

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh energetických toků v elektromobilu s fotovoltaickým nabíjením

Bc. Zdeněk Adrian Scheer

Diplomová práce

2021

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk Adrian Scheer**
Osobní číslo: **D19412**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**
Téma práce: **Návrh energetických toků v elektromobilu s fotovoltaickým nabíjením**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Zásady pro vypracování

Zjistěte použitelnost fotovoltaického systému dobíjení pro elektromobil z hlediska energie s ohledem na trakční a pomocné spotřeby vozidla. Navrhněte fotovoltaický systém dobíjení a vhodnou strategii dobíjení z hlediska energetických toků. Vyčíslete úspory energie.

Doporučený postup:

1. Rozbor efektů fotovoltaického dobíjení pro různé kategorie vozidel s elektropohonem s ohledem na trakční a pomocné spotřeby.
2. Rozbor pomocných spotřeb elektromobilu.
3. Návrh fotovoltaického systému pro elektromobil (po energetické stránce).
4. Návrh vhodné strategie dobíjení elektromobilu z hlediska energetických toků.
5. Vyčíslení přínosu fotovoltaického systému.

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

[1] HAYES, John G. a Gordon A. GOODARZI. Electric powertrain: energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles. Hoboken [NJ, USA]: Wiley, 2018. ISBN 1119063647.

[2] EHSANI, Mehrdad, Yimin GAO, Stefano LONGO a Kambiz EBRAHIMI. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. Third edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2018]. ISBN 978-1-4987-6177-2.

[3] ISABELLA, Olindo, Klaus JÄGER, Arno SMETS, René VAN SWAAIJ a Miro ZEMAN. *Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*. UIT Cambridge, 2016. ISBN 978-1906860325.

[4] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu*. Ostrava: HEL, 2011. ISBN 978-80-86167-33-6.

[5] Podklady poskytnuté vedoucím práce.

[6] Datasheety a aplikační poznámky výrobců komponent.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Zdeněk Mašek, Ph.D.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce:

7. prosince 2020

Termín odevzdání diplomové práce:

17. května 2021

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Dušan Čermák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 8. března 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA

Prohlašuji:

Práci s názvem Návrh energetických toků v elektromobilu s fotovoltaickým nabíjením jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 12.07.2021

Zdeněk Adrian Scheer

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych chtěl velmi poděkovat vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Zdeňku Maškovi, Ph.D., za trpělivost a cenné rady nejen při psaní této práce, ale i v celém studiu při práci na různých zajímavých projektech a semestrálních pracích, které mi výrazně pomohli rozšířit moje znalosti a vědomosti.

Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu nejen během období psaní této práce a celého studia, ale během všech 26 let mého dosavadního života.

Chtěl bych také poděkovat společnosti Hyundai Motor Czech s.r.o. a jejich dealerství Hyundai AUTO IN s.r.o. Pardubice za několikadenní zapůjčení vozidla Hyundai Kona Electric, na kterém probíhala část měření využitých v této práci.

Také děkuji svým kolegům z oboru, bez jejich podpory by toto náročné období studia, které bylo po dlouhou dobu ovlivněno okolnostmi, které my jsme ovlivnit nemohli, bylo ještě náročnější, jmenovitě bych chtěl poděkovat svému kolegovi z denního studia Ing. Antonínu Vávrovi, který mi v době, kdy bylo studentům zakázáno chodit do laboratoří poskytl zázemí pro provádění měření na elektromobilu.

ANOTACE

Diplomová práce se věnuje možnostem aplikace fotovoltaických panelů pro osobní silniční vozidla s elektrickým pohonem. Problematika je řešena především po energetické stránce. Nejprve jsou v práci obsaženy přehledy jednotlivých spotřeb elektromobilu a možnosti integrace solárních panelů do vozidla. Byly namodelovány průběhy výkonů fotovoltaických článků pro podmínky specifické pro jejich mobilní aplikaci. Jsou zde analyzovány jednotlivé možnosti využívání získané energie pro spotřeby elektromobilu z hlediska energetických toků v rámci elektromobilu. V závěru práce je shrnut celkový přínos fotovoltaického systému z pohledu energetického, ekonomického a ekologického.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektromobilita, energetické modelování, fotovoltaické nabíjení, solární vozidlo, nabíjení elektrických vozidel

TITLE

Design of energy flow in electric car equipped with photovoltaic charging

ANNOTATION

This diploma thesis deals with the possibilities of application of photovoltaic cells for personal vehicles with electric drive. The subject is approached mainly from the energetic viewpoint. The thesis opens with an overview of the individual consumptions of the vehicle and the possibilities of how the solar cells can be integrated into the vehicle. Various models for analyzing the efficiency of photovoltaic cells in transport applications are included. The individual possibilities of usage of the energy from the photovoltaic cells and a model of energy flows in the electric vehicle are analyzed. The final part of the thesis recapitulates the gains of the photovoltaic system from the viewpoint of energy, economy, and ecology.

KEYWORDS

electromobility, energy modelling, photovoltaic charging, solar vehicle, electric vehicle charging

OBSAH

Úvod.....	9
1 Zdroje a spotřeby elektromobilu.....	10
1.1 Zdroje energie v elektromobilu.....	10
1.1.1 Trakční akumulátor.....	10
1.1.2 Akumulátor pomocných spotřeb.....	11
1.2 Přeměna elektrické energie v elektromobilu.....	11
1.2.1 Palubní nabíječka.....	11
1.2.2 Střídač pro trakční spotřeby.....	12
1.2.3 Měnič pro napájení 12 V sítě.....	12
1.3 Trakční spotřeby.....	13
1.3.1 Vlastnosti elektromotorů.....	13
1.3.2 Porovnání trakčních spotřeb vozidel.....	13
1.4 Pomocné spotřeby.....	13
1.4.1 Topení a klimatizace.....	14
1.4.2 Vyhřívání skel a prvků v interiéru.....	15
1.4.3 Posilovače řízení a brzd.....	15
1.4.4 Osvětlení.....	16
1.4.5 Použití stejnosměrných motorků.....	16
1.4.6 Ozvučení vozidla a infotainment.....	16
1.4.7 Řídící jednotky.....	17
1.4.8 Naměřené hodnoty spotřeb na vozidle Hyundai Kona Electric.....	17
1.4.9 Stanovení podílu pomocných spotřeb.....	18
2 Rozbor efektů fotovoltaického systému nabíjení.....	19
2.1 Možnosti zástavby solárních panelů do vozidel.....	19
2.2 Fotovoltaické panely.....	20
2.2.1 Typy solárních panelů.....	20
2.2.2 Vybrané solární panely.....	20
2.2.3 Teoretický výkon fotovoltaických panelů.....	21
2.2.4 Odhad zisků panelů.....	22
2.2.5 Základní vztahy pro výpočet výkonu solárních panelů.....	22
2.3 Začlenění solárních panelů do vozidla.....	22
2.3.1 Vliv solárního nabíjení na spotřeby.....	22
2.3.2 Začlenění panelů do elektrické sítě elektromobilu.....	23
3 Energetický model fotovoltaických panelů.....	25
3.1 Způsob výpočtu výkonů solárních panelů.....	25
3.1.1 Intenzita dopadajícího záření.....	25
3.1.2 Úhel dopadu záření a atmosférické vlivy.....	26
3.2 Modely získané energie.....	29
3.2.1 Hodnoty pro simulační výpočet.....	29
3.2.2 Způsob výpočtu.....	30
3.2.3 Získaná energie pro různé orientace panelů.....	32
3.2.4 Roční období.....	34
3.2.5 Změna teploty.....	34
3.2.6 Vliv překážek.....	35
3.3 Geografické a klimatické hledisko.....	37

3.4	Získaná energie v průběhu dne	40
3.4.1	Teoreticky získatelná energie	40
3.4.2	Realistický denní průběh	41
4	Strategie dobíjení elektromobilu.....	42
4.1	Trakční odběr elektromobilu.....	43
4.1.1	Jízda ve městě	43
4.1.2	Jízda mimo město	44
4.1.3	Jízda na dálnici.....	45
4.2	Klimatizace a topení.....	46
4.3	Spotřeby napájené z 12 V akumulátoru	47
4.4	Zobecněný model využívání elektromobilu.....	48
4.5	Model s nabíjením 12 V akumulátoru.....	49
4.5.1	Možnosti zvýšení kapacity akumulátoru	52
4.6	Modely pro nabíjení vysokonapětového akumulátoru	53
4.6.1	Možnost využití měniče pro 12 V síť	55
4.7	Shrnutí strategie	56
4.7.1	Další možnosti budoucí optimalizace	56
5	Vyčíslení přínosu fotovoltaického systému	57
5.1	Výpočet energetických úspor	57
5.2	Výpočet snížení nepřímých emisí	58
5.3	Výpočet ekonomických úspor.....	58
5.3.1	Porovnání zemí světa	59
5.4	Negativní stránky	60
5.4.1	Zvýšení ceny vozidla	60
5.4.2	Degradace panelů.....	61
5.4.3	Bezpečnost a poškození panelu	61
5.5	Alternativy.....	62
	Závěr	63
	Seznam použitých zdrojů.....	64
	Seznam tabulek.....	68
	Seznam grafů	69
	Seznam obrázků.....	70
	Přílohy.....	71

ÚVOD

Automobilový průmysl se nachází v přelomové době, za téměř 150 let jeho existence prošla vozidla velkým vývojem, změnil se jejich vzhled, došlo k vylepšením po všech stránkách od karoserie až po využití mikroelektroniky ve vozidlech, ale základní princip fungování jejich pohonu na bázi spalovacího motoru zůstal až na naprosté výjimky zachován, až v posledním desetiletí se začínají postupně prosazovat vozidla s alternativními pohony, přičemž největší pozornost se v posledních letech zaměřuje na vozidla s elektrickým pohonem s energií uskladněnou v akumulátorech. Ale jako u všech nových technologií je nutné počítat s počátečními problémy. V případě elektromobilů těmito problémy v současnosti jsou jednoznačně vysoká cena a omezenější dojezd, způsobených vysokými cenami a stále ne zcela dostatečnými vlastnostmi v současnosti dostupných lithiových akumulátorů.

Tato diplomová práce se zabývá konceptem elektromobilu s fotovoltaickým nabíjením. Návrhem určitě není vozidlo, které by mohlo jezdit pouze na solární energii, ale které by pomocí fotovoltaického systému mohlo pokrývat nezanedbatelnou část svých spotřeb a díky tomu prodloužit svůj dojezd a snížit náklady provozování takového vozidla. Snahou v práci je se neupínat k jednomu způsobu řešení, ale analyzovat různé možnosti integrace fotovoltaického panelu do vozidla a také počítat s různými podmínkami, které mohou výslednou účinnost celého modelu ovlivňovat.

Cílem této práce je z energetického hlediska navrhnout fotovoltaický systém pro použití na elektromobilu. Aby tohoto cíle mohlo být dosaženo, je potřeba nejprve stanovit jednotlivé spotřeby, a to jak trakčních, tak pomocných spotřeb, tomuto tématu se věnuje první kapitola této práce. V druhé kapitole jsou shrnuty současné možnosti zástavby fotovoltaických panelů do vozidla jak z hlediska umístění panelů, tak z hlediska integrace do elektrické sítě vozidla. Dalším úkolem je stanovit výkon solárního panelu v závislosti na velkém množství podmínek, které mohou panel v mobilní aplikaci ovlivnit. Pro splnění tohoto úkolu je vytvořen simulační skript. Ve čtvrté kapitole jsou obsaženy spotřeby elektromobilu z praktických měření, pro různé způsoby jízdy a trasy a dále zde jsou také modelové případy, jak je možno získanou energii z panelů efektivně využívat a možnosti jejich uložení do akumulátorů. V poslední kapitole jsou shrnuty celkové přínosy integrace fotovoltaických článků do vozidla z různých úhlů pohledu, protože nelze na tuto problematiku pohlížet izolovaně, do úvahy je potřeba brát mnoho dalších faktorů.

1 ZDROJE A SPOTŘEBY ELEKTROMOBILU

V této kapitole se budeme zabývat popisem energetického hospodaření elektromobilu, zdroji elektromobilu a konverzí elektrické energie mezi sítí, zdroji a pohony elektromobilu. Podrobně zde také rozebereme pomocné spotřeby elektromobilu, které mají nezanedbatelný vliv na celkovou spotřebu a na závěr kapitoly provedeme odhad, kolik procent z celkové energie využijeme na pomocné spotřeby.

