává každý den, ale při návrhu je nutné brát v úvahu i náklady na další rozšíření bateriového úložiště nebo solární elektrárny. Průběhy procent nabití baterií ve zbylé dva dny ukazují, že při běžném odběru tato kombinace poskytuje prostor pro vyšší nabití v případě nižšího očekávaného osvitu. Následující simulace prověří vhodnost této kombinace při nižší výrobě energie.



Obrázek 19: Průběhy výkonů v mikrosíti s baterií 14.4 kWh a panely o výkonu 2 kW



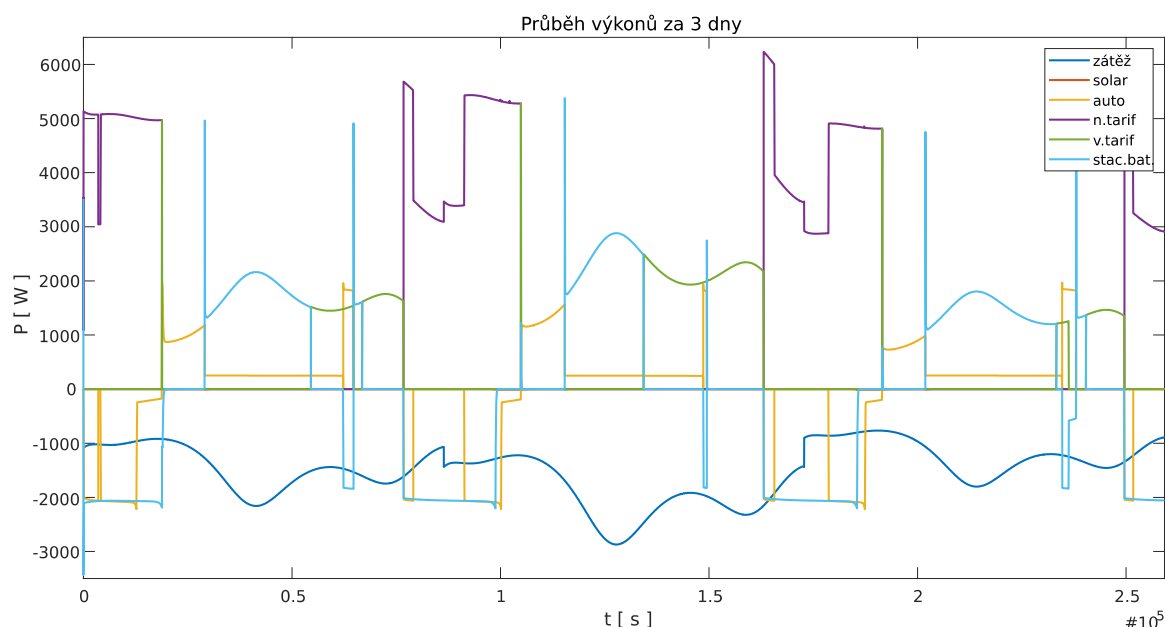
Obrázek 20: Průběhy stavu nabití baterií se stac. baterií 14.4 kWh a panely o výkonu 2 kW



Obrázek 21: Průběh stavu přepínačů s baterií 14.4 kWh a panely o výkonu 2 kW

Chování při nulové a poloviční výrobě energie

V případě, kdy je uvažována přesně poloviční výroba po celý den, odpovídají průběhy získané při kombinaci baterie 14.4 kWh a výkonu panelů 1 kW. Průběhy při poloviční výrobě energie se však mění s tím, jak se mění průběh denního osvitů. Pokud by byla výroba nulová, simulace by vypadala následovně (Obrázek 22). Takový stav však na území Plzně dle Fotovoltaického geografického informačního systému dlouhodobě nenastává [15]. I přes to je energií z baterií v den s největší spotřebou pokryta více než polovina času vysokého tarifu .



Obrázek 22: Průběh výkonů s baterií 14.4 kWh a panely o výkonu 2 kW při nulovém osvitu

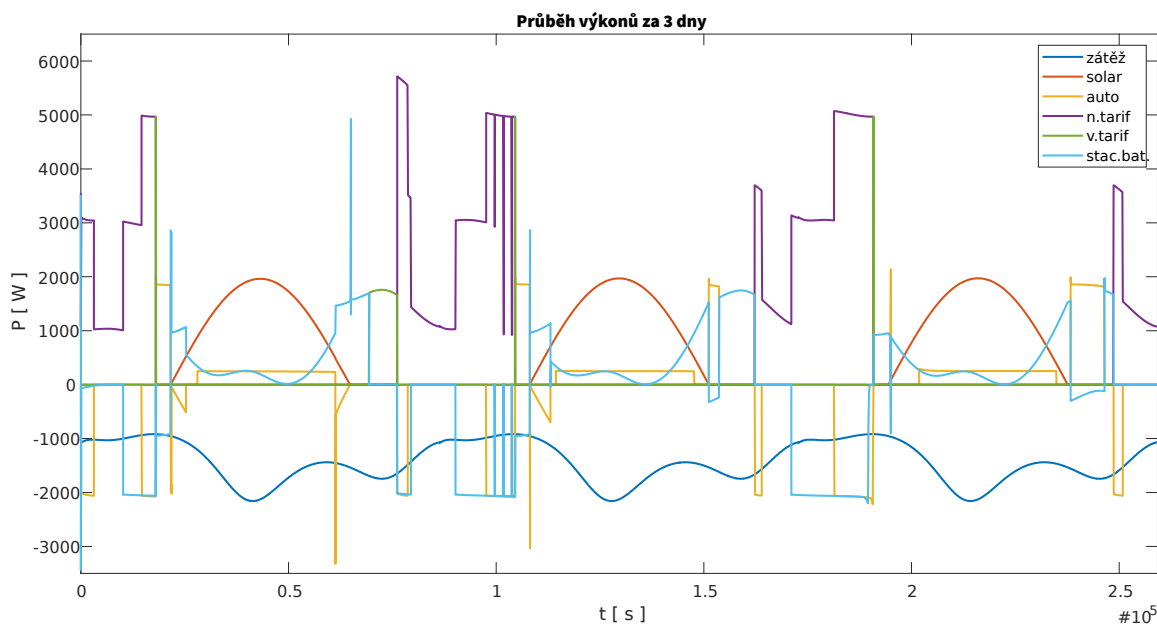
Na základě simulací výše byla zvolena kombinace baterie o velikosti 14.4 kWh a fotovoltaických panelů o výkonu 2 kW (v lokálních podmínkách) jako vyhovující. Dále proto budou provedeny simulace se změnou odjezdu/příjezdu automobilu, proměnným odhadem osvitů a odběru na této konfiguraci.

5.1.2 Test navržené kombinace mimo ideální podmínky

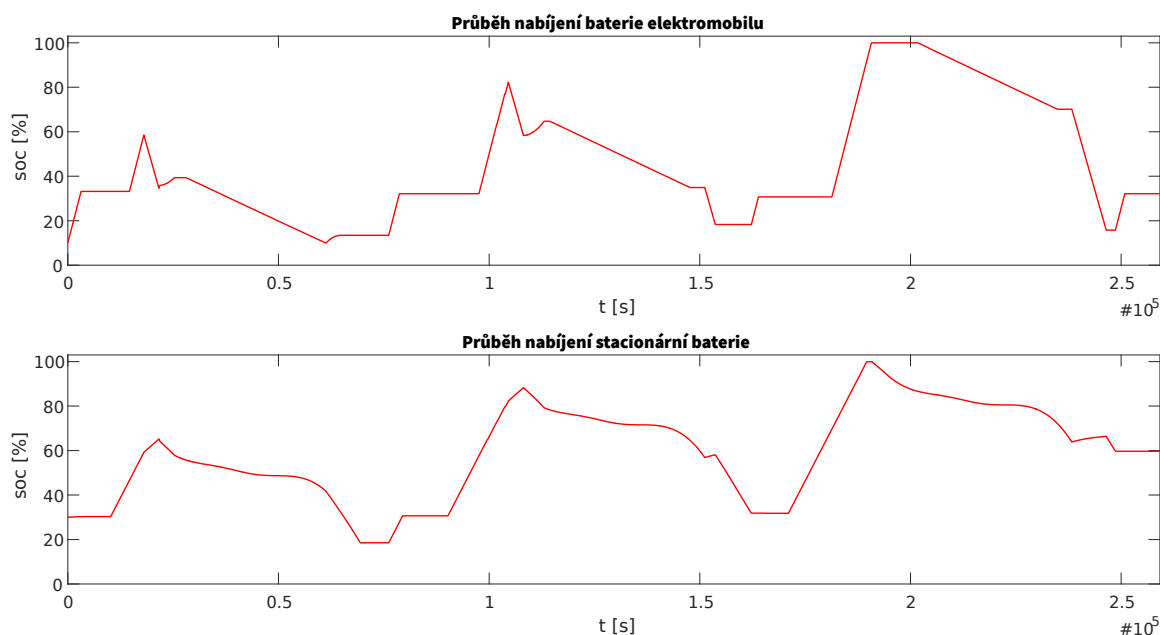
Přesnost odhadu a proměnný čas příjezdu se výrazně podílí na průběhu denních výkonových křivek. V následujících simulacích dojde k otestování chování systému při proměnných podmínkách.

Vliv špatné predikce odběru

Pokud dojde k nepřesné predikci, je zásadně ovlivněno procento pokrytí vysokého tarifu levnější energií. Obrázek 23 zobrazuje postupně nižší (20 kWh), ideální (25 kWh) a vyšší (30 kWh) odhad odběru energie v totožné dny s odběrem 25 kWh. Lze si všimnout, že v případě nižšího odhadu dojde k nutnosti využití dražší energie z vysokého tarifu. Naopak při vyšším odhadu jsou baterie bezdůvodně přebíjeny nad maximální požadovanou hodnotu a v případě, kdy by výkonová špička odběru nastala později než špička výroby solárních panelů, by nastal stav, kdy by baterie byly nabitě na 100 % a nebylo by kam uložit vyrobenou energii.