1.1 Zdroje energie v elektromobilu

V elektromobilech se běžně používá kromě trakčního akumulátoru i 12 V akumulátor, který slouží pro napájení palubní sítě. Technicky je proveditelné řešení, kdy bychom zcela upustili od zástavby 12 V akumulátoru a palubní síť by byla trvale napájena přes měnič z trakčního akumulátoru, takové řešení ale přináší nevýhodu v podobě problematické bezpečnosti. V případě, kdy je auto odstavené je vhodnější mít trakční akumulátor zcela odpojen, sníží se tak pravděpodobnost požáru kvůli problémům s trakčním akumulátorem. Také v případě detekce havárie je vhodné trakční akumulátor co nejrychleji odpojit, ale zároveň je třeba aby bezpečnostní systémy nadále fungovaly, jako například detekce kolize pro airbagy a systém volání pomoci E-Call, které mohou tak být i při a po kolizi nadále napájeny z pomocného akumulátoru, který je z hlediska rizika požáru bezpečnější než trakční akumulátor.

1.1.1 Trakční akumulátor

U všech současných elektromobilů se pro trakční baterii využívá článků na základu lithia, v současnosti se nejčastěji setkáme s lithiovou baterií s katodou s příměsí NMC, tedy niklu, manganu a kobaltu. Každému článku lithiové baterie musí vždy být nadřazen Battery management system (BMS), který hlídá stav nabití, napětí a proud na článku, tak aby se článek nemohl přebíjet.

Kapacita trakčních akumulátorů elektrických osobních vozidel se běžně pohybuje v desítkách kWh až kolem 100 kWh. Nabízí se zde srovnání s energií paliva uložené ve vozidle se spalovacím motorem, energetická výhřevnost benzínu či nafty je 8-10 kWh/l [1]. Při objemu nádrže 50 l tedy dokážeme uložit až 500 kWh energie, avšak vzhledem k nízké účinnosti spalovacího motoru dokážeme na kinetickou energii přeměnit pouze přibližně třetinu této energie

Nejčastěji se napětí kompletních baterií v elektromobilech pohybuje v rozmezí 200-400 V, u některých elektromobilů ale může být i 800 V. [2] Proudově musí stačit výkonům motorů, které

jsou v řádu desítek až stovek kW, maximální proudy odebírané z baterie tak budou v řádu stovek ampér, ale mohou být u výkonných elektromobilů i přes 1000 A.

1.1.2 Akumulátor pomocných spotřeb

Kapacita 12 V akumulátoru se pohybuje u běžných elektromobilů kolem 50 Ah, což je v přepočtu 0,6 kWh, jeho kapacita se tak pohybuje maximálně do 2 % kapacity trakčního akumulátoru. Obvykle je kapacita tohoto akumulátoru také o něco nižší, než bývají akumulátory u moderních vozidel se spalovacím motorem, protože u elektromobilu nepotřebujeme využívat nízkonapěťový akumulátor ke startování, a navíc ho můžeme v případě potřeby dobíjet z trakční baterie. Pro akumulátor 12 V sítě elektromobilu se využívá běžných olověných baterií, které také běžně najdeme u vozidel se spalovacím motorem, a to především z důvodu jejich široké dostupnosti, nízké ceny a bezpečnosti. Při nabíjení a vybíjení akumulátoru dochází k tepelným ztrátám, přičemž při vyšším procentu nabití se ztráty budou kvůli plynování zvyšovat, záleží také na stavu akumulátoru.

1.2 Přeměna elektrické energie v elektromobilu

V elektromobilech je třeba hned několik různých napětí. Baterie elektromobilu jsou stejnosměrný zdroj napětí. Elektromotory v moderních elektromobilech jsou výhradně střídavé. Dále se využívá stejnosměrná palubní síť pro pomocné spotřeby, obvykle o napětí 12 V. Také musíme brát v úvahu, že elektromobil budeme v určitých situacích nabíjet jak stejnosměrným proudem, tak střídavým. V elektromobilu tak potřebujeme minimálně tři hlavní měniče, a to palubní nabíječku, střídač pro trakční motor a měnič pro palubní síť, v reálném vozidle se nachází ještě o něco více měničů, například pro elektromotor kompresoru klimatizace nebo pro doplňkové 5 V napájení různých drobných spotřebičů.

1.2.1 Palubní nabíječka

Elektromobil můžeme nabíjet z běžných zásuvek, a to buď z jednofázových 230 V nebo třífázových 400 V, výkonové rozmezí pro toto nabíjení bude od 2 kW při nabíjení 10 A z jednofázové zásuvky až po 22 kW při nabíjení proudem 32 A z třífázové zásuvky. V každém případě ale zde musíme elektrickou energii usměrnit a upravit pro uložení do baterií elektromobilu pomocí usměrňovače. Jedná se o třífázový usměrňovač, součástí usměrňovače musí být galvanické oddělení od sítě, takže je běžně řešen jako spínaný zdroj s vysokofrekvenčním meziobvodem, aby použitý transformátor byl přijatelných rozměrů. Při jednofázovém nabíjení se použije stejný usměrňovač, akorát je využívána pouze část diodového můstku. Přepokládá se především jeden směr toku výkonu, a to ve směru z elektrické sítě

k bateriím vozidla, přestože stále častěji se uvažuje i o obousměrných nabíječkách, tak aby elektromobil byl schopen nabíjet další spotřebiče, případně vracet energii do sítě. V současnosti se u průmyslově vyráběných palubních nabíječek účinnost pohybuje v rozmezí 94-96 %. Účinnost bude záviset na tom, jestli budeme nabíjet z třífázové sítě či z jednofázové sítě a také na zatížení, při nízkém výkonovém odběru bude účinnost o něco menší, kolem 90 %. [3-5]

Dalším způsobem nabíjení elektromobilu je nabíjení stejnosměrným proudem u rychlonabíjecích stanic, kdy elektromobil po datové sběrnici komunikuje s vnější nabíječkou a určuje jaké bude napětí a dobíjecí proud, tok elektrické energie se pak už dále v elektromobilu nemění a už jde přímo do baterie. Výkon těchto nabíječek se pohybuje v řádu desítek kW. Účinnost nabíjení při tomto řešení závisí na konkrétním provedení vnější nabíjecí stanice, ale dá se předpokládat, že účinnost bude o něco lepší než jako v případě nabíjení pomocí palubní nabíječky, takže by běžně měla dosahovat více než 94 %. [6]

1.2.2 Střídač pro trakční spotřeby

Využívá se třífázového můstkového střídače, s tranzistory typu IGBT. Galvanické oddělení mezi trakční baterií a motorem není potřeba. Ve vozidle se může nacházet několik těchto střídačů, například jeden pro každý motor, záleží na konkrétním provedení. Výkon závisí na výkonu daného automobilu a může se pohybovat v širokém spektru od desítek až po stovky kW. U tohoto měniče počítáme i s opačným tokem výkonu, protože je potřeba při brzdění rekuperovat do baterií, střídače tohoto typu umožňují obrátit směr toku výkonu, bude pak fungovat jako plně řízený třífázový můstkový usměrňovač. Důležitá je vysoká účinnost tohoto střídače, protože se přímo podílí na účinnosti pohonného řetězce a ovlivňuje tak dojezd elektromobilu. Účinnost těchto střídačů je v běžných pracovních podmínkách 95-98 %.

1.2.3 Měnič pro napájení 12 V sítě

Mezi trakčním akumulátorem a 12 V sítí se nachází stejnosměrný měnič. Tento měnič má za úkol převést napětí trakčního akumulátoru, které může být u různých elektromobilů mezi 200 V až 800 V na napětí palubní sítě elektromobilu, která má téměř vždy jmenovité napětí 12 V. Měnič také musí kvůli bezpečnosti galvanicky oddělovat obě části. To znamená, že tento měnič bude muset vždy obsahovat střídavý meziobvod s transformátorem. U měničů tohoto typu můžeme počítat s průměrnou účinností kolem 90-95 %. Běžně se předpokládá pouze s tokem výkonu od trakčního akumulátoru směrem do palubní sítě, většina typických návrhů těchto měničů by však umožňovala i opačný směr toku výkonu. Výkonově jsou tyto měniče

dimenzovány v nízkých jednotkách kW, běžně kolem 1-3 kW, tak aby stačily pomocným spotřebám a dobíjení pomocného 12 V akumulátoru.

1.3 Trakční spotřeby

1.3.1 Vlastnosti elektromotorů

V elektromobilech se využívá především třífázových synchronních motorů s permanentními magnety, v menší míře se můžeme setkat i s asynchronními motory. V některých vozidlech se můžeme setkat i s kombinací těchto motorů, například verze automobilu Tesla Model 3 s pohonem všech kol má pro pohon přední nápravy motor asynchronní a pro pohon zadní nápravy synchronní motor. Hlavní výhodou střídavých motorů je absence komutátoru a jejich široká říditelnost pomocí frekvenčních měničů, díky čemuž se ve většině elektromobilů využívá pouze jednostupňové převodovky. Synchronní motory mají o něco lepší účinnost než motory asynchronní, protože zde nedochází k elektromagnetickým ztrátám v obvodu rotoru.

1.3.2 Porovnání trakčních spotřeb vozidel

Současné elektromobily se svými spotřebami liší, u běžných vozidel lze počítat se spotřebou kolem 15 kWh na 100 km. U větších vozidel, kde hmotnost převyšuje 2 tuny, tak může spotřeba být téměř 30 kWh na 100 km. Elektromobily jsou vzhledem k možnosti rekuperace v městském provozu hospodárnější, při jízdě vyšší rychlostí však spotřeba rychle stoupá.

Tabulka 1.1 – porovnání vlastností vybraných elektromobilů [7][8]

Elektromobil	Hmotnost	Výkon	Spotřeba (WLTP)
VW e-up!	1160 kg	61 kW	12,9 kWh/100 km
Hyundai Kona Electric	1789 kg	150 kW	14,7 kWh/100 km
Porsche Taycan	2305 kg	500 kW	28 kWh/100 km

1.4 Pomocné spotřeby

Tato podkapitola má za cíl uvést ucelený přehled netrakčních spotřeb elektromobilu, konkrétní hodnoty výkonů komponent slouží však pro přibližnou představu náročnosti spotřeb, mohou se v různých vozidlech a podmínkách lišit. Většina komponent pomocných spotřeb elektromobilu je podobná elektrickým komponentám u vozidla se spalovacím motorem, je však obvykle kladen větší důraz na jejich maximální úspornost. Největším rozdílem je potřeba řešit vytápění elektricky. Některé spotřeby ale mít nebudeme, jako například palivové, olejové čerpadlo a startér. Většina pomocných spotřebičů je napájena z 12 V sítě elektromobilu, s výjimkou

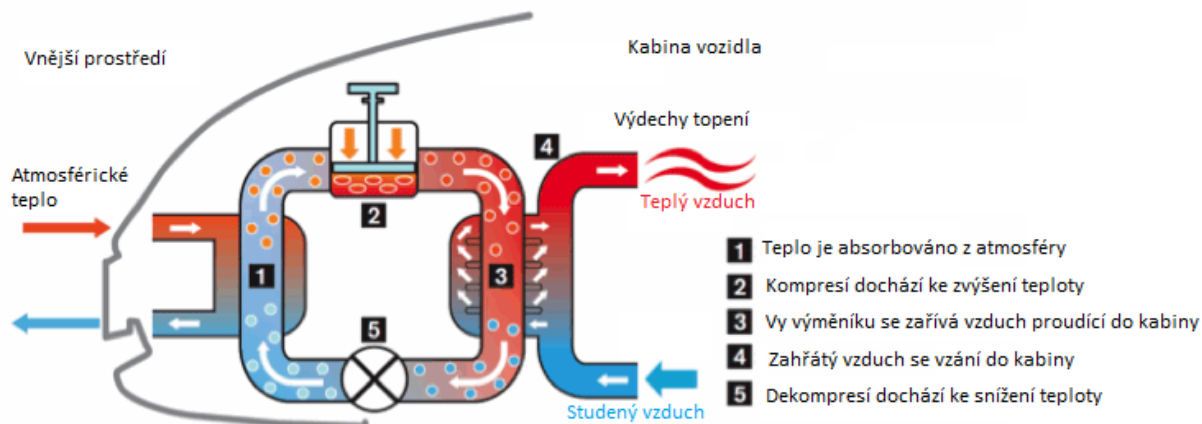
vytápění, klimatizace a okruhu pro zahřívání a chlazení baterie, která je přímo připojena na trakční akumulátor, z kterého se napájí trakční střídač a měnič pro palubní síť.

1.4.1 Topení a klimatizace

Jedná se o energeticky nejnáročnější pomocnou spotřebu automobilu. V případě vozidel se spalovacím motorem nemusíme řešit zdroj tepla, jelikož můžeme využít přebytečné teplo spalovacího motoru. Tuto možnost u elektromobilu vzhledem k vysoké účinnosti elektromotoru nemáme, a tak se nám vytápění promítne přímo do spotřeby, a to i v řádu desítek procent z celkové spotřeby. V případě chlazení bude situace obdobná, zde i u vozidel se spalovacím motorem se může zvýšit spotřeba o 1 litr za hodinu a spotřebovávat tak i 20 % z celkové energie, s podobným poměrem energie pro chlazení musíme počítat i u elektromobilu.