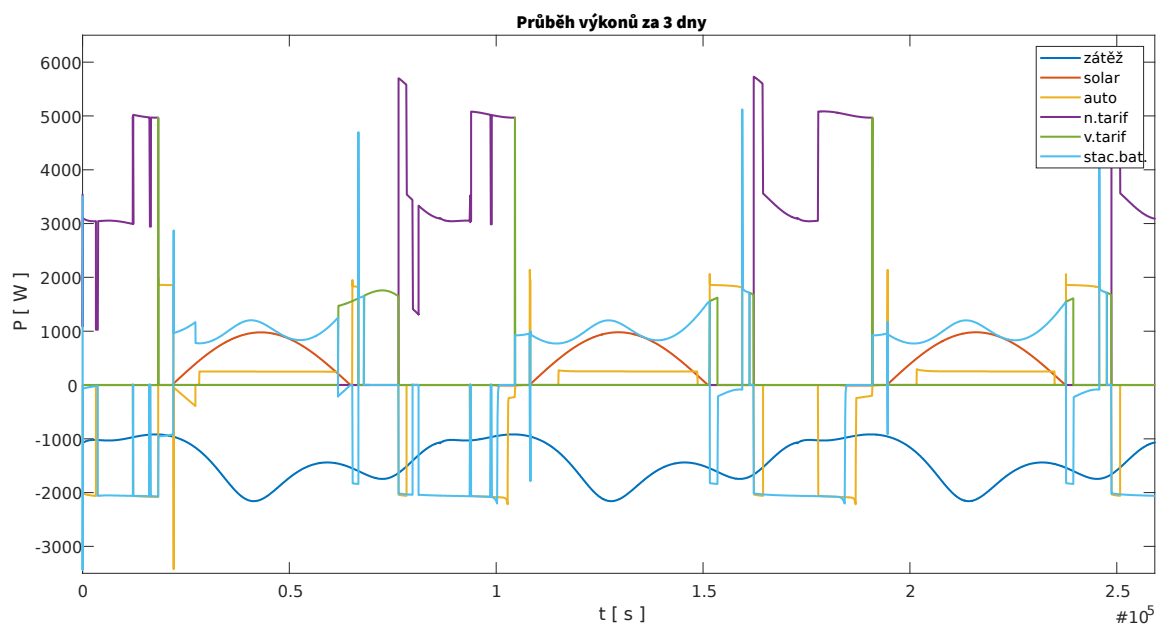
Obrázek 23: Průběhy výkonů při špatné predikci odběru



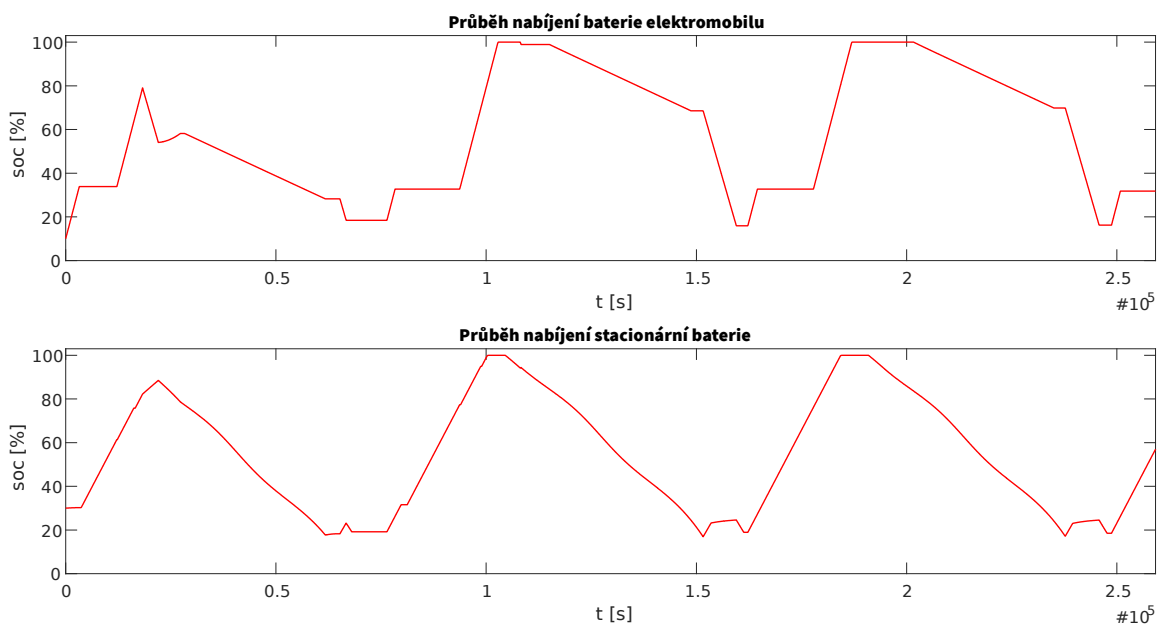
Obrázek 24: Stav nabití baterií v průběhu dní se špatnou predikcí odběru

Vliv špatné predikce osvitů

Taktéž nepřesný odhad osvitů, založený na předpovědi počasí z Openweathermap, zásadně ovlivňuje cenu využití energie. Obrázek 25 zobrazuje průběhy výkonů při postupně nižším (0 %), ideálním (50 %) a vyšším (100 %) odhadu zamračení oblohy v průběhu dne. V prvním dni, kdy algoritmus očekává 100% výrobu, je následně nutno vlivem nepřesného odhadu nakoupit větší množství energie ve vysokém tarifu. Průběh druhého a třetího dne je při zadaném odběru 25 kWh téměř totožný. Pokud by byl denní odběr nižší, došlo by ve třetím dni při nepřesném odhadu vysokého zamračení ke zbytečnému nabíjení baterie nad maximální požadovanou hodnotu.



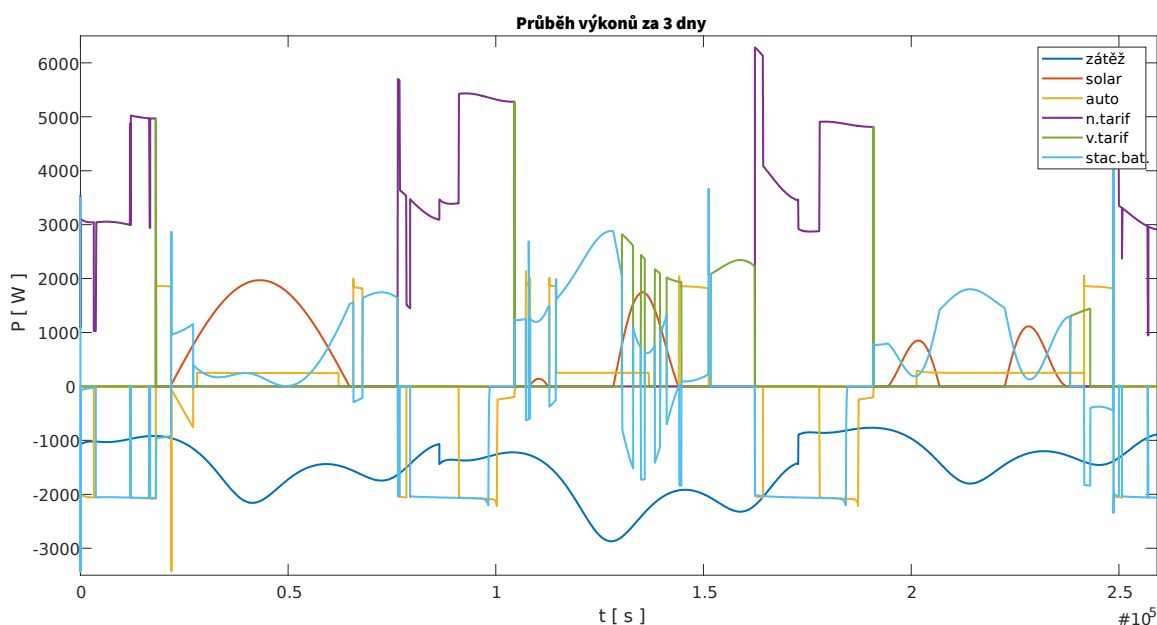
Obrázek 25: Průběhy výkonů při špatné predikci osvitu



Obrázek 26: Stav nabíjení baterií v průběhu dny se špatnou predikcí osvitu

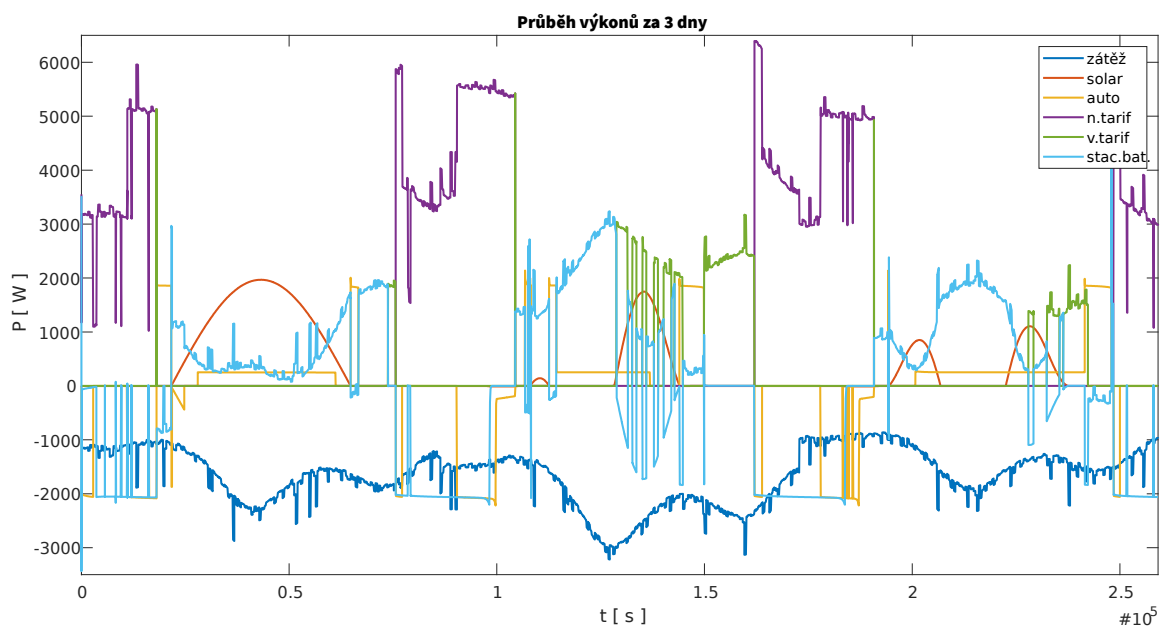
5.1.3 Výsledné chování navržené kombinace

Obrázek 27 slouží k porovnání a zobrazuje průběh výkonů bez zahrnutých skokových změn. Při simulaci na obrázcích 28, 29, 30 jsou již zahrnuty skokové změny odběru domácnosti. Ve všechny dny automobil odjíždí shodně v 7:45. První den je uvažován naprosto bezmračný s očekávaným odběrem v době vysokého tarifu 25 kWh. Uživatel požaduje nabití baterie na minimálně 39 %. Druhý den je očekávána 60 % oblačnost, odběr domácnosti 33 kWh a požadováno 26 % baterie. Třetí den je predikováno 90 % oblačnosti, 21 kWh odběr a elektromobil má být nabitý na 47 %.

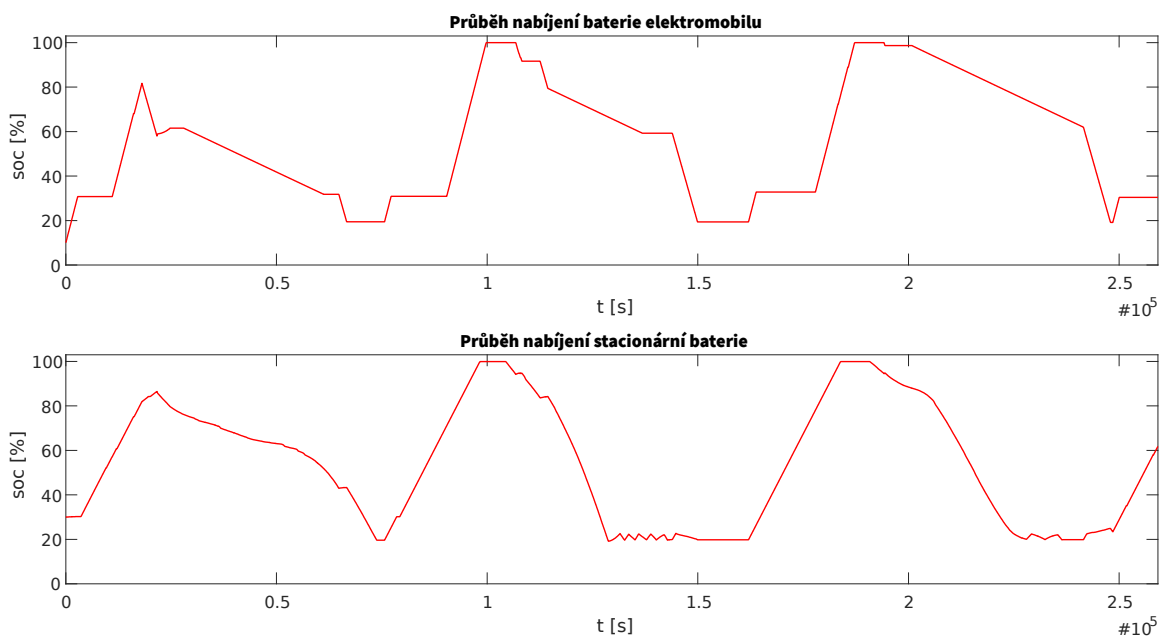


Obrázek 27: Průběh výkonů při testu běžného využití (bez skokových změn)

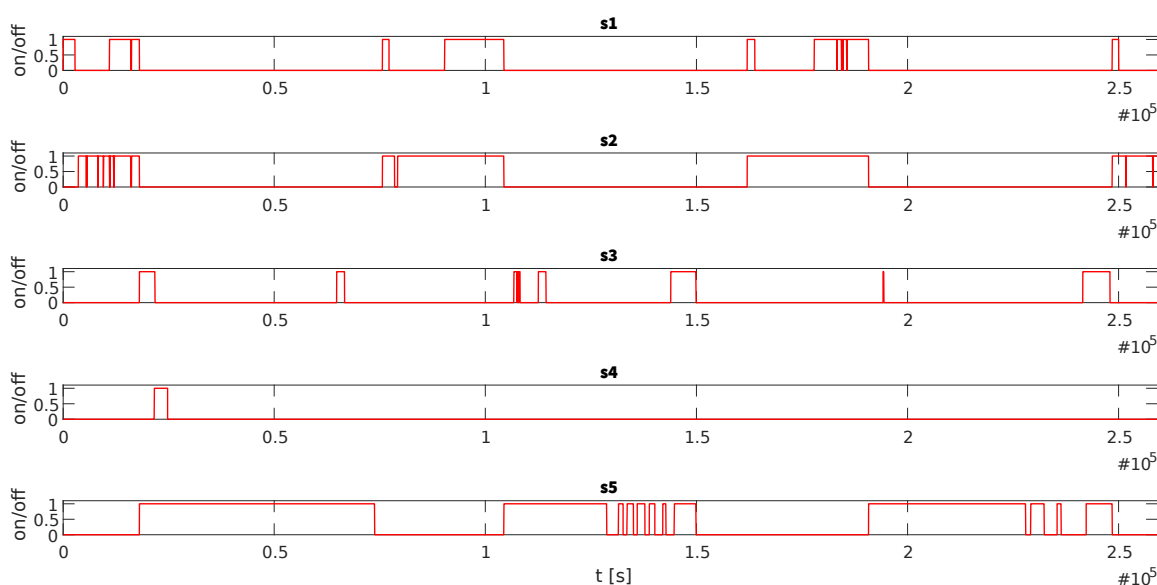
Hlavním rozdílem mezi simulací se zahrnutými skokovými změnami a bez nich je nejlépe viditelný v prvním dni. Zatímco na obrázku 27 (bez skokových změn) energie z baterií pokryje celodenní spotřebu, na obrázku 28 (včetně skokových změn) tomu tak není a dochází k odběru při vysokém tarifu. Zahrnutím změn byla mírně navýšena denní spotřeba domácnosti. Pro takové případy je v navrženém algoritmu zavedena proměnná určující rezervu oproti predikované spotřebě. Tu lze nastavit podle statistiky rozptylu odběru energie v jednotlivé dny a tím docílit pokrytí neočekávaných navýšení spotřeby.



Obrázek 28: Průběh výkonů při testu běžného využití (včetně skokových změn)



Obrázek 29: Stavy nabití baterií v průběhu testu běžného využití (včetně skokových změn)

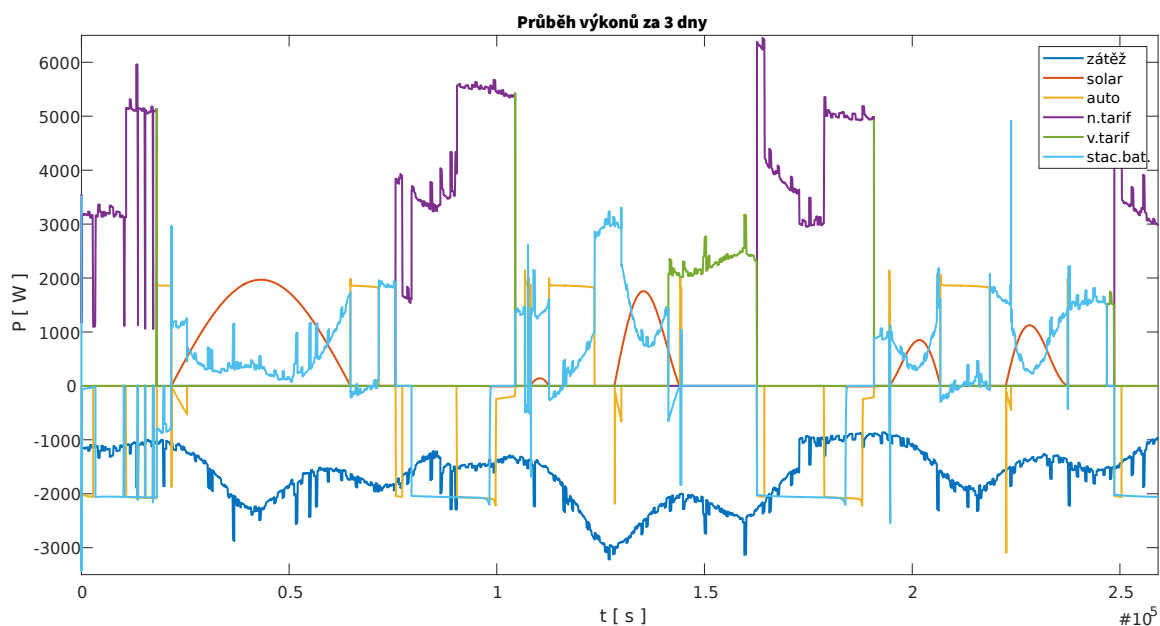


Obrázek 30: Průběh stavu přepínačů při testu běžného využití (včetně skokových změn)