Jedním způsobem, jak vytápět vozidlo může být elektrické odporové topení. Toto řešení má výhodu především v jednoduchosti a nízké ceně. Špičkový příkon elektrického vytápění může být až 10 kW, běžně se však bude jednat o příkon kolem 2 kW. Klimatizace, v případě že je jí vozidlo vybaveno, je pak řešena klasickým kompresorovým klimatizačním systémem, kde se příkon pohybuje v řádu jednotek kW.

Obrázek 1.1 – princip tepelného čerpadla, upraveno a převzato [9]



Další možností je využití tepelného čerpadla, princip tepelného čerpadla je zobrazen a popsán na obrázku 1.1. Oproti odporovému topení se jedná se o výrazně dražší variantu, ale výrazně hospodárnější. U odporového topení měníme elektrickou energii na tepelnou ve stejném poměru, ale u tepelných čerpadel můžeme získat až čtyřikrát více tepelné energie, než tepelné čerpadlo spotřebuje elektrické energie. Další výhodou je, že tepelná čerpadla využívaná v automobilovém průmyslu umožňují obrátit směr toku tepelné energie a můžeme tak stejný systém využívat jak pro vytápění, tak pro chlazení vozidla.

V současnosti se lze setkat u elektromobilů v praxi s oběma variantami vytápění vozu, všechny vozy značky Tesla, kromě nejnovějšího modelu Tesla Y a dále například první generace Nissan Leaf mají odporové topení. Mezi vozy s vytápěním pomocí tepelného čerpadla patří například Audi e-tron, Hyundai Kona Electric (pouze vyšší výbavové stupně) a mnoho dalších vozidel. Tento druh vytápění se v současnosti stále více prosazuje, a to jak pro vytápění budov, tak nyní i v elektromobilitě, vzhledem k hledání co nejvyšší úspornosti lze očekávat, že postupně v elektromobilech nahradí odporová topení.

1.4.2 Vyhřívání skel a prvků v interiéru

Vyhřívání zadního skla obvykle bývá řešeno pomocí vyhřívaného odporového drátu ve skle. U předního skla se ve většina případů využívá řešení vysoké intenzity ofukování skla horkým vzduchem, nebývá zde na to dedikovaný systém. Dále jsou běžně vyhřívány také zrcátka automobilu.

U některých automobilů vyšších tříd jsou vyhřívány i prvky v interiéru, jako například volant a sedačky. Spotřeby těchto prvků jsou ve stovkách wattů, obvykle je to ale méně, než je spotřeba vytápění vozu vzduchem. Z hlediska spotřeby se tak může vyplatit vyhřívát pouze tyto prvky než celou kabinu.

1.4.3 Posilovače řízení a brzd

V osobních automobilech se využívá tři základních principů posilovače řízení a to hydraulického, elektrohydraulického nebo elektromechanického. V elektromobilech se využívá především posilovačů elektromechanických, vzhledem k jejich nižší energetické náročnosti. Do energetického modelu nám posilovač řízení zasáhne především při jízdě ve městě, kde vozidlo častěji zatáčí v nízkých rychlostech.

U elektromobilu lze využít klasického vakuového posilovače brzd, musíme však vzhledem k absenci podtlaku od motoru přidat vývěvu. Případně lze využít i elektromechanického posilovače brzdění, tyto typy posilovačů mají typicky výkon až 500 W. [10] V případě elektromobilu však bude jeho využití menší, mechanické brzdy se využívají pouze v některých případech, a to při velmi prudkém brzdění, při dobrzdování při velmi nízkých rychlostech a v případě, že máme plně nabitou baterii, ve všech ostatních případech se bude využívat především rekuperačního brzdění.

1.4.4 Osvětlení

Historie elektrického osvětlení motorových vozidel sahá více než 100 let zpátky, v současnosti se můžeme setkat hned s několika technologiemi osvětlení vozidel. Využívá se jak halogenových žárovek, tak xenonových výbojek tak osvětlení na principu LED. V elektromobilech se v drtivé většině setkáme právě se světly LED, protože v porovnání s halogeny mají až o 75 % menší spotřebu. Běžné halogenové potkávací světlo typu H4 má příkon 55 W, s LED osvětlením se bude pohybovat do 20 W. Mezi další světelné spotřeby patří obrysová světla, blinkry, přední a zadní mlhová světla, brzdová světla, osvětlení SPZ a couvací světla. Většina aut pak obsahuje různé množství vnitřního osvětlení, svícení v kufru, či podsvícení různých prvků.

Sice se v součtu v případě LED pohybujeme pouze kolem 100 W za celé osvětlení, ale některá mají trvalejší či stálý charakter, minimálně mít zapnutá přední potkávací světla je v mnoha zemích povinné i přes den a bude nám tak odebírat energii vždy, takže osvětlení se nám do určité míry do spotřeb promítnout může.

1.4.5 Použití stejnosměrných motorků

Ve vozidle najdeme velké množství stejnosměrných motorků, využívá se obvykle motorů stejnosměrných bezkomutátorových nebo stejnosměrných s permanentními magnety. Jejich výkony se v automobilních aplikacích pohybují nejčastěji v desítkách až nízkých stovkách W. Využívají se například pro pohon stahování oken, stěrače a pro odstředivé čerpadlo pro dopravu kapaliny pro ostřikování skel [11], dále ve vozidlech vyšších tříd i pro polohování sedaček, otevírání a zavírání pátých dveří, či pro sklápění zrcátek. Většina těchto spotřeb ale bude mít spíše krátkodobý charakter a výrazně se do celkové spotřeby nepromítne.

1.4.6 Ozvučení vozidla a infotainment

Ozvučení vozidel se může výrazně lišit podle stupně výbavy vozidla, od základních typů se čtyřmi kanály, majících špičkový výkon kolem 150 W až po výbavy s více než 20 reproduktory a výkonem až 700 W. Jedná se však o špičkové výkony a nelze předpokládat, že by řidič měl ve vozidle puštěnou reproduktorovou soustavu na maximální hlasitost. Při typickém užívání jako je poslech rádia či přehrávání hudby při běžné hlasitosti můžeme počítat s příkonem kolem 50 W.

Mezi prvky infotainmentu se řadí různé displeje, digitální budíky nebo například navigace. Ve vozidle se také nachází různá podsvícená tlačítka v interiéru a vnitřní osvětlení vozu. Dále se běžně ve vozidle nachází autozásuvky, přičemž se většinou používají pro drobné spotřebiče

jako jsou nabíječky pro mobilní telefony. Celkově tyto spotřeby nebudou příliš výrazné, budeme se obvykle pohybovat v nižších desítkách W.

1.4.7 Řídící jednotky

Moderní automobil obsahuje větší množství řídicích jednotek, které spolu komunikují po sběrnících. I tyto jednotky jsou napájeny z palubní sítě automobilu. Dále obsahuje vozidlo různé elektrické senzory, jako senzory pro protiskluzový systém, kontrola tlaku v pneumatikách, různá čidla teploty, dešťový senzor a mnoho dalších. V součtu tak celá tato řídicí elektronika může mít příkon několika desítek W.

1.4.8 Naměřené hodnoty spotřeb na vozidle Hyundai Kona Electric

Provedli jsme měření na reálném vozidle zaměřené na odběry pomocných spotřeb. Měření bylo provedeno na přívodu k 12 V akumulátoru, na kterém v době měření bylo napětí kolem 14,7 V. Výsledky tohoto měření jsou shrnuty v tabulce 1.2. Ihned po nastartování bez zapnutých spotřeb má vozidlo odběr kolem 20 A, které spotřebovávají jednotky a prvky v interiéru, které nelze vypnout, jako například displeje.

Tabulka 1.2 – naměřené hodnoty pomocných spotřeb elektromobilu Hyundai Kona Electric

Spotřebič	Odběr	Příkon
Stálý odběr vozidla po zapnutí zapalování	15 A	216 W
Posilovač řízení	20–60 A	294–882 W
Potkávací světla	8 A	118 W
Vnitřní osvětlení	2 A	29,4 W
Stěrač přední	5A	74 W
Větrák v kabině	10–20 A (podle intenzity)	147–294 W
Stahování oken	20 A	294 W
Vyhřívání předních sedaček	15 A	221 W
Vyhřívání volantu	10 A	147 W
Vyhřívání zadního okna	30 A	441 W
Centrální uzamknutí	20 A	294 W

Takto měřené spotřeby jsou pouze orientační, záleží na mnoha okolnostech, jako například na teplotě. Můžeme si však vytvořit obrázek o odběru jednotlivých spotřeb. Tyto hodnoty jsou však okamžité spotřeby a nepromítnou se ve stejném poměru do energetické bilance vozidla, protože některé spotřeby, jako například osvětlení a klimatizace se využívají stále či velmi často

a některé pouze nárazově, jako například elektronický posilovač řízení či elektromotorky stahování oken. Z naměřených jízd je v praxi průměrný odběr spotřebičů zapojených do 12 V sítě kolem 275 W při jízdě ve městě v letním dni na konci června, kdy z 12 V spotřebičů bylo využíváno pouze denní svícení a další spotřebiče v kabině nebyly puštěny. Klimatizace puštěna byla, ta však není napájena z 12 V sítě, v činnosti ale byl ventilátor, který vhání vzduch do kabiny.

1.4.9 Stanovení podílu pomocných spotřeb

Samozřejmě se budou pomocné spotřeby lišit v závislosti na množství zapnutých komfortních prvků v interiéru, ale také na okolních vlivech, jako například teploty. Pro stanovení konkrétního podílu pomocných spotřeb můžeme zvolit různé způsoby. Analytickým způsobem, kdy stanovíme, kolikrát a jak dlouhou dobu a se pomocné spotřeby využívají. Dalším způsobem může být měření v provozu za reálných podmínek.

Pomocné spotřeby mohou být mezi 10-50% celkové spotřeby vozidla, přičemž nejvyšší hustota pravděpodobnosti podílu pomocných spotřeb je kolem 25 %. Při nižších rychlostech je podíl pomocných spotřeb vyšší než při vyšších, protože s nižší rychlostí klesá energie využitá na pohon vozidla, avšak pomocné spotřeby jsou z většiny nezávislé na rychlosti jízdy vozidla. Největší podíl pomocných spotřeb má jednoznačně vytápění či klimatizace vozidla, které v určitých podmínkách může spotřebovávat až 30% celkové využívané energie elektromobilu. Další pomocné pohony napájené z 12 V sítě mohou spotřebovávat 5-15 % celkové energie v závislosti na typu jízdy, ve městě obvykle jsou tyto spotřeby procentuálně vyšší. [12, 13]

2 ROZBOR EFEKTŮ FOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU NABÍJENÍ

Cílem této kapitoly je stanovit možnosti využití solárních panelů na vozidlech. V současnosti se elektromobily se solárním dobíjením příliš nevyskytují, existují však již různé koncepty, na kterých můžeme vidět jakým způsobem lze zástavbu fotovoltaických panelů do vozidel realizovat. Dále zde budou popsány základní možnosti integrace panelů do elektrické sítě elektromobilu.

2.1 Možnosti zástavby solárních panelů do vozidel

Možnosti zástavby solárních panelů do osobních silničních vozidel jsou limitovány především velikostí využitelných ploch vhodných pro umístění těchto panelů. Dalším limitem je tvar vozidel, u vozidel jsou běžně všechny části vozidel včetně kapoty a střechy zakřivené tak, aby bylo dosaženo co nejmenších aerodynamických odporů z jízdy, vhodné tak budou pouze některé typy panelů, které lze umístit i na nerovné povrchy.

Obrázek 2.1 – současné koncepty umístění solárních panelů na vozidlo – zleva Lightyear One, Hyundai Ioniq 5, Sono motors Sion, Toyota Prius



Místo, které se nejvíce k umístění solárních panelů nabízí je plocha střechy. Zde můžeme počítat s využitelnou plochou kolem 1-2 m². Toto řešení můžeme například vidět na jednom z prototypů vozidla Hyundai Ioniq 5. [14] Další relativně velkou plochou, která se pro umístění panelů může využít je kapota. Rozměr kapoty se bude u vozidel výrazně lišit, u větších vozidel vyšších tříd bychom se mohli dostat až na 2 m². Například v modelu Lightyear One je celková plocha solární panelů umístěných na kapotě a střeše 5 m². [15] Existují i prototypy, které mají

pokryté téměř všechny části automobilu solárními panely. Využitelná plocha pro umístění solárních panelů tak může být až 7,5 m². U panelů umístěných po obvodu vozidla však musíme vzhledem k vysokému úhlu dopadu záření počítat s horší účinností. Takové řešení můžeme vidět u elektromobilu Sono Motors Sion. [16]

2.2 Fotovoltaické panely

V této podkapitole budou rozebrány především panely, které jsou svými vlastnostmi vhodné k zástavbě do silničních vozidel, tak jak jsme je stanovili v předchozí kapitole. Dalšími požadavky bude co nejmenší tloušťka a hmotnost panelů, protože i váha samotných panelů se negativně projeví na spotřebě vozidla.