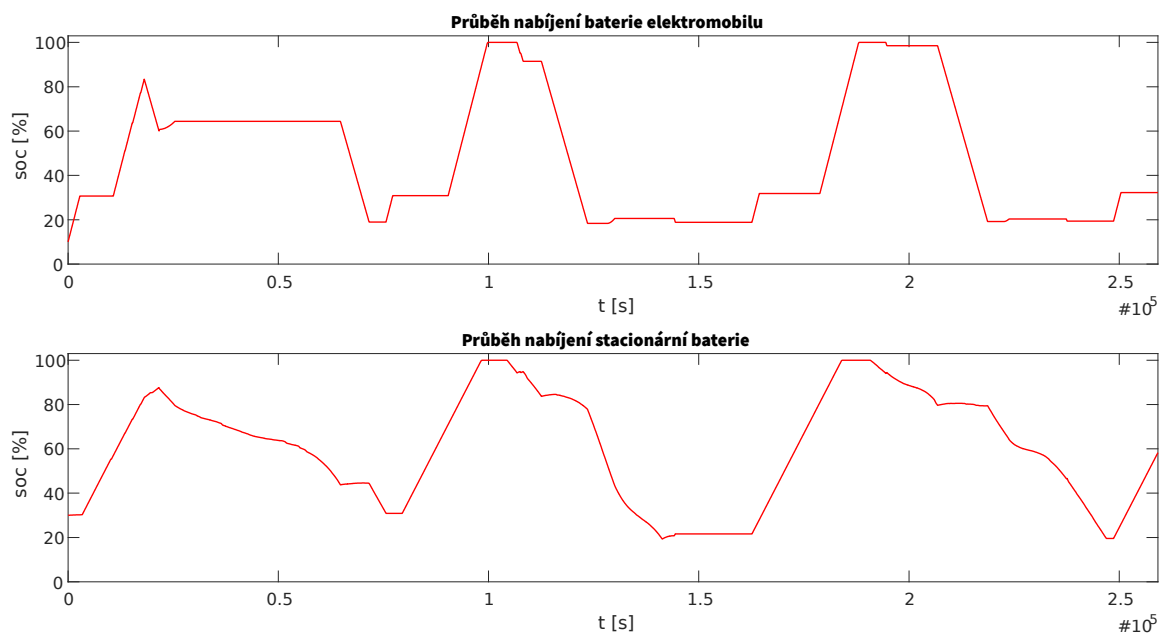
V průběhu simulace na obrázku 28 bylo první den v čase vysokého tarifu spotřebováno 28 kWh a z toho 27,1 kWh bylo pokryto z baterií a výroby solárních článků. Druhý den bylo z celkových 36,1 kWh v čase vysokého tarifu pokryto 21,5 kWh. Poslední den pak z celkových 23,7 kWh došlo k pokrytí 19,1 kWh z uložené a vyrobené energie. Pokud by bylo uvažováno, že veškerá tato energie ($27,1 + 21,5 + 19,1 = 67,7$ kWh) byla nakoupena v nižším tarifu a nikoliv část vyrobena fotovoltaickou elektrárnou, došlo by k úspoře 152,7 Kč ($2255,38/1000 \cdot 67,7$).

5.2 Elektromobil po celý den v mikrosíti

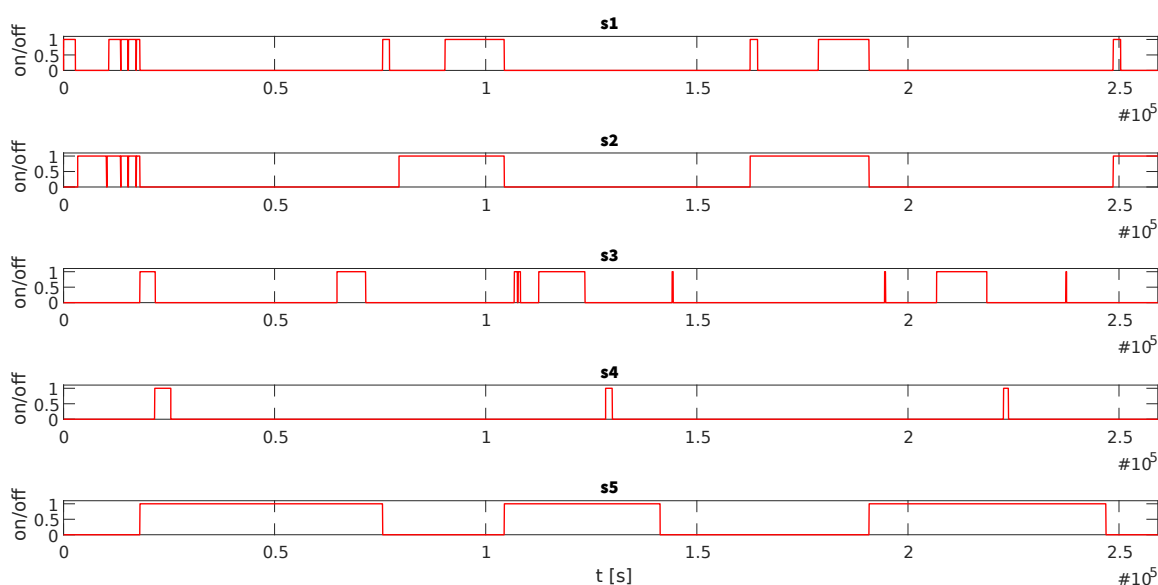
V běžném životě nastávají také dny, kdy elektromobil po celý den neopouští domácnost. Takový stav pak dovoluje považovat baterii elektromobilu taktéž za stacionární a využívat ji po celý den. Simulace na obrázcích 31, 32 a 33 očekává první den odběr 28 kWh v době vysokého tarifu, druhý den 36 kWh a třetí 24 kWh. Energie z baterií a solárních panelů pokryje 74,2 kWh z celkových 88 kWh, když první den je pokrytí 100%, druhý den 23,1 kWh z 36,1 kWh a třetí 23,1 kWh z 23,7 kWh. Při stejné úvaze nákupu zmíněných 74,2 kWh za nižší sazbu dojde k úspoře 167,3 Kč ($2255,38/1000 \cdot 74,2$).



Obrázek 31: Průběh výkonů při testu běžného využití ve dny bez odjezdu automobilu



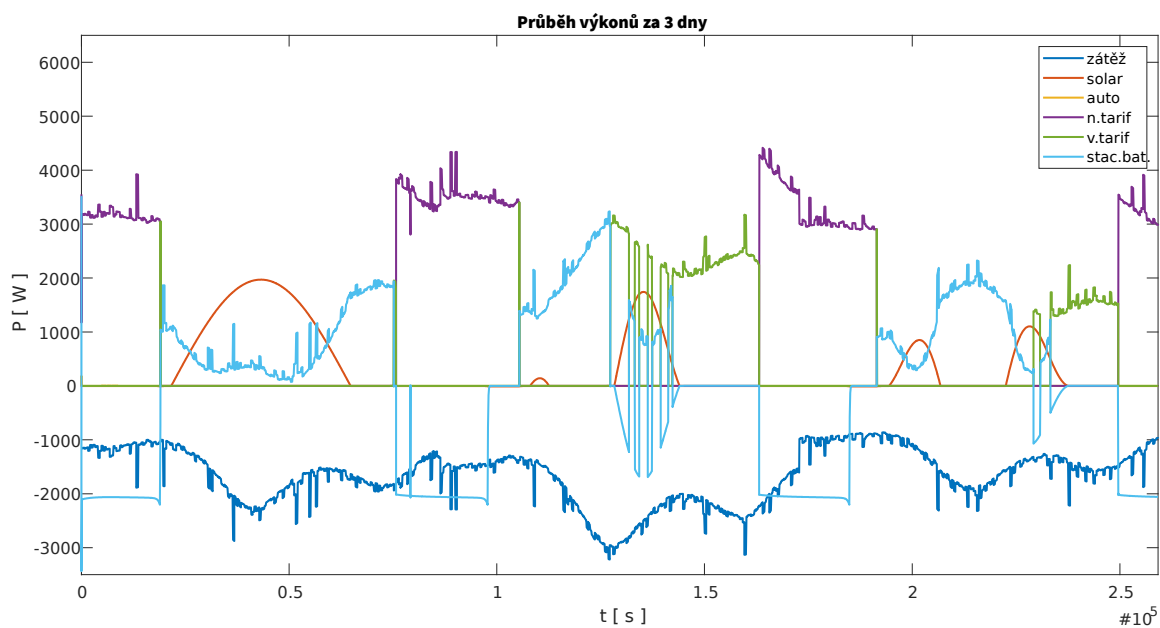
Obrázek 32: Stavy nabití baterií v průběhu testu běžného využití ve dny bez odjezdu



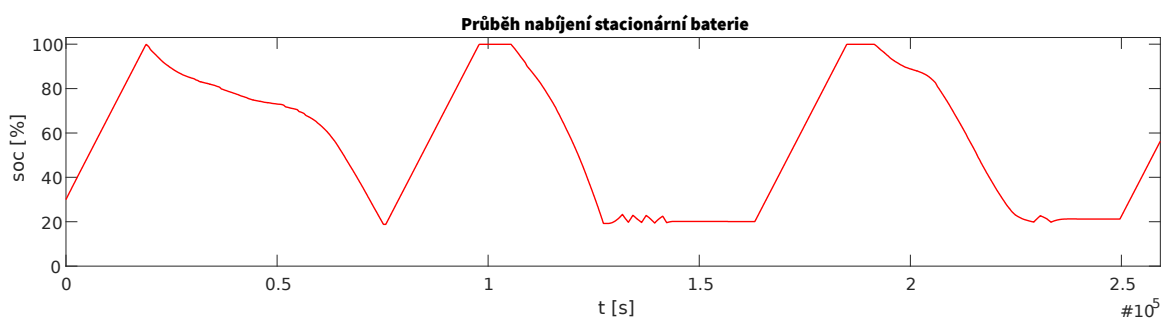
Obrázek 33: Průběh stavu přepínačů při testu běžného využití ve dny bez odjezdu

5.3 Dlouhodobá absence elektromobilu

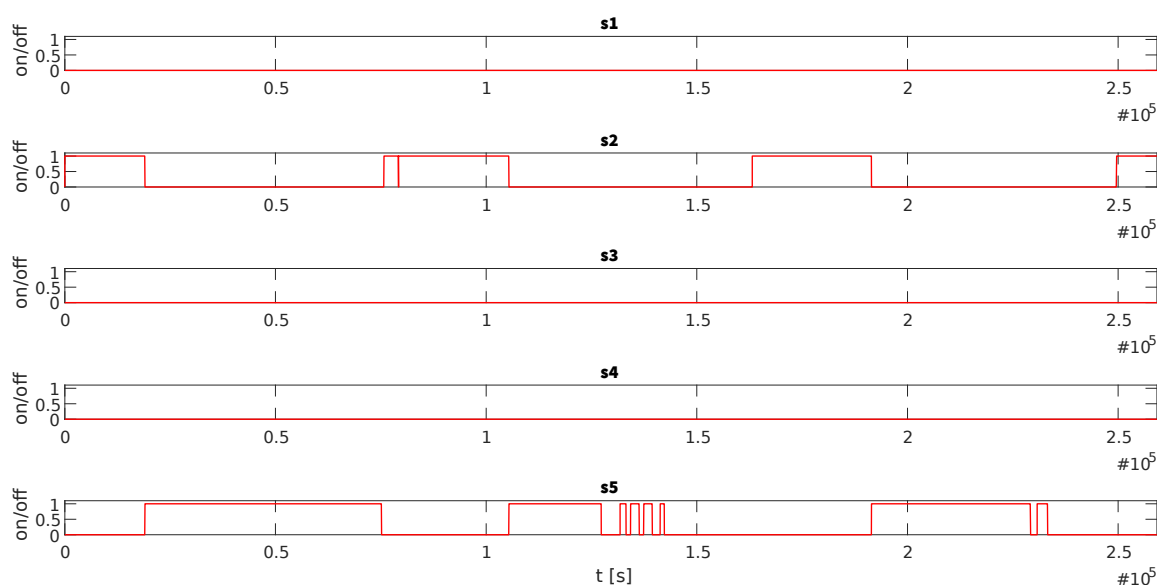
V průběhu dovolené, služební cesty či jiné příležitosti může nastat situace, kdy elektromobil na delší dobu opustí domácnost. Řízení se v takovou chvíli zredukuje na ovládání nabíjení stacionární baterie a přepínání zdroje energie pro domácnost. Následující dny je opět uvažován totožný odběr postupně 28, 36 a 24 kWh v průběhu vysokého tarifu. První den energie z baterií a fotovoltaických článků pokryje 27,4 z 28 kWh, druhý den s vysokým celkovým odběrem pak 17,2 z 36,1 kWh a poslední den 16,6 z 23,7 kWh. Celkově tedy dojde v průběhu vysokého tarifu k využití 61,2 kWh elektrické energie nakoupené v čase nízkého tarifu nebo vyrobené solární elektrárnou. Úvahou o nákupu veškeré této energie za cenu nižšího tarifu tak dojdeme k úspoře 138 Kč ($2255,38/1000 \cdot 61,2$).



Obrázek 34: Průběh výkonů při testu běžného využití ve dny bez automobilu



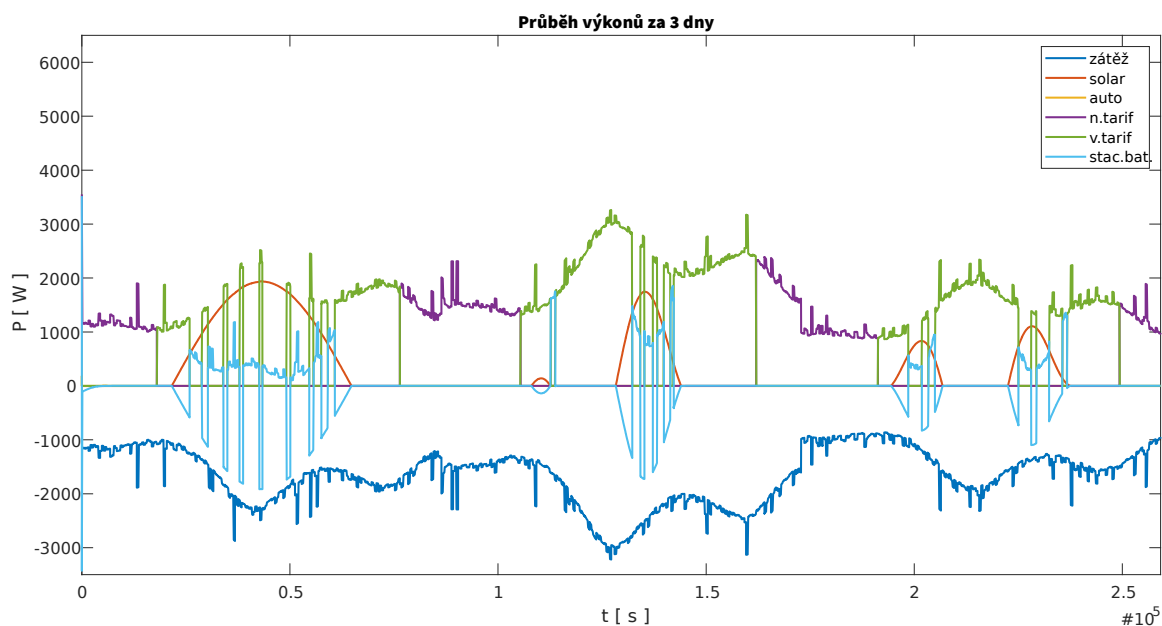
Obrázek 35: Stav nabití baterie v průběhu testu běžného využití ve dny bez automobilu



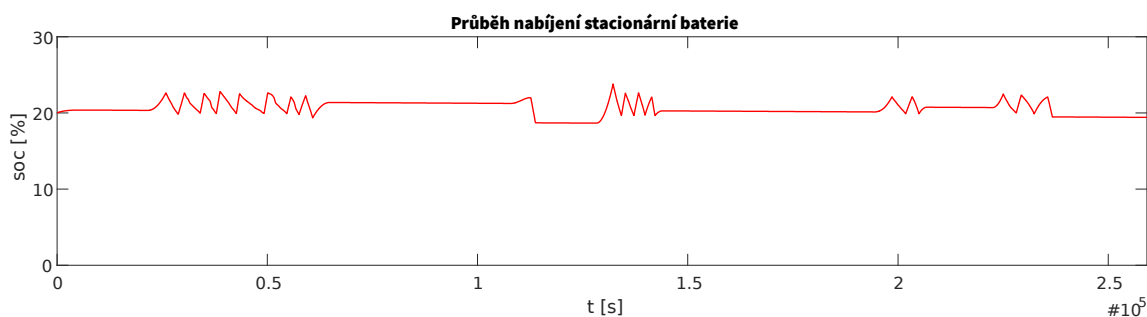
Obrázek 36: Průběh stavu přepínačů při testu běžného využití ve dny bez automobilu

5.4 Systém baterie a elektrárny bez řízení

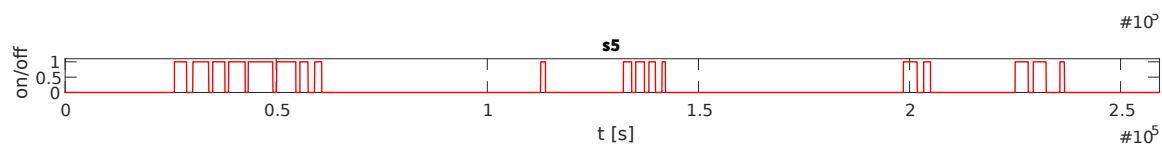
Pro porovnání vytvořeného řízení s běžným zapojením byl simulován systém, kdy fotovoltaická elektrárna nabíjí baterie a ty jsou využívány pouze když poskytují dostatek vyrobené energie. V příkladu bylo v průběhu 3 dnů vyrobeno a využito 23,4 kWh. Ve zmíněném příkladě dochází k upotřebení veškeré vyrobené energie. V průběhu roku však nastanou dny, kdy baterie již budou nabity na 100 % a energie vyrobená solární elektrárnou bude zmařena.



Obrázek 37: Průběhy výkonů v systému bez řízení



Obrázek 38: Stav nabití baterie v systému bez řízení



Obrázek 39: Stav přepínače určujícího zdroj napájení domácnosti

5.5 Vyhodnocení simulace, vyčíslení úspory

Simulace jednotlivých případů shrnuje tabulka číslo 3, v níž je porovnána spotřeba energie nakoupené v době vysokého nebo nízkého tarifu a využité v průběhu času vysokého tarifu. Poslední sloupec tabulky pak zobrazuje úsporu vytvořenou pouze nabitím v nízkém tarifu za simulované 3 dny. Všechny simulace probíhaly se stejnými parametry jednotlivých dní.

	Vysoký tarif [kWh]	Nízký tarif [kWh]	Vyrobeno elektrárnou [kWh]	Ušetřeno (3 dny) [Kč]
Odjezd/příjezd stejné dny	20,1	44,3	23,4	99,9
Dny bez odjezdu	13,6	50,8	23,4	114,6
Dny bez automobilu	26,6	37,8	23,4	85,3
System bez řízení	64,4	0	23,4	0

Tabulka 3: Shrnutí spotřebované energie a úspory v testovaných případech

V průběhu simulace bylo zjištěno, že maximální denní výroba elektrické energie v lokálních podmínkách je 14,4 kWh za 12 hodin slunečního svitu. Průměrně tak elektrárna vyrobí 1,2 kW za hodinu. Ve městě Plzeň ročně svítí slunce 1441 hodin, z čehož vyplývá roční výroba 1729,2 kWh [19]. V roce 2020 je 366 dní a z toho 251 pracovních, což znamená 115 dní (cca 31,5 %) volna. Při standardních 20 dnech (cca 5,5 %) dovolené zůstává 231 pracovních dní (cca 63 %).