2.2.1 Typy solárních panelů

Obecně se v současnosti vzhledem k poměru cena výkon využívá dvou základních typů fotovoltaických panelů, krystalických a tenkovrstvých. Obě tyto technologie se montují i do ohebných modulů, které tak jsou k použití na vozidle vhodné. Vyšší účinnost dosahují krystalické panely, u nejlepších typů v současnosti dosahují v laboratorních podmínkách až 30 % [17], v praktických aplikacích se v současnosti budeme pohybovat do maximálně 25 % účinnosti, běžně kolem 20 %. U tenkovrstvých panelů můžeme počítat s účinností maximálně 15 %, tyto panely také trpí větší mírou degradace, výhodou je jejich nízká hmotnost a možnost je umístit téměř na jakýkoliv povrch. U krystalických panelů dále rozlišujeme panely monokrystalické a polykrystalické, přičemž hlavní praktický rozdíl je, že polykrystalické panely jsou levnější, ale s o něco horší účinností. Vzhledem k tomu, že plocha panelů na vozidle je relativně malá a případná cena panelů oproti celkové ceně vozidla nebude příliš velká, tak nemá příliš smysl uvažovat nad panely polykrystalickými. V tomto modelu tak budeme počítat s variantou, že na vozidlo umístíme flexibilní verze panelů z monokrystalických panelů.

2.2.2 Vybrané solární panely

Fotovoltaické panely přímo vyráběné pro použití na elektromobilech v současnosti nenalezneme, existují však panely určené pro umístění na vozidlech, které se používají například na karavanech či jachtách. Výběr ohebných solárních panelů je omezenější než běžných rovných panelů, přesto jsou však dostupné různé typy solárních panelů s různými rozměry a vlastnostmi. V tabulce 2.1 uvádíme dva příklady běžně dostupných ohebných panelů a jejich základních vlastností.

Tabulka 2.1 – vybrané ohebné solární panely [18, 19]

Panel	Renogy RNG-175DB-H	SunPower SPR-E-Flex-50
Technologie	Monokrystalický panel	Monokrystalický panel
Účinnost při 25 °C	21,0 %	23,0 %
Rozměry	1504 x 673 mm	653 x 556 mm
Tloušťka	2 mm	2 mm
Špičkový výkon	175 W	50 W
Špičkový výkon na plochu	175 W/m ²	137 W/m ²
Hmotnost	2,8 kg	1,1 kg
Ohebnost	Až 248°	Až 30°

2.2.3 Teoretický výkon fotovoltaických panelů

V kapitole 2.1 byly uvedeny různé varianty umístění solárních panelů na vozidlo, plocha solárních panelů tak může být od 1-2 m² pro konzervativní řešení až po téměř 8 m² pro případy umístění solárních panelů po celém vozidle. Při tomto pokrytí solárními panely můžeme maximální celkový možný výkon panelů odhadnout v podobě prezentované níže v tabulce 2.2.

Tabulka 2.2 – orientační hodnoty P_{max} fotovoltaických panelů při daném pokrytí ploch

Plocha / Typ fotovoltaického panelu	Renogy RNG-175DB-H	SunPower SPR-E-Flex-50
2 m ² (typicky střecha)	350 W	300 W
5 m ² (střecha a kapota)	875 W	750 W
7,5 m ² (i obvod karoserie)	1300 W	1125 W

Jedná se samozřejmě o maximální dosažitelný výkon za ideálních podmínek. Maximální výkon panelů se tak pohybuje kolem hodnoty 1 kW i při plném pokrytí vozidla. Je zřejmé, že to nebude stačit k pokrytí celé energie, kterou potřebujeme k jízdě vozidla. Spotřeba elektromobilu je běžně v rozmezí 15-30 kWh za hodinu jízdy. I pokud by se v budoucnosti dosáhlo ještě další významného zlepšení účinnosti fotovoltaických panelů, tak osobní vozidlo běžného typu, které si vystačí pouze s energií z vlastního solárního nabíjení nikdy nevznikne a vždy bude solární nabíjení na vozidlech pouze doplněk a bude potřeba vozidlo také nabíjet ze stacionárních či líniových napájecích systémů. Můžeme však využít solární dobíjení jako doplněk, které nám bude pokrývat část spotřeb a prodloužit tak o něco dojezd.

2.2.4 Odhad zisků panelů

V našich geografických podmínkách dopadá na rovnou plochu o ploše 1 m² kolem 900-1200 kWh sluneční energie ročně. [20] Při výše uvažované účinnosti panelů tak můžeme počítat se ziskem 200 kWh ročně na 1 m², což by platilo pro panely v pevné aplikaci. Na vozidle bude pravděpodobně zisk o něco nižší, protože bude častěji docházet k znečištění panelů, či bude vozidlo postavené ve špatném úhlu vůči slunci nebo ve stínu budov. Naším hrubým odhadem tak je, že realistické je počítat pro každý m² solárního panelu zisk kolem 100 kWh ročně, což nám při běžné spotřebě elektromobilu 20 kWh/100 km bude dodávat ročně energii na jízdu 500 km. Upřesnění tohoto odhadu se budeme věnovat ve třetí kapitole této práce.

2.2.5 Základní vztahy pro výpočet výkonu solárních panelů

Solární panely nám nebudou dodávat vždy stejný výkon, především bude záležet na intenzitě slunečního záření, které bude na panel dopadat. To je závislé na úhlu dopadu, intenzita se mění spolu se sinem úhlu mezi panelem a rovinou dopadů paprsků, nejvyšší výkon dosáhneme při kolmém úhlu dopadu. Vzhledem k rozptylu světla v atmosféře nám bude dodávat energii i panel, na který slunce přímo nesvítí, bude to však znatelně méně.

Dále bude roli hrát teplota, která bude ovlivňovat účinnost panelů. Pro každý solární panel nalezneme v jeho dokumentaci koeficient změny výkonu v závislosti na teplotě, který běžně nabývá hodnoty kolem -0,4%/°C. Při vysokých teplotách tak panel bude mít horší účinnost než při nižších. Tato vlastnost má za následek, že energie získaná z panelů je v průběhu roku vyrovnanější, než by odpovídalo pouze intenzitě slunečního svitu.

2.3 Začlenění solárních panelů do vozidla

2.3.1 Vliv solárního nabíjení na spotřeby

Z údajů z kapitoly 1, kde jsme stanovili potřebnou energii a výkony jak trakčních, tak pomocných spotřeb elektromobilu můžeme konstatovat, že celkové spotřeby elektromobilu jsme solárními panely schopny pokrývat maximálně v řádu jednotek procent. Pokud to srovnáme s pomocnými spotřebami, tak ty bychom mohli pokrývat z nezanedbatelné části, především spotřeby napájené z palubní sítě. Ale na pokrytí celé spotřeby pro klimatizaci to však stačit nebude a nad pokrytím topením nemá smysl příliš uvažovat, protože to stejně je obvykle využíváno v ročních obdobích, kdy zisk panelu bude nižší.

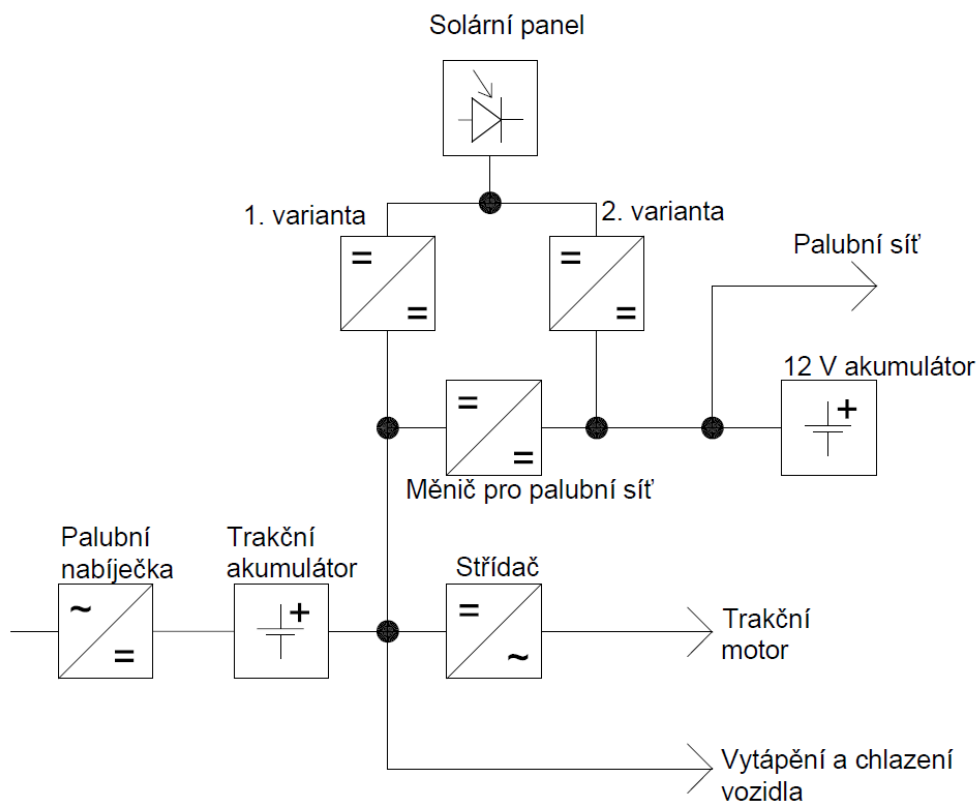
Výhodou však je, že nabíjení může pokračovat i v době, kdy je vozidlo odstavené. Koeficient využití běžných osobních vozidel je velmi nízký, běžně se v průměru využívá po dobu pouhých 30 minut denně. I relativně malý výkon panelů nám tak může dát v průběhu celého letního slunečního dne energii i více než 1 kWh, což už není zcela zanedbatelné, to je množství energie, které nám poté může stačit na jízdu pěti kilometrů, nebo například pokrýt 12 V pomocné spotřeby na dobu 3 hodin.

2.3.2 Začlenění panelů do elektrické sítě elektromobilu

Vzhledem ke struktuře elektroniky elektromobilu se prakticky nabízí dvě základní varianty připojení solárních panelů do elektrických okruhů elektromobilu, buď jeho připojení přes měnič do palubní sítě nebo přes měnič do obvodu trakční baterie. Varianta, že by panely přímo nabíjely nějakou komponentu není příliš reálná ani efektivní.

Při první variantě zapojení do trakčního okruhu získáme vzhledem k výkonům panelů téměř neomezené úložiště pro energii ze solárních panelů. Měnič bude o něco komplikovanější a bude muset spolupracovat s výkonovou částí vozidla. Musíme také vyřešit bezpečnost, kdy se nabíjí trakční akumulátor z panelů i v době, kdy je vozidlo odstavené.

Obrázek 2.2 – blokové schéma možnosti začlenění solárního panelu do elektrické sítě vozidla



Ve druhé variantě zapojení měniče do palubní sítě 12 V je jednodušší návrh měniče a minimum změn na výkonových komponentách elektromobilu. Tato varianta je oproti variantě se zapojením do trakčního okruhu snáze proveditelná, protože nemusíme přímo zasahovat do výkonových komponent elektromobilu. Pro vyšší efektivitu tohoto řešení bude vhodné, optimalizovat algoritmy nabíjení 12 V akumulátoru, který se za jízdy v elektromobilu nabíjí přes měnič z trakční baterie, tak aby například při konci jízdy nebyl nabit na příliš vysoké procento nabití a mohlo nabíjení pokračovat, i když vozidlo stojí. Toto řešení je zajímavou možností, pokud je vozidlo vybaveno pouze menším solárním panelem, kde výkon panelu nebude ani stačit drobným pomocným spotřebám a zároveň kapacita 12 V baterie bude dostatečná pro uložení alespoň části energie získané v době, kdy vozidlo stojí.

3 ENERGETICKÝ MODEL FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ

V této kapitole se budeme věnovat modelaci energetického zisku z fotovoltaických panelů. Zaměříme se na vlastnosti, které se v souvislosti se solárními panely do současnosti příliš neřešily, jako jsou nestandardní úhly natočení panelů umístěných na vozidlech a různé překážky, jako mohou být například domy, které budou stínit dopadu části přímého záření na panely. Také se budeme krátce věnovat tomu, jak by se získatelná energie z fotovoltaických panelů mohla změnit v jiných geografických a klimatických podmínkách, abychom se této problematice věnovali také z celosvětového pohledu.

3.1 Způsob výpočtu výkonů solárních panelů

3.1.1 Intenzita dopadajícího záření

Nejprve si musíme stanovit základní pojmy s kterými budeme pro návrh energetického modelu solárních panelů pracovat, rozlišujeme přímé záření a difúzní záření. Přímé záření je takové, které dopadá v přímém směru bez odrazů na danou plochu. Difúzní záření je takové záření, které na povrchy dopadá skrze rozptyl v atmosféře a různé odrazy, jedná se tedy o záření, které dopadá i na plochy, na které záření nedopadá přímo. Znamená to, že i když na panel nebude dopadat záření přímo, tak stále bude určitou energii vyrábět, bude to však výrazně méně.

Základním vztahem pro dopadající záření na panel bude rovnice níže: [21]

$$I_{celk} = (I_d + I_p \cdot \cos(\alpha)) \cdot k_u \quad (3.1)$$

Kde:

- I_{celk} – celkové dopadající záření [W/m^2]
- I_d – difúzní záření [W/m^2]
- I_p – přímé záření [W/m^2]
- α – úhel mezi dopadajícím zářením a normálou plochy panelu [$^\circ$]
- k_u – koeficient útlumu záření [-]

Stanovení poměru difúzního záření k přímému je relativně složité, záleží na mnoha okolnostech, jako jsou konkrétní klimatické podmínky. Budeme v této práci počítat s maximálním výkonem difúzního záření kolem desetiny maximálního přímého za slunečního dne bez mraků. [22] Výsledný poměr získané energie z difúzního a přímého záření se však bude pohybovat výše, a to až kolem 0,3-0,5, jelikož difúzní záření nám bude dopadat na panely i při zatažené obloze nebo v případě, že panely jsou natočeny jiným směrem než slunce. [23] Koeficient útlumu je podrobněji rozebrán v rovnici 3.6.

3.1.2 Úhel dopadu záření a atmosférické vlivy

V případě horizontálních panelů je výpočet pro úhel dopadu záření na panel relativně jednoduchý, úhel dopadu je zde pouze funkcí elevace slunce. Elevaci slunce můžeme vypočítat podle následující rovnice: [24]

$$\sin \varepsilon = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega \quad (3.2)$$

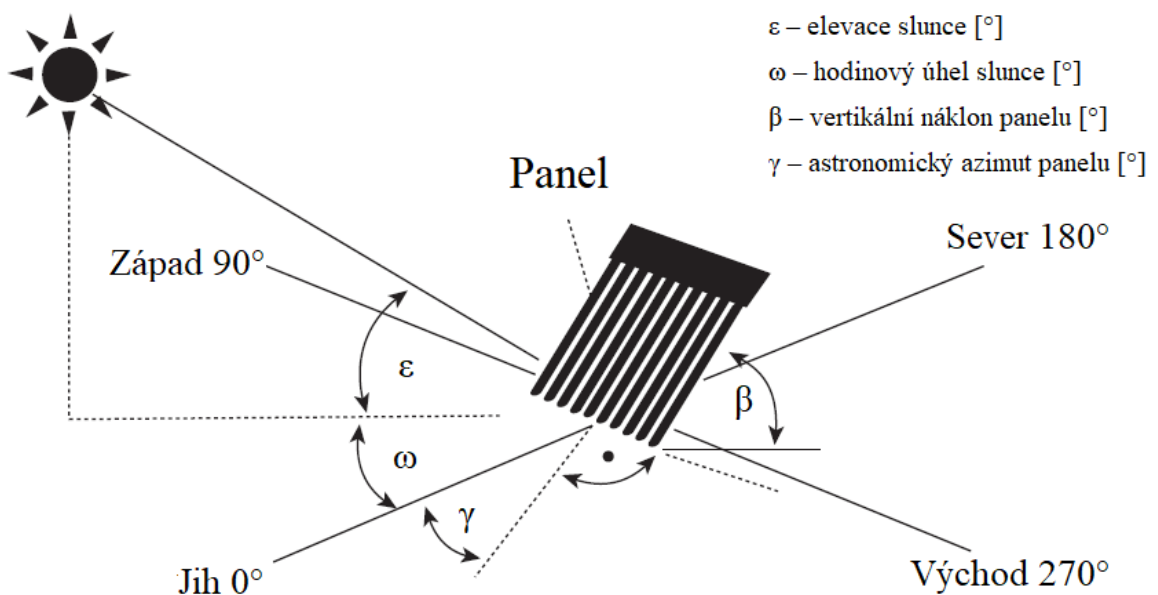
Kde: ε – úhel slunce nad obzorem (elevace) [°]
 δ – deklinace slunce [°]
 φ – zeměpisná šířka [°]
 ω – hodinový úhel slunce [°]

Pro panel, který je vertikálně i horizontálně natočen je výpočet složitější. Úhel dopadu záření vypočteme následujícím způsobem: [25]

$$\cos \alpha = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (3.3)$$

Kde: α – úhel mezi dopadajícím zářením a normálou plochy panelu [°]
 δ – deklinace slunce [°]
 φ – zeměpisná šířka [°]
 β – vertikální náklon panelu [°]
 γ – astronomický azimut panelu (0° - jih) [°]
 ω – hodinový úhel slunce [°]

Obrázek 3.1 – situační nákres natočeného panelu a vybraných úhlů, převzato a upraveno z [21]



Jako hodinový úhel slunce dosadíme po jednom stupni všechny hodnoty (0-360°) pro každý den, časové rozlišení našeho modelu tak bude po 4 minutách. Veškeré hodnoty pro výpočet úhlu známe, kromě deklinace slunce, kterou pro libovolný den v roce dopočítáme podle následujícího aproximačního vzorce: [25]

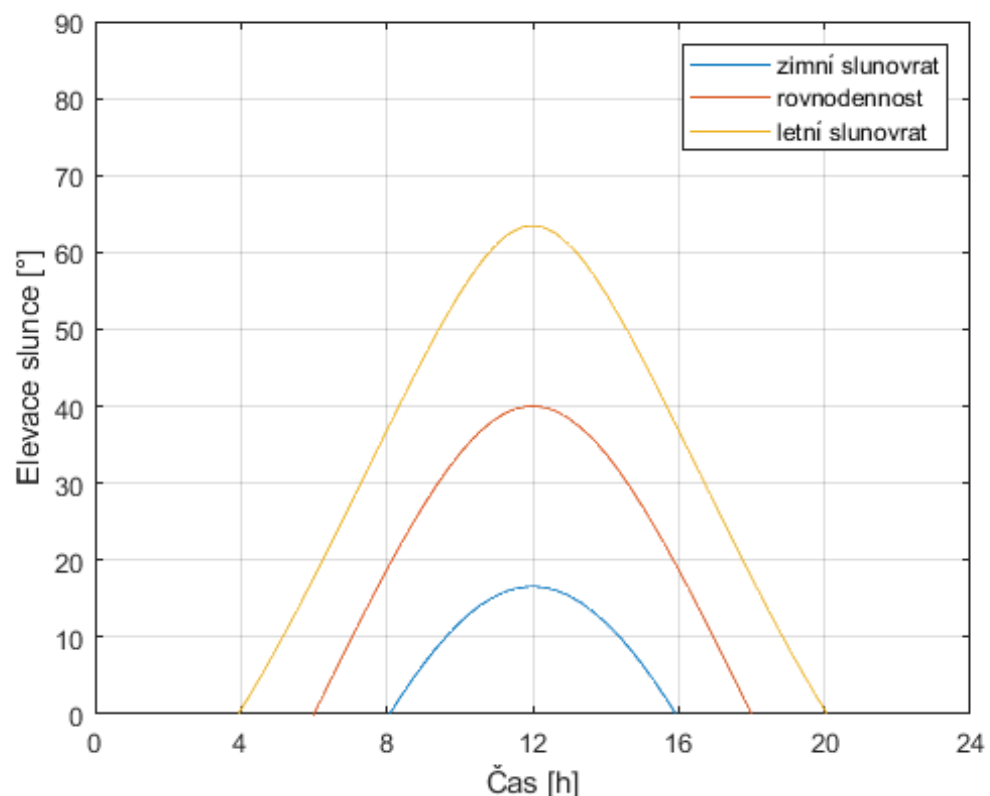
$$\delta \cong 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right) \quad (3.4)$$

Kde: δ – deklinace slunce [°]
 n – počet dnů od prvního ledna [-]

Jistou energii jsme schopni získávat již před rozedněním, tuto energii však zanedbáme. Budeme uvažovat, že pokud je slunce za obzorem, (elevace menší než 0), tak získaná energie je nulová.

Pro výpočet úhlů dopadů záření a výsledné získané energie jsme vytvořili skript v programu Matlab, který nám umožní vypočítat úhel mezi dopadem záření a jakoukoliv plochou na jakémkoliv místě na zemi. Ve výpočtech využijeme solárního času, nebudeme čas přepočítávat na místní ani letní, jelikož nám jde o energetickou stránku věci a přepočet na místní čas zde pro nás nemá žádnou výhodu. Solární čas se určuje podle kulminace slunce v nejvyšším bodě.

Graf 3.1 – průběh elevace slunce v průběhu roku, pro 50° s.š., tato rovnoběžka prochází i Českou republikou, na úrovni, kde se nachází například Praha nebo Pardubice



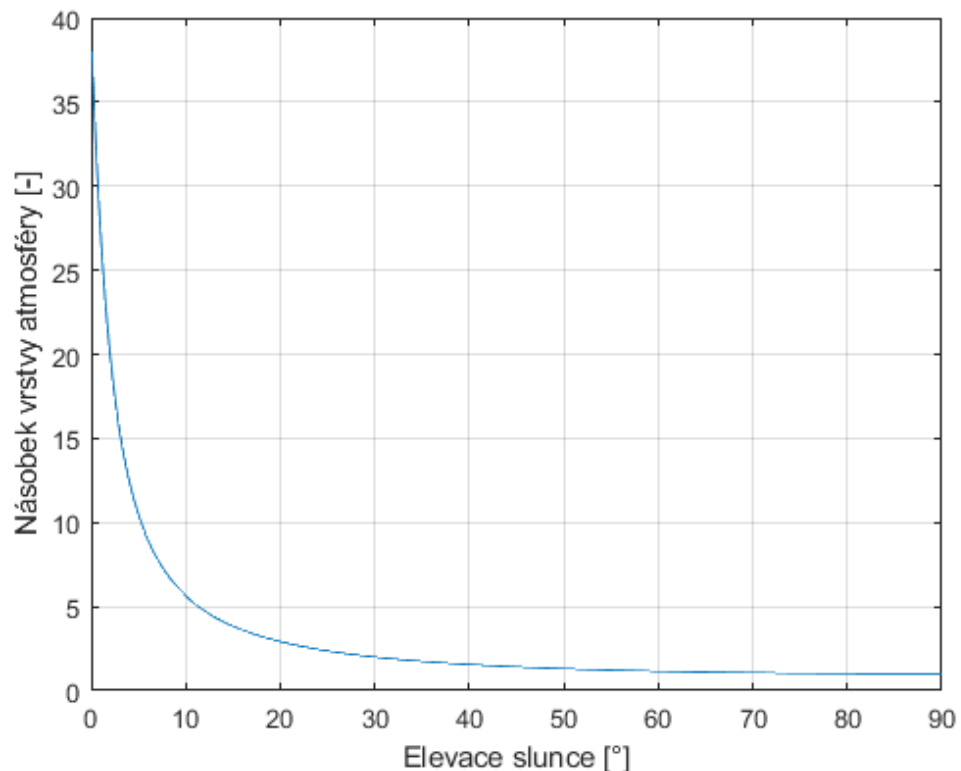
Dále pak musíme uvažovat propustnost atmosféry, které se nám především projeví při nízké elevaci slunce nad obzorem, kdy záření musí projít tlustší vrstvou atmosféry, večerní či ranní slunce je výrazně méně intenzivní. Při uvažování ploché země bychom si vystačili s jednoduchou goniometrickou funkcí, vzhledem k zakřivení vypočítáme vrstvu atmosféry, kterou záření musí projít podle následujícího aproximačního vztahu: [26, 27]

$$AM = \frac{1}{\sin(\varepsilon) + 0,50572 \cdot (96,07995 + (\varepsilon - 90))^{-1,6364}} \quad (3.5)$$

Kde: AM – násobek vrstvy atmosféry, kterou záření musí projít [-]
 ε – úhel slunce nad obzorem [°]

Tato hodnota může nabývat hodnot od jedné, kdy je slunce přímo v zenitu a prochází tak atmosférou přímo, do zhruba 38, kdy je slunce s nulovou elevací přímo na horizontu a záření tak prochází téměř čtyřicetinásobnou vrstvou atmosféry. Průběh této závislosti je znázorněn na grafu níže.