Pro následující ilustrativní výpočet je tak na základě zmíněných dat stanoveno, že elektromobil bude provozován 75 % (274 dní) času v režimu s návratem ve stejný den, 15 % (55 dní) času v režimu v mikrosítí a 10 % (37 dní) času v režimu mimo domácnost. Pro výpočet budou využity průměrné hodnoty spotřeby při vysokém a nízkém tarifu získané z jednotlivých simulací. Pokud by byla taktéž využita průměrná hodnota výroby elektrické energie solární elektrárnou (simulace probíhá v srpnu), bylo by vypočteno vyrobení 2854,8 kWh. Dle údaje o počtu hodin slunečního svitu v průběhu roku však lze vyrobit jen 1729,2 kWh. Protože nelze určit, zda-li by bylo možné v danou chvíli dobít baterie, bude rozdíl těchto dvou hodnot (1125,6 kWh) rozdělen v odpovídajícím poměru

do spotřeby ve vysokém tarifu (v tabulce uvedeno v závorce). Následující tabulka číslo 4 shrnuje původ elektrické energie využití v průběhu času vysokého tarifu. Poslední sloupec zobrazuje úspory vytvořené pouze uložením/nákupem elektrické energie v době nízkého tarifu.

	Vysoký tarif [kWh]	Nízký tarif [kWh]	Výrobena elektrárnou [kWh]	Ušetřeno (1 rok) [Kč]
Odjezd/příjezd stejné dny	1835,8(+844,2)	4046,1	1296,9	9125,5
Dny bez odjezdu	249,3(+168,8)	931,3	259,4	2100
Dny bez automobilu	328,1(+112,6)	466,2	172,9	1051,5
Celkem	2413,2(+1125,6)	5443,6	1729,2	12277

Tabulka 4: Shrnutí spotřebované energie a úspory v testovaných případech za 1 rok

Při uvažované spotřebě domácnosti 14,64 MWh v roce 2020 lze při vytvořeném řízení ušetřit nabitím baterií v době nízkého tarifu a následným využitím energie v době vysokého tarifu, minimálně 12 277 Kč. V případě, že část energie přidané (z rozdílu výroby fotovoltaické elektrárny) do vysokého tarifu půjde uložit již s předstihem v době nízkého tarifu, bude úspora ještě vyšší.

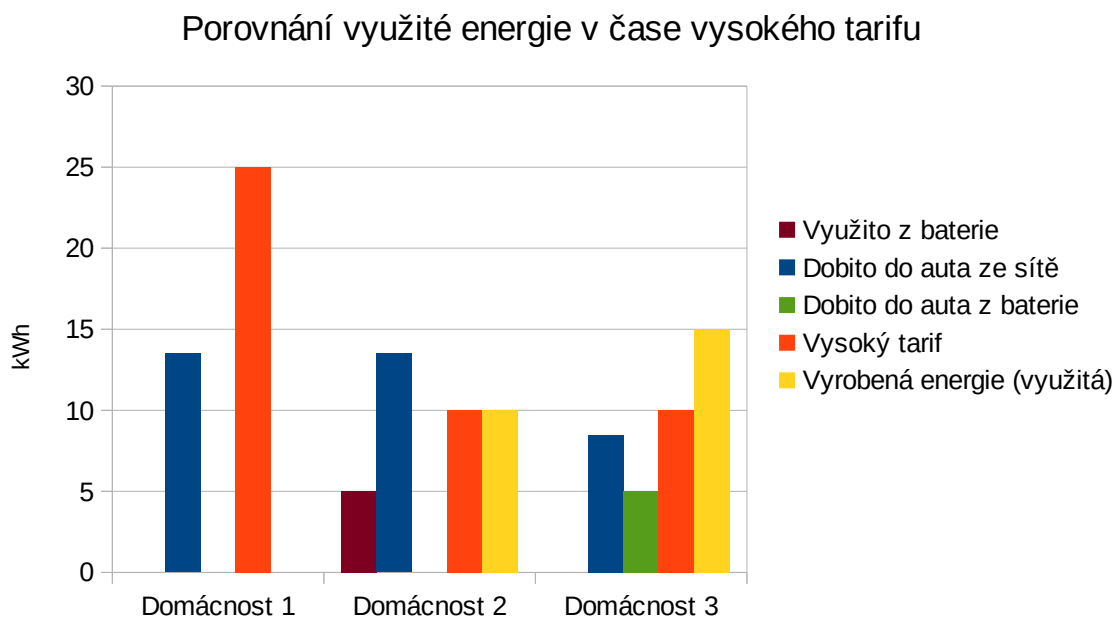
Další úspora vznikne díky predikci počasí a spotřeby, na jejímž základě se optimalizuje nabití baterií podle očekávaného denního slunečního svitu. Ve dny, kdy bude predikována vysoká výroba energie fotovoltaickou elektrárnou, pak dojde k využití většího množství této energie než v případě neřízeného systému. Díky přidanému řízení tak dojde nejen ke snížení nákladů na energie, ale i k využití většího množství ekologické energie z obnovitelných zdrojů.

Porovnání nákladů na energie v různých typech domácností při vysoké výrobě elektrické energie

V této kapitole budou porovnány tři modelové domácnosti se stejným odběrem elektrické energie a stejným elektromobilem. První domácnost využívá jako zdroj energie pouze elektrickou síť. Druhá domácnost má instalované fotovoltaické panely a bateriové

úložiště, ale není řízena navrženým řídicím systémem. Třetí domácnost má instalované stejné fotovoltaické panely a stejné bateriové úložiště, ale navíc je řízena v této práci vytvořeným řídicím systémem.

Následující graf (Obrázek 40) zobrazuje výsledné hodnoty využití elektrické energie v době vysokého tarifu. Jako modelový případ je uvažován den se spotřebou 25 kWh v době vysokého tarifu. V tento den je uvažována maximální možná výroba elektrárny a to 20 kWh, avšak v průběhu slunečního svitu je domácností spotřebováno pouze 5 kWh. Domácnosti 2 a 3 využívající fotovoltaickou elektrárnu, taktéž disponují bateriovým úložištěm o velikosti 10 kWh, které je z předchozího dne nabito shodně na 50 %. Všechny domácnosti pak využívají elektromobil s baterií o velikosti 15 kWh. Všechny domácnosti při příjezdu zapojí elektromobil, v jehož baterii zbývá 10 % (1,5 kWh) energie, do nabíječky a požadují elektromobil před odjezdem nabitý na 100%. U domácnosti 1 a 2 bez řízení dojde k neřízenému nabíjení baterie do doby maximálního nabití. V domácnosti 3, s řízením vytvořeným v této diplomové práci, je nabíjení regulováno vzniklým algoritmem využívajícím predikci spotřeby a osvitů panelů.



Obrázek 40: Porovnání využití energie ve třech modelových domácnostech

První domácnost nemá možnost využití bateriového úložiště ani fotovoltaických článků. Z tohoto důvodu při spotřebě 25 kWh v době vysokého tarifu nelze využít jinou energii.

Domácnost 2 má bateriové úložiště, které je z 50 % (5 kWh) nabitó z předchozího dne a disponuje fotovoltaickou elektrárnou, která může za den vyrobit až 20 kWh. V průběhu výroby je tedy část spotřeby (5 kWh) pokryta z elektrárny. Přebytečnou energii z výroby lze uložit do baterie, kde zbývá místo na 5 kWh. Zbylá spotřeba je pokryta z vysokého tarifu.

Domácnost 3 má také bateriové úložiště, které je z 50 % (5 kWh) nabitó z předchozího dne a také disponuje fotovoltaickou elektrárnou, která může za den vyrobit až 20 kWh. V průběhu výroby je tedy část spotřeby (5 kWh) pokryta z elektrárny. Zbylá spotřeba je pokryta z vysokého tarifu. Díky v této práci vyvinutému systému řízení s predikcí množství vyrobené elektrické energie na základě odhadu slunečního osvětlení je možno předem regulovat míru nabití stacionární baterie. V případě, že systém predikuje pro následující den vysoké množství osvětlení (elektrické energie vyrobené ze solárních panelů), umožňuje vyvinuté řízení přesunout předem elektrickou energii (zde 5 kWh) ze stacionární baterie do baterie elektromobilu a tím uvolnit větší kapacitu pro nabití stacionární baterie. Díky tomu bude možno uložit do stacionární baterie větší množství (zde 10 kWh) elektrické energie vyrobené fotovoltaickými panely, která by jinak nemohla být spotřebována.

V uvedeném případě dojde v domácnosti 3 (s řízením) k využití o 50% více elektrické energie z fotovoltaické elektrárny než v domácnosti 2 (bez řízení). Nasazením řízení tak bylo za jeden den ušetřeno minimálně 11,28 Kč. Při úvaze, že domácnost bez řízení nakoupila tuto energii ve vyšším tarifu, je pak uspořeno 21,5 Kč za jediný den.

6 Závěr

Hlavním cílem mé diplomové práce bylo navrhnout řízení toku elektrické energie v domácnosti s elektromobilem. V první kapitole jsem na základě požadavků na konfiguraci stanovil nejvhodnější zapojení mikrosítě, využívající 5 přepínacích prvků a rozhodl o využití samostatného DC-DC měniče s funkcí MPPT + samostatného DC-AC střídače namísto univerzálního hybridního střídače. Toto zapojení umožňuje navrhnout řízení tak, aby bylo možné využívat obě bateriová úložiště jako zdroj i spotřebič, nabíjet obě baterie z fotovoltaické elektrárny a navíc nabíjet baterie mezi sebou. To vše může probíhat i v průběhu napájení domácnosti z baterií.