Graf 3.2 – průběh funkce AM v závislosti na elevaci slunce



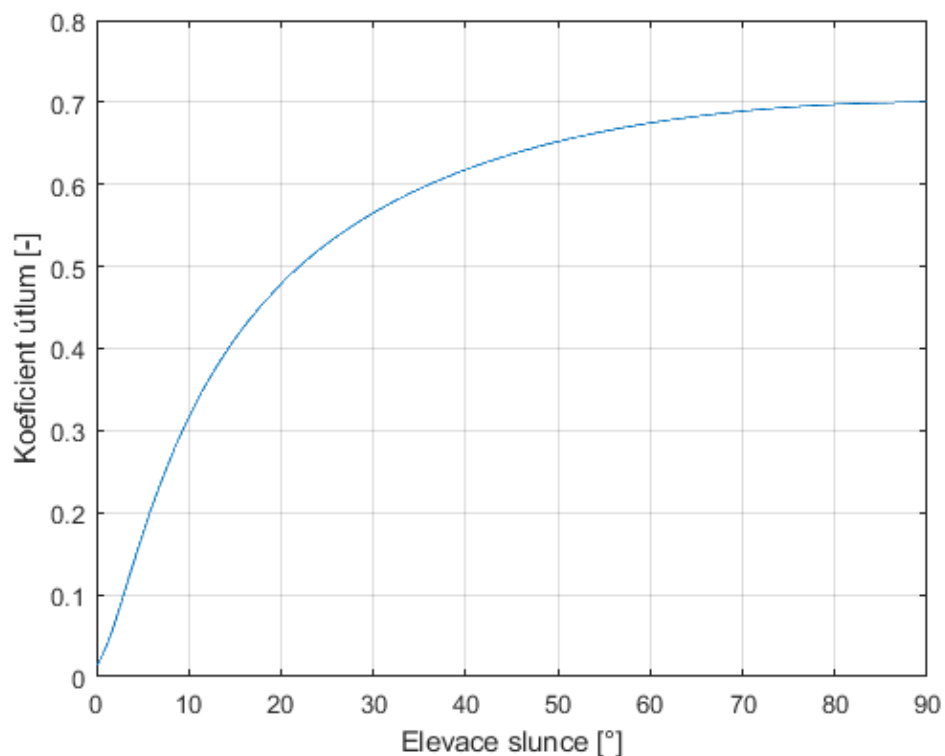
Koeficient, kterým budeme násobit záření, tak budeme psát jako:

$$k_u = k_a^{AM^{0,678}} \quad (3.6)$$

Kde: k_u – koeficient útlumu záření [-]
 k_a – koeficient propustnosti atmosféry, dosazujeme 0,7 [-]
AM – násobek vrstvy atmosféry, kterou záření musí projít [-]

Koeficient propustnosti atmosféry při různých podmínkách nabývá hodnot kolem 0,7 [28], zbytek dopadajícího záření je reflektován zpátky do vesmíru. Při nižších elevacích slunce je množství záření, které se rozptýlí v atmosféře, vyšší, ale i při poloze slunce v zenitu se nám část záření odrazí, koeficient útlumu tak může nabývat hodnot 0 až 0,7 v závislosti na elevaci slunce. Průběh koeficientu útlumu na elevaci slunci je znázorněn na grafu níže.

Graf 3.3 – závislost koeficientu útlumu na elevaci slunce



3.2 Modely získané energie

3.2.1 Hodnoty pro simulační výpočet

Základní parametry pro výpočet jsou uvedeny níže v tabulce 3.1. Parametry zvolené pro simulační výpočet odpovídají typově parametrům panelů, které jsme uvedli v druhé kapitole. Veškeré výpočty budou prováděny pro 1 m², aby byl simulační program obecně použitelný i pro výpočty jiných panelů s jinými vlastnostmi.

Tabulka 3.1 – hodnoty zadané do simulačního výpočtu

Proměnná	Hodnota
Zeměpisná šířka	50° sever, pro ostatní upřesněna níže
Solární konstanta	1366 W/m ² [29]
Přímé záření	90 % z celkového záření
Difúzní záření	10 % z celkového záření
Koeficient propustnosti atmosféry	0,7
Uvažovaná plocha panelů	1 m ²
Maximální výkon panelu	175 W
Účinnost panelu	17,5 % při 25 °C
Teplotní koeficient panelu	-0,4 %/°C
Data o slunečním svitu	Převzata z meteorologické stanice Praha Ruzyně pro rok 2019 [30]
Data o denních teplotách	Pro ostatní místa převzata ze serveru Weather and Climate [31]

3.2.2 Způsob výpočtu

Dalším vlivem, který budeme do modelu zahrnovat je teplota. Teplota ovlivňuje účinnost solárních panelů, s vyšší teplotou účinnost klesá. Budeme pracovat s modelem průměrných středních a maximálních teplot, protože energii nám budou dávat panely přes den, vyfiltrujeme tak nižší noční teploty a více se přiblížíme realitě. Přesnější by samozřejmě bylo pracovat přímo s průběhem teplot během dne, tyto datové řady ale nejsou z dlouhodobého hlediska k dispozici. Rovnice pro změnu účinnosti panelu na teplotě je:

$$\eta_p(T) = \eta_{p25^\circ\text{C}} + k_t \cdot (T - T_{n25^\circ\text{C}}) \quad (3.7)$$

Kde:

- $\eta_p(T)$ – účinnost panelu pro danou teplotu [-]
- $\eta_{p25^\circ\text{C}}$ – katalogová účinnost panelu pro danou teplotu T_n [-]
- k_t – koeficient změny účinnosti na teplotě [$^\circ\text{C}^{-1}$]
- T – teplota v daném čase
- $T_{n25^\circ\text{C}}$ – teplota pro kterou platí katalogová účinnost, nejčastěji 25°C [$^\circ\text{C}$]

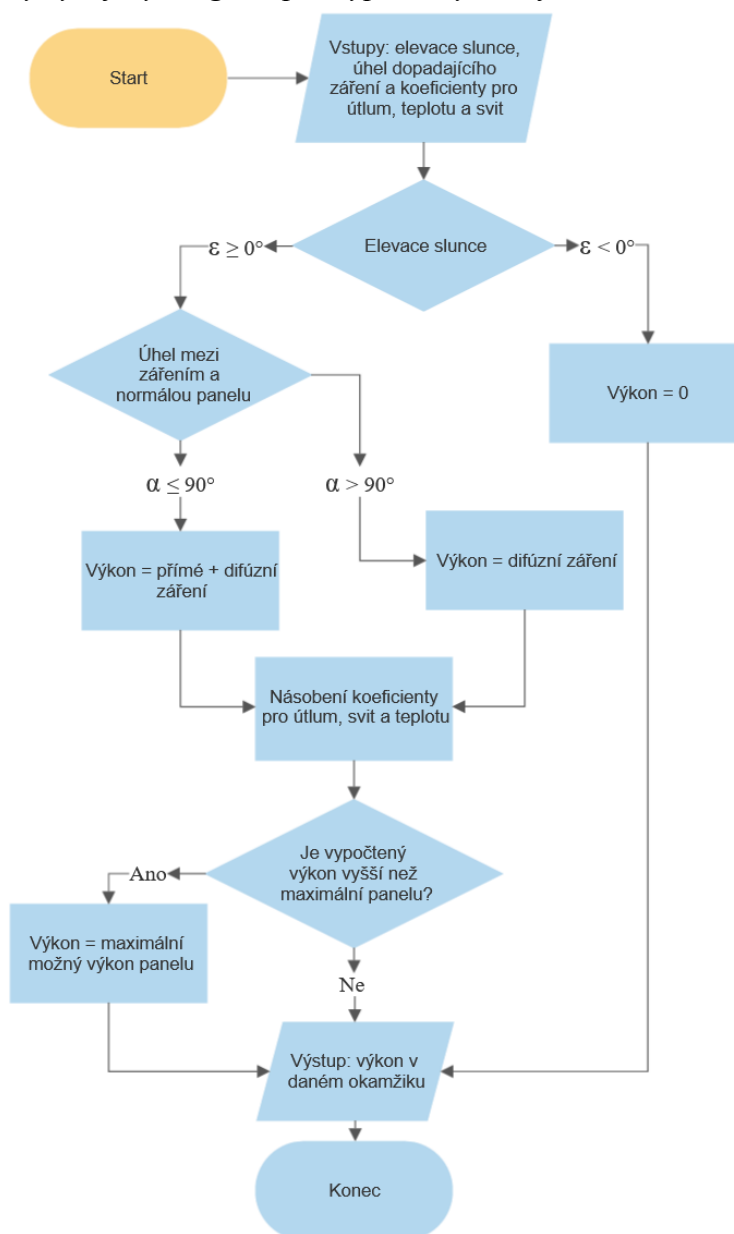
Do modelu obdobným způsobem zahrneme data o délce slunečního svitu v daném dnu a budeme tak model upřesňovat na vlastnost, že slunce nesvítí po celý den. Koeficient svitu vypočítáme podle následující rovnice:

$$k_{svitu} = \frac{t_{svitu}}{t} \quad (3.8)$$

Kde: k_{svitu} – koeficient svítu [-]
 t_{svitu} – doba po kterou svítilo slunce, získané z meteorologických dat [h]
 t – délka daného časového úseku (například den) [h]

Popsat zde kompletní algoritmus výpočtu by bylo zbytečně rozsáhlé, níže v diagramu je však shrnuta logická část, které se využívá při výpočtu výkonu z rovnic výše. Tato část se nachází ve dvou cyklech, kde postupně dojde k výpočtu hodnot pro všechny časové okamžiky v daném dni s rozlišením 4 minut a poté pro všechny dny v roce, v diagramu jsou pro přehlednost vynechány.

Obrázek 3.2 – logický vývojový diagram pro výpočet výkonu fotovoltaického panelu



Energie panelu pro daný časový úsek vypočítáme snadno pomocí klasického vztahu:

$$E = \int_0^t P dt \quad (3.9)$$

Kde: E – Energie [Wh]

P – výkon [W]

t – čas [h]

Ve skriptu se pro výpočet energie využívá lichoběžníkové metody integrace z výkonu. Vyrobenou energii počítáme jak pro jednotlivé měsíce, tak pro celý rok.

Hlavními získanými výstupy ze skriptu v programu Matlab jsou:

- Tabulka výkonu panelu bez překážky pro každý den v roce a hodinový úhel slunce od 0 do 360°.
- Tabulka energií z fotovoltaického panelu bez překážky pro každý měsíc v roce a hodinový úhel slunce od 0 do 360°.
- Tabulka výkonu panelu s překážkou pro každý den v roce a hodinový úhel slunce od 0 do 360°.
- Tabulka energií z fotovoltaického panelu s překážkou pro každý měsíc v roce a hodinový úhel slunce od 0 do 360°.

Přičemž vše je počítáno pro zadanou orientaci panelu a náklon panelu a v případě posledních dvou bodů i pro definovanou překážku, která zakrývá danou výšku a azimut oblohy.

3.2.3 Získaná energie pro různé orientace panelů

Simulaci provedeme především pro nestandardní pozice fotovoltaických panelů, a to buď zcela horizontální panel, který bude přibližně odpovídat střeše a kapotě vozidla a panel s kolmým náklonem, který odpovídá bočním plochám elektromobilu, toto řešení jsme viděli na jednom z konceptů na obrázku 2.1 v předchozí kapitole. Je však třeba rovnou konstatovat, že v našich zeměpisných šířkách ani jedna z ploch elektromobilu není pro umístění fotovoltaických panelů zcela optimální. V solárních elektrárnách, se tam, kde je to možné, instalují fotovoltaické panely s vertikálním sklonem 30-40° a s orientací na jih, případně se u některých solárních elektráren využívá i jejich natáčení pro zvýšení jejich účinnosti. V případě umístění panelu na elektromobil tuto možnost mít nebudeme a musíme počítat s orientací pro části karoserie, tak jak je máme.

Tabulka 3.2 – výsledky modelu pro různé úhly natočení panelů

Orientace panelu	Poloha panelu	Získaná energie
Sklon panelu 35°, orientace jih	Optimální natočení panelu ve statické aplikaci *	215 kWh/rok
Sklon panelu 0°	Střecha a kapota vozidla	181 kWh/rok
Sklon panelu 90°, orientace jih	Dveře, páté dveře a případné další části karoserie kolmé vůči zemi	161 kWh/rok
Sklon panelu 90°, orientace západ nebo východ		125 kWh/rok
Sklon panelu 90°, orientace sever		65 kWh/rok

* pro účely porovnání, takovou plochu na elektromobilu mít nebudeme

Z výsledků vychází, že horizontální umístění panelů není oproti panelům v optimálním sklonu tak špatné, přicházíme zhruba o 15 % energie. Stejně tak panely s jižní orientací mají dobré výsledky, je zde však třeba říct, že jelikož panely po obvodu karosérie jsou vůči sobě otočené o 180 stupňů, tak na ně nikdy nebude dopadat záření zároveň. Pokud tedy jedna strana má jižní orientaci, tak druhá bude mířit na sever, kde dopadající záření bude minimální. Navíc čistě statisticky bude auto při jízdě a parkování otočeno víceméně na náhodnou světovou stranu, pokud tak spočítáme průměr těchto orientací, dostaneme hodnotu cca 120 kWh ročně.

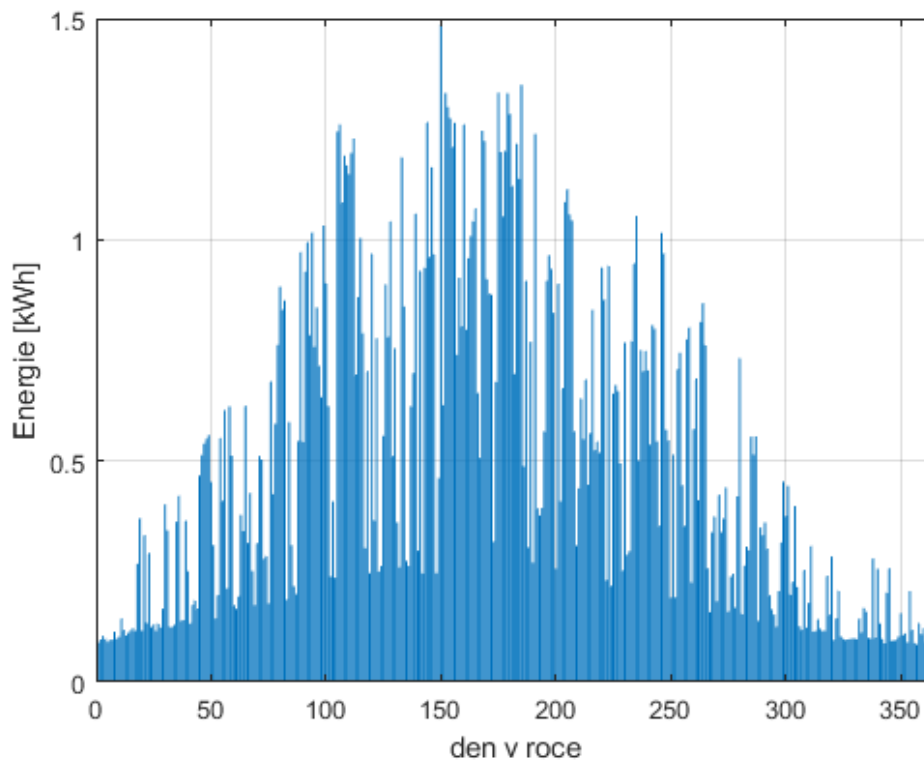
Střešní panel je tak určitě lepší volbou, získaná energie je rovnoměrnější. Také boční panely budou častěji zakryté, například blízko stojícími vozidly při parkování, které budou dopadu záření stínit. Je velká otázka, zda takové panely vůbec umisťovat a následující modely budeme počítat především se střešními panely s horizontálním umístěním.

Sklon vozovky, který bude dosahovat na běžných typech komunikací maximálně 10 % nám také může ovlivnit úhel natočení panelů vůči dopadajícímu záření a mírně tak může měnit výkon panelů, oproti ostatním vlivům to však bude relativně málo. Celkově vzato tento efekt občas bude příznivý a občas nepříznivý a čistě statisticky se vzájemně vyrovná. Tento vliv tak do modelů zahrnovat nebudeme, a v modelech budeme počítat s tím, že elektromobil stojí na rovném místě.

3.2.4 Roční období

Na grafu 3.4 vidíme denní produkovanou energii, i v létě se vyskytují oblačné dny kdy bude získaná energie malá, je jich však méně než v zimě a také je celková možná získaná energie v průběhu dne v létě větší, vzhledem k až dvojnásobné době mezi východem a západem slunce.

Graf 3.4 – produkovaná energie v jednotlivých dnech pro horizontální panel



V našich geografických podmínkách je ve dni zimního slunovratu slunce maximálně 15° nad obzorem, úhel mezi horizontální plochou panelu a dopadajícím zářením tak bude značně nevýhodný, a i celková délka slunečního svitu bude krátká. Lehce se vzhledem k nižší teplotě v zimním období zvyšuje účinnost panelů. Určitým pozitivním vlivem, který budeme mít oproti statické aplikaci fotovoltaických panelů je to, že střešní panely na domě nám v zimním období nedodávají žádnou energii v případě, že jsou pokryty vrstvou námrazy či sněhem, kdežto na vozidle je předpoklad, že řidič bude relativně pravidelně odstraňovat před jízdou sníh ze střechy i ostatních částí automobilu, jelikož je k tomu ze zákona i z hlediska bezpečnosti provozu povinen.

3.2.5 Změna teploty

Provedeme simulaci pro případ, že bychom panely umístili na místo, kde jsou výrazně vyšší průměrné teploty, než jsou běžné teploty. Zkusíme tak nasimulovat relativně velký výkyv teplot, kdy by teplota byla po celý rok konstantně o pět stupňů vyšší.

Tabulka 3.3 – získaná energie při vyšších teplotách a změna oproti původnímu modelu

Orientace panelu	Získaná energie	Původní hodnota a změna
Sklon panelu 0°	163 kWh/rok	181 kWh/rok (-9,9 %)
Sklon panelu 90°, orientace jih	146 kWh/rok	161 kWh/rok (-9,3 %)
Sklon panelu 90°, orientace západ nebo východ	113 kWh/rok	125 kWh/rok (-9,6 %)
Sklon panelu 90°, orientace sever	59,3 kWh/rok	65 kWh/rok (-8,7 %)

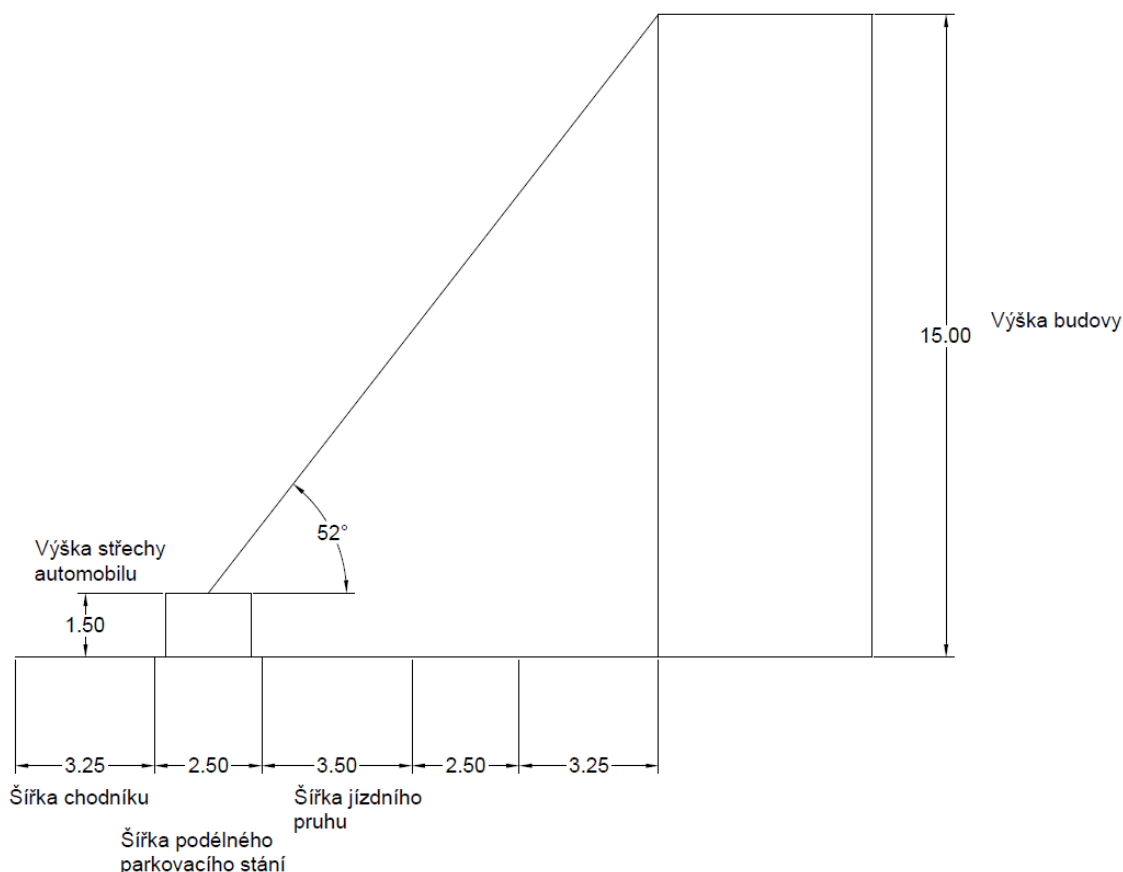
Vyšší teplota nám snížila produkci energie z fotovoltaických panelů, změna však není tak výrazná jako u neoptimálního natočení panelů. Orientace panelů nemá na pokles při vyšší teplotě příliš vliv, vyšší teplota se projevila podobným poklesem pro všechny uvažované případy natočení panelů. Uvažovaná vyšší teplota může být například realistická pro městské tepelné ostrovy, kdy na plochách pokrytých zástavbou, asfaltem a betonem spolu s nižším přirozeným prouděním vzduchu dochází k vyšší kumulaci tepla. V případě, že se v daném místě nachází stromy či jiná vegetace, tak bývají teploty nižší, vegetace nám však bude stínit na panel, takže z tohoto hlediska je vyšší teplota pravděpodobně přijatelnější než hustá vegetace. Lokální teplotu především v zimním období mohou ve zastavěných oblastech také o něco zvyšovat topení.

3.2.6 Vliv překážek

V předchozí kapitole jsme sice počítali s většinou obecných klimatických vlivů majících vliv na fotovoltaické panely, platilo by to však za celkem optimistického předpokladu, že solární panely na vozidle nebudou nikdy zakryty žádnou překážkou. Samozřejmě stanovit veškeré překážky, které mohou fotovoltaickým panelům na vozidle stínit je skoro nemožné, vzhledem k jejich vysokému množství a druhů, od vegetace po další vozidla, či budovy.

Budeme se zde však zabývat modelem klasické městské ulice, která je 15 metrů široká a z jedné strany se nachází 15 metrová budova, což reálně odpovídá zhruba 4-5 patřům. Šířka ulice odpovídá jednosměrné komunikaci s jízdním pruhem o šířce 3,5 metrů a s podélnými parkovacími místy po obou stranách ulice. Výšku střechy automobilu stanovíme jako 1,5 metrů nad polohou silnice. Situační náčrt uvažované překážky vidíme níže na obrázku 3.3.

Obrázek 3.3 – situační náčrtek schématu uvažované překážky, všechny délky v [m]



Překážka tak bude stínit po celých 180° azimutu a do výšky 52° elevace. Nasimulujeme různé orientace překážky z hlediska elektromobilu. Panel elektromobilu v tomto případě budeme uvažovat jako horizontální na střeše. Výpočet provedeme pro případ, že nám bude takováto překážka stínit po celý rok a pro realističtější případ, že u této budovy budeme parkovat dva dny v týdnu.

Tabulka 3.4 – získaná energie při uvažované překážce a změna oproti původní hodnotě 181 kWh ročně

Orientace překážky z pohledu vozidla	Získaná energie a změna při stálé překážce		Získaná energie při existenci dané překážky 2 dny v týdnu	
	Získaná energie	Změna	Získaná energie	Změna
Jih	91 kWh/rok	-50 %	156 kWh/rok	-14 %
Jihozápad	107 kWh/rok	-41 %	160 kWh/rok	-12 %
Západ	135 kWh/rok	-25 %	168 kWh/rok	-7 %
Sever	180 kWh/rok	-0,6 %	181 kWh/rok	0 %

Nejvíce nás ovlivní překážka, která nám bude zakrývat jižní část horizontu. Pokud by nám taková překážka stínila neustále, přijdeme o téměř veškeré přímé záření, kromě letního období,

kdy je den dostatečně dlouhý, aby slunce svítilo ráno a večer kolem budovy a přes den je v dostatečné elevaci, aby svítilo přes budovu. V případě budovy zakrývající sever přijdeme pouze o část přímého záření v ranních a večerních hodinách v létě, vliv překážek nacházející se v severním směru od vozidla je tak téměř zcela zanedbatelný.