Ve druhé části jsem odvodil stavový model systému a vytvořil simulační model v programu Matlab-Simulink, který nyní umožňuje navrhnout pro jakékoliv místo odebírající elektrickou energii odpovídající velikost fotovoltaické elektrárny a baterií. K takovému návrhu postačí dodání nebo umožnění získání statistiky o denním odběru elektrické energie.

Simulace byla tvořena ve třech fázích. V první fázi byla po vytvoření modelu navržena jednoduchá řídicí funkce v programu Matlab, která byla následně volána v průběhu každého kroku simulace. Tento princip však vede k nutnosti zavedení zpětné vazby o předchozích stavech, což není vhodné pro praktické nasazení.

Druhou fází tak bylo oddělení řídicí části od modelu a přenesení do programu REXYGEN. Zde již bylo možné využívat informace o předchozích stavech i bez zavedení zpětné vazby, a tak mohl být řídicí algoritmus rozšířen. Nejprve jsem uvažoval o návrhu prediktivního řízení s využitím kvadratického programování. Na základě vytvořeného stavového modelu navrženého systému jsem však zjistil, že zformulovaná úloha je úlohou prediktivního řízení hybridních systémů nebo přepínaných systémů (switched systems), pro kterou se kvadratické programování nedá použít. V literatuře [22] je uvedeno, že takové úlohy je možné omezeně řešit pro periody řízení v řádu hodin a nikoliv minut nebo sekund, jak by bylo zapotřebí v uvažovaném případě. Z tohoto důvodu jsem přešel k řešení zadaného problému pomocí řízení s predikcí osvitů a spotřeby domácnosti. V řídicím algoritmu tak byla vytvořena část zpracovávající data ve formátu JSON, která jsou průběžně získávána z portálu openweathermap.cz.

V třetí fázi simulace byl řídicí algoritmus přenesen na samostatný mikropočítač, na kterém již došlo k využití fyzických vstupů a výstupů. Model systému je tak v průběhu simulace spuštěn na PC v programu Simulink, zatímco řízení zajišťuje mikropočítač Raspberry PI s nadstavbou Monarco HAT. Jejich komunikace probíhá po síti. Řídicí program, běžící v mikropočítači, včetně nastavených výstupů a vstupů je nyní připraven k nasazení v reálném provedení mikrosítě.

Poslední kapitola diplomové práce se zabývá experimentálním ověřením jednotlivých situací, do kterých se může systém dostat. Na počátku je na základě simulací navržena velikost baterií a výkon fotovoltaické elektrárny pro domácnost se spotřebou 14,6 MWh ročně. Tato spotřeba odpovídá domácnosti o 3 osobách žijících v domě s rozlohou 100 m². Pro navrženou konfiguraci je následně otestován vliv špatné predikce osvitů nebo spotřeby. V mikrosíti mohou vzhledem ke stavu elektromobilu nastat 3 hlavní scénáře. V prvním elektromobil odjíždí a vrací se zpět ve stejný den. Tento scénář byl určen jako nejčastější. Další možností je odjezd automobilu a návrat po několika dnech, což může simulovat například dny dovolené. V poslední uvažované simulaci elektromobil po dobu minimálně jednoho dne neopouští domácnost. Taková situace může nastat například o víkendových dnech. Pro všechny tři uvedené scénáře byla provedena simulace tří po sobě jdoucích dnů, a spočtena úspora peněz oproti neřízenému systému. Na závěr bylo vypočteno, že v příkladovém roce 2020, kdy bude automobil na 75 % provozován s návratem ve stejný den, na 15 % provozován bez odjezdu a v 10 % případů bude mimo domácnost, bude ušetřeno více než 12 000 Kč za rok nabitím baterií v nízkém tarifu a využitím energie v době vysokého tarifu. Další úspora pak nasazení algoritmu přináší ve dny, kdy fotovoltaická elektrárna vyrobí více, než je možné spotřebovat. V takové dny algoritmus na základě predikce osvitů ponechá baterie v průběhu nízkého tarifu nenabité, přesune zbylou energii ze stacionární baterie do elektromobilu, a tím docílí uložení větší části vyrobené elektrické energie než systém bez řízení.

Navržený algoritmus již v tuto chvíli přináší velkou úsporu nákladů na energii a navíc dochází k většímu využití ekologické energie z obnovitelných zdrojů. Na vytvořeném řídicím systému lze dále pracovat a implementovat další vylepšení nad rámec této diplomové práce. Pro přesnější odhad průběhu nabíjení a výroby elektrické energie bude využíváno taktéž teploty okolí a panelů. Pro domácnosti s omezením výkonu sítě, například v podobě nízké hodnoty jističe, bude navržen řídicí systém pracující s tímto

omezením. Do řízení bude taktéž zapracováno omezení odebíraného výkonu ze stacionární baterie v případě výpadku elektrické sítě. Tím bude docíleno udržení důležitých funkcí v provozu po nejdelší možnou dobu. Dalším krokem k vylepšení navrženého řízení může být mobilní aplikace, umožňující v jakémkoli okamžiku a odkudkoliv zapnout co nejrychlejší nabíjení elektromobilu nebo změnit čas jeho odjezdu. Dále je plánováno rozvinutí spolupráce systémů v rámci chytré domácnosti ve smyslu průmyslu 4.0.

Literatura:

- [1] Grid_connected PV systém with MPPT control. ResearchGate | Find and share research [online]. Copyright © 2013 Publishing [cit.08.05.2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/247777365_GRID_CONNECTED_PV_SYSTEM_WITH_MPPT_CONTROL
- [2] Jak fungují ostrovní solární elektrárny? | E.ON. Pomáháme šetřit peníze i přírodu | E.ON [online]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/jak-funguji-ostrovní-solární-elektrárny>
- [3] Battery inverters vs hybrid inverters for home solar energy storage -Solar Choice. Aust's Only Instant Solar Quote Comparison Website | Solar Choice [online]. Copyright © Solar Choice Pty Ltd [cit.09.05.2020]. Dostupné z: <https://www.solarchoice.net.au/blog/hybrid-inverters-battery-inverters-home-energy-storage>
- [4] Ostrovni-elektrarny.cz Copyright © www.TRELL.cz [cit.09.05.2020]. Dostupné z: https://www.ostrovni-elektrarny.cz/index.php?category=menice-dc-ac-hybridni&detail=NTUwMTEy&detail_name=menic-victron-multiplus-48v-3000va-50a
- [5] Ostrovni-elektrarny.cz Copyright © www.TRELL.cz [cit.09.05.2020]. Dostupné z: https://www.ostrovni-elektrarny.cz/index.php?category=menice-dc-ac&detail=NDAwMDEy&detail_name=menic-victron-phoenix-48v-3000va-sinus
- [6] Nazeleno.cz – Chytrá řešení pro každého [online]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/wp-content/uploads/Files/FckGallery/Nov%C3%BD%20objekt%20-%20WinRAR%20ZIP%20archiv.zip/03.jpgspot%C5%99eba.png>

- [7] Parametry City S : elBlesk - Bouře v dopravě. elBlesk - Bouře v dopravě [online]. Copyright © 2019 Projekt elBlesk. [cit. 18.05.2020]. Dostupné z: <https://www.elblesk.cz/parametry-citys/>
- [8] Víte co je to MPPT? - SOLAR KERBEROS - solární ohřev vody. [online]. Copyright © [cit. 18.05.2020]. Dostupné z: <https://www.solar-kerberos.cz/cz/produkt/blog/211-vite-co-je-to-mppt>
- [9] Ceník - energie na dobu neurčitou - Skupina ČEZ [online] [cit. 18.05.2020]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/produkty-a-sluzby/obcane-a-domacnosti/elektrina-2020/moo/web-cenik_elektrina_dobu_neurcitou_moo_202001_cezdi.pdf
- [10] Monarco HAT (Raspberry Pi) | REXYGEN. REXYGEN | Programming automation devices without hand coding. [online]. Dostupné z: <https://www.rexygen.com/monarco-hat-raspberry-pi-platform/>
- [11] Balda, P.; Schlegel, M.; Severa, O.; Štětina, M.: Coordination of Distributed Energy Resources: Model Predictive Control Based Approach. In Proceedings of the 2019 22nd International Conference on Process Control (PC19), Štrbské Pleso, Slovakia, June 11 – 14, 37 – 42, 2019
- [12] E. Mayhorn et al., “Optimal control of distributed energy resources using model predictive control,” 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012, pp. 1-8.
- [13] REXLANG – User programmable block. REXYGEN | Programming automation devices without hand coding. [online]. Copyright © [cit. 21.05.2020]. Dostupné z: <https://www.rexygen.com/doc/ENGLISH/MANUALS/BRef/REXLANG.html#x266-26500015>

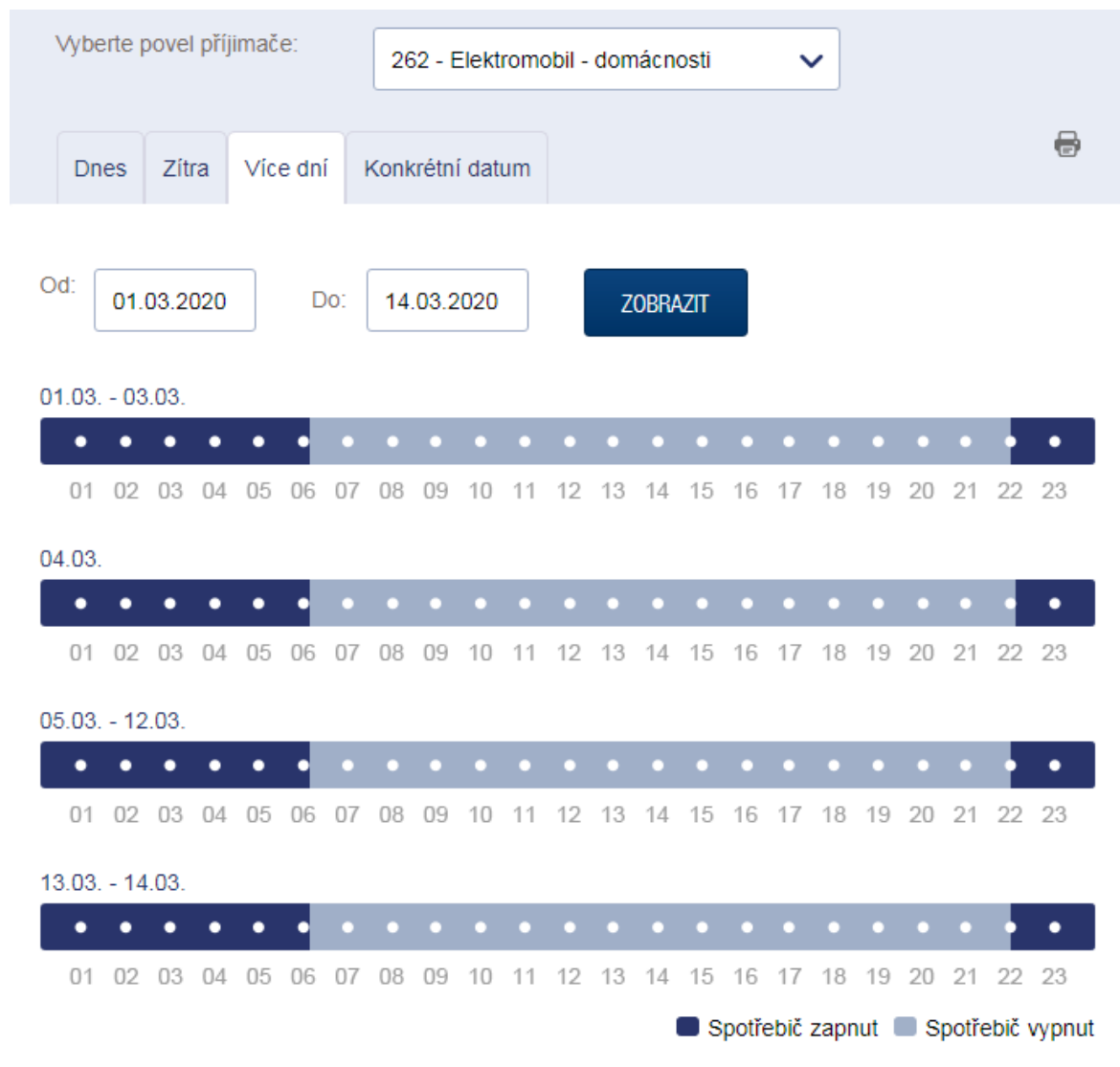
- [14] Current weather and forecast - OpenWeatherMap. Current weather and forecast - OpenWeatherMap [online]. Copyright © 2012 [cit. 21.05.2020]. Dostupné z: <https://openweathermap.org/>
- [15] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) | EU Science Hub. European Commission [online]. [cit. 21.05.2020] Dostupné z: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>
- [16] Ondřej Mikuláš: Quadratic Programming Algorithms for Fast Model-Based Predictive Control [online]. Copyright © [cit. 27.05.2020]. Dostupné z: https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/9/94/Bp_2013_mikulas_ondrej.pdf
- [17] Stav HDO | PREdistribuce, a. s.. [online]. Copyright © 2018 PREdistribuce, a. s. [cit. 28.05.2020]. Dostupné z: <https://www.predistribuce.cz/cs/potrebuji-zaridit/zakaznici/stav-hdo/>
- [18] Jak odhadnout spotřebu elektřiny v domácnosti | Přehled dodavatelů elektrické energie a zemního plynu. Dodavatelektřiny.cz - O energiích jasně a srozumitelně | Přehled dodavatelů elektrické energie a zemního plynu [online]. Dostupné z: <https://dodavatelektřiny.cz/uzitecne-informace/jak-odhadnout-spotrebu-elektřiny>
- [19] Průměrné měsíční doby slunečního svitu ve vybraných lokalitách ČR | Odborný portál pro stavebnictví a technická zařízení budov tzb-info.cz | Copyright © Topinfo s.r.o. [cit. 28.05.2020]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/99-prumerne-mesicni-doby-slunecniho-svitu-ve-vybranych-lokalitach-cr>
- [20] Model-Based Design | Humusoft – ve službách vědy a techniky | Copyright © HUMUSOFT 2020 [cit. 28.05.2020]. Dostupné z: <https://www.humusoft.cz/matlab/mbd/>

- [21] HiL pro testování aneb když potřebujete dostat do kanceláře autobus. SystemOnLine.cz - ekonomické a informační systémy v praxi [online]. Copyright © 2001 [cit. 28.05.2020]. Dostupné z: <http://m.systemonline.cz/rizeni-vyroby/hil-pro-testovani.htm>
- [22] Alberto Bemporad: Model predictive control of hybrid systems. 1st HYCON School on Hybrid Systems, Siena, Italy, July 19-22, 2015
- [23] Mikuláš, O.: Quadratic Programming Algorithms for Fast Model-Based Predictive Control. Bachelor Thesis, Czech Technical University in Prague, 2013.
- [24] Forschen für die Energiewende - Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE - Fraunhofer ISE [online]. Copyright © [cit. 01.06.2020]. Dostupné z: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf>

Přílohy

Softwarové položky příloh jsou uloženy na přiloženém CD

Časový plán nastavení nízkého a vysokého tarifu



Ukázka předpovědi počasí ve formátu JSON

```

{"cod":"200","message":0,"cnt":40,"list":[{"dt":1589716800,"main":
{"temp":289.44,"feels_like":285.51,"temp_min":289.44,"temp_max":290,"pressure":1022,
"sea_level":1021,"grnd_level":973,"humidity":51,"temp_kf":-0.56},"weather":
[{"id":800,"main":"Clear","description":"clear sky","icon":"01d"}],"clouds":
{"all":2},"wind":{"speed":4.35,"deg":327},"sys":{"pod":"d"},"dt_txt":"2020-05-17
12:00:00"}, {"dt":1589727600,"main":
{"temp":289.77,"feels_like":287.19,"temp_min":289.77,"temp_max":290.01,"pressure":10
21,"sea_level":1021,"grnd_level":972,"humidity":54,"temp_kf":-0.24},"weather":
[{"id":802,"main":"Clouds","description":"scattered clouds","icon":"03d"}],"clouds":
{"all":29},"wind":{"speed":2.77,"deg":326},"sys":{"pod":"d"},"dt_txt":"2020-05-17
15:00:00"}, {"dt":1589738400,"main":
{"temp":286.39,"feels_like":284.86,"temp_min":286.22,"temp_max":286.39,"pressure":10
22,"sea_level":1022,"grnd_level":973,"humidity":68,"temp_kf":0.17},"weather":
[{"id":802,"main":"Clouds","description":"scattered clouds","icon":"03d"}],"clouds":
{"all":46},"wind":{"speed":1.34,"deg":354},"sys":{"pod":"d"},"dt_txt":"2020-05-17
18:00:00"}, {"dt":1589749200,"main":
{"temp":281.61,"feels_like":280.26,"temp_min":281.55,"temp_max":281.61,"pressure":10
24,"sea_level":1024,"grnd_level":973,"humidity":78,"temp_kf":0.06},"weather":
[{"id":800,"main":"Clear","description":"clear sky","icon":"01n"}],"clouds":
{"all":0},"wind":{"speed":0.28,"deg":294},"sys":{"pod":"n"},"dt_txt":"2020-05-17
21:00:00"}, {"dt":1589760000,"main":
{"temp":279.65,"feels_like":278.18,"temp_min":279.65,"temp_max":279.65,"pressure":10
24,"sea_level":1024,"grnd_level":974,"humidity":84,"temp_kf":0},"weather":
[{"id":800,"main":"Clear","description":"clear sky","icon":"01n"}],"clouds":
{"all":0},"wind":{"speed":0.21,"deg":189},"sys":{"pod":"n"},"dt_txt":"2020-05-18
00:00:00"}, {"dt":1589770800,"main":
{"temp":278.62,"feels_like":276.64,"temp_min":278.62,"temp_max":278.62,"pressure":10
24,"sea_level":1024,"grnd_level":973,"humidity":86,"temp_kf":0},"weather":
[{"id":800,"main":"Clear","description":"clear sky","icon":"01n"}],"clouds":
{"all":0},"wind":{"speed":0.77,"deg":255},"sys":{"pod":"n"},"dt_txt":"2020-05-18
03:00:00"}, {"dt":1589781600,"main":
{"temp":283.53,"feels_like":282.18,"temp_min":283.53,"temp_max":283.53,"pressure":10
24,"sea_level":1024,"grnd_level":974,"humidity":77,"temp_kf":0},"weather":
[{"id":800,"main":"Clear","description":"clear sky","icon":"01d"}],"clouds":
{"all":0},"wind":{"speed":0.78,"deg":297},"sys":{"pod":"d"},"dt_txt":"2020-05-18
06:00:00"}, {"dt":1589792400,"main":
{"temp":288.86,"feels_like":286.89,"temp_min":288.86,"temp_max":288.86,"pressure":10
23,"sea_level":1023,"grnd_level":974,"humidity":58,"temp_kf":0},"weather":
[{"id":800,"main":"Clear","description":"clear sky","icon":"01d"}],"clouds":
{"all":0},"wind":{"speed":1.97,"deg":293},"sys":{"pod":"d"},"dt_txt":"2020-05-18
09:00:00"},"city":{"id":3339575,"name":"Vřeskovice","coord":
{"lat":49.5254,"lon":13.2711},"country":"CZ","population":550343,"timezone":7200,"sun
rise":1589685588,"sunset":1589741224}}

```

Vytvořený model v programu Matlab - Simulink