Uvažovaná překážka v záření je samozřejmě poměrně výrazná, například volně stojící budovy budou zakrývat menší úhel horizontu, na sídlištích či rozlehlejších parkovištích bude samozřejmě situace lepší vzhledem k volnějšímu způsobu zástavby. Zároveň však v určitých případech mohou být překážky ještě větší, budovy mohou být z obou stran ulice nebo v případě náměstí i z více stran a například v centrech měst mohou být budovy ještě blíže u sebe, ve velkoměstech mohou také být budovy lemující ulice výrazně vyšší. Počítali jsme zde také s příznivějším případem, kdy vozidlo stojí na straně odlehlé od budovy, v případě, že by stálo na parkovacím místě u budovy by se úhel nutné elevace slunce zvýšil až na 72°. V tomto případě by se například pro jižně orientovanou překážku stálého charakteru dále snížila získaná energie na pouze 62 kWh ročně, tedy na třetinu původní hodnoty.

3.3 Geografické a klimatické hledisko

Neměli bychom se na tuto problematiku dívat pouze z pohledu místních poměrů, většina velkých automobilových koncernů dodává svá vozidla po celém světě, kde se mohou klimatické podmínky mající vliv na fotovoltaické panely na vozidle výrazně lišit, přičemž část lze považovat za atraktivní trhy, kam se i část evropských výrobců snaží více proniknout.

Dosadíme do našeho modelu několik míst na zemi, kde budou podmínky výrazně jiné než u nás. Základní klimatická a geografická data pro tyto místa jsou uvedeny v tabulce 3.5 níže.

Tabulka 3.5 – vybraná klimatická data pro daná místa

Místo	Zeměpisná šířka	Průměrná teplota	Roční úhrn slunečního svitu
Tel Aviv	32° sever	20,3 °C	3311 h
Recife	8° jih	25,5 °C	2550 h
Helsinky	60° sever	5,9 °C	1858 h
Praha	50° sever	8,6 °C	1668 h
Čcheng-tu	30° sever	16,3 °C	1073 h

Výsledky simulace jsou uvedeny v tabulce níže, porovnáme tyto data ještě s nástrojem PVGIS, abychom si naši simulaci ověřili. Při této simulaci nebudeme uvažovat žádné překážky dopadajícím záření a panely v horizontální orientaci.

Tabulka 3.6 – energie z panelů vypočtená pro různá místa na zemi

Místo	Vypočtená hodnota z modelu	PVGIS* [20]
Tel Aviv	283 kWh/rok	317 kWh/rok
Recife	240 kWh/rok	350 kWh/rok
Helsinky	158 kWh/rok	150 kWh/rok
Praha	181 kWh/rok	181 kWh/rok
Čcheng-tu	145 kWh/rok	186 kWh/rok

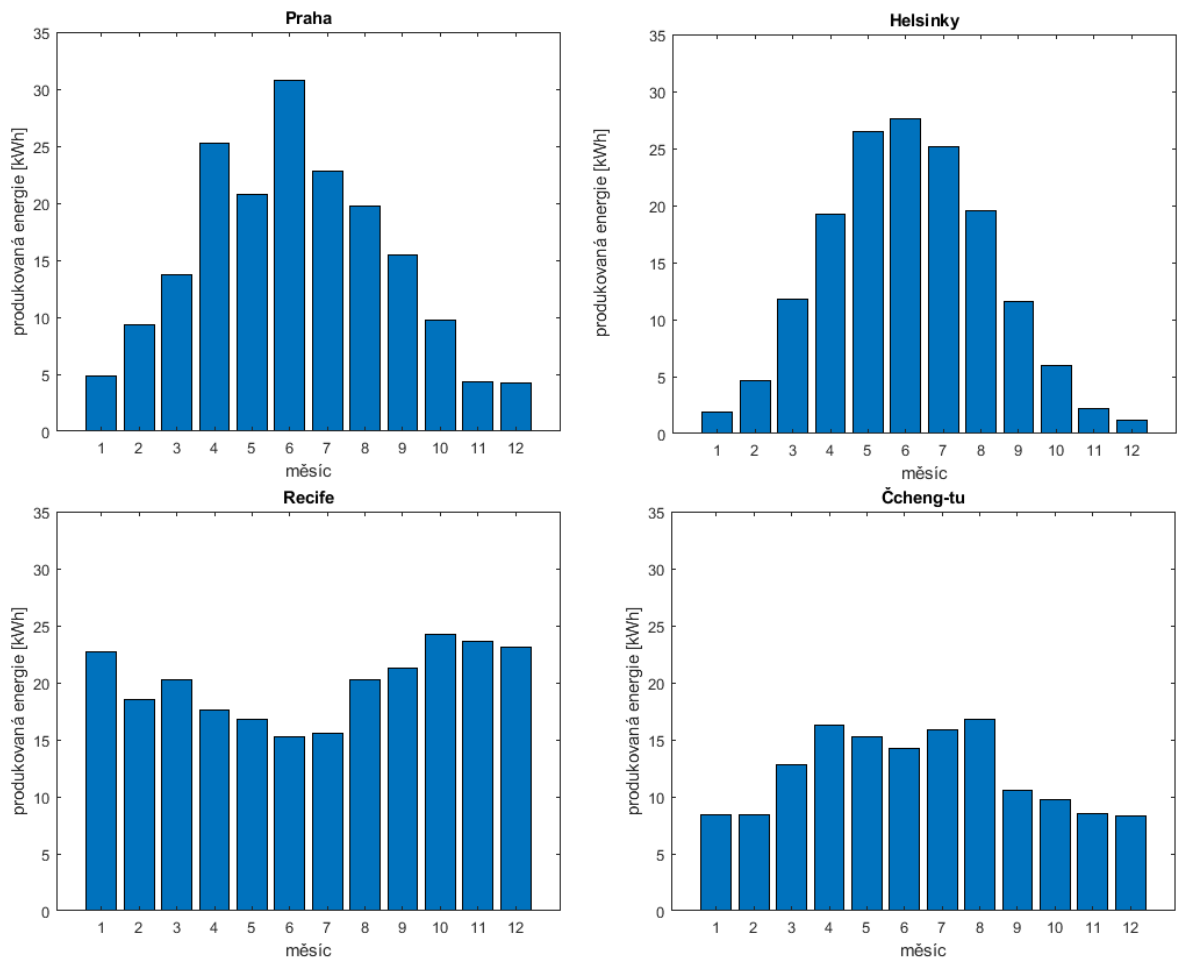
* aby byly hodnoty porovnatelné: zadané parametry v PVGIS – špičkový výkon panelu 175 W, nulový sklon panelu, volně stojící panel, databáze PVGIS-SARAH, nulové systémové ztráty (ztrátami měniče se zabýváme až v další kapitole)

Vidíme, že náš model má výsledky přibližně odpovídající realitě pro většinu míst, určité rozdíly zde však vznikají. V modelu však počítáme nejen s dopadajícím zářením, ale uvažujeme i sníženou účinnost panelů při vyšších teplotách. Částečné odchylky také mohou být způsobeny nepřesnými daty o teplotě a délce slunečního svitu, které se bohužel nepodařilo získat v dostatečném časovém rozlišení a byly zahrnuty pouze na měsíční bázi. Do výpočtu dopadajícího záření zasahuje množství vlivů, které nelze všechny zahrnout do simulačního modelu. Celkově vzato model mírně podhodnocuje získanou energii, každopádně je lepší počítat s konzervativním odhadem získané energie.

Obecně platí, že na oblasti v nižších zeměpisných šířkách dopadá více záření. Neplatí to však specificky pro všechny případy, jsou i oblasti v malých geografických šířkách které nejsou příliš vhodné k umístění panelů vzhledem k místním klimatickým podmínkám, mezi ně patří například oblast východní Číny a severního Vietnamu, které jsou od 20° do 35° severní šířky, kde však vlivem oblačnosti a častých srážek dopadá relativně málo slunečního svitu. Například ze simulace pro Čcheng-tu vychází nižší hodnota získané energie v průběhu roku než lze získat v oblastech ležících v daleko vyšších zeměpisných šířkách.

Výhodou užití panelů na vozidle v oblastech blízko rovníků je, že se zde optimální montáž panelu blíží právě horizontálnímu vůči zemi, které budeme mít i na vozidle. Umístění panelu v horizontální poloze na střeše elektromobilu tak nebude mít z tohoto pohledu nevýhodu oproti umístění panelu ve statické aplikaci s optimálním sklonem. Další výhodou je relativně vyrovnaná produkce v průběhu roku, jak vidíme na grafu níže pro brazilské pobřežní město Recife, ležícího jižně od rovníku.

Graf 3.5 – získaná energie v průběhu roku pro různá místa na zemi



Nejvyšších energetických zisků jsme schopni dosáhnout v suchých pouštních oblastech subtropického pásu. Zisk se zde může pohybovat na úrovni 2-3 násobku než v podmínkách mírného pásu. Samozřejmě vyšší sluneční svit zároveň obvykle znamená vyšší teplotu, která naopak účinnost panelů snižuje, to je ale spíše druhořadý vliv, výrazně vyšší dopadající záření je dominantní vlivem získané energie.

Pokud se podíváme do vysokých zeměpisných šířek, tak klesá celková získaná energie a zároveň roste nerovnoměrnost získané energie v průběhu roku, v létě je zde získaná energie stále relativně vysoká vlivem dlouhých dnů, avšak v zimním období se zde dostáváme na zcela minimální hodnoty, jak je zřejmé ze sezónního průběhu získané energie pro město Helsinky nacházející se několik stupňů na jih od severního polárního kruhu. Je tak otázkou, zde vůbec pro tyto oblasti uvažovat nad elektromobilem s fotovoltaickým nabíjením. Pro případnou zástavbu těchto systémů do vozidel bychom tak především měli uvažovat pro vozidla dodávaných do suchých oblastí na jih od nás.

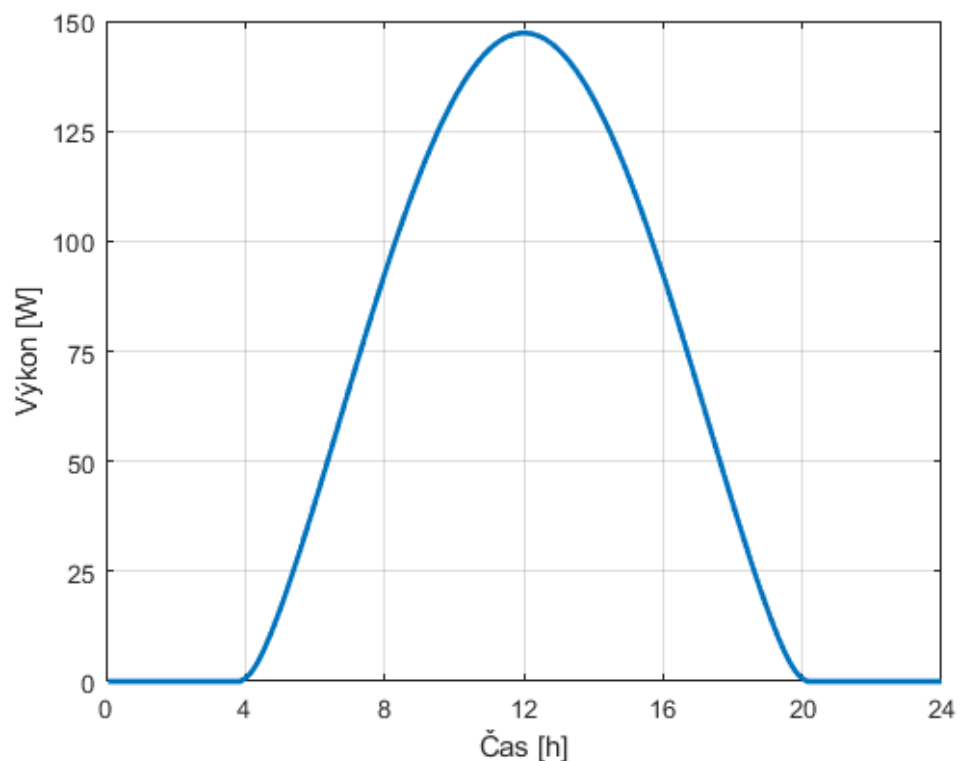
3.4 Získaná energie v průběhu dne

V předchozích částech této kapitoly jsme se zabývali modelováním získané energie z dlouhodobého pohledu, kterou poté využijeme pro stanovení celkových přínosů panelů v páté kapitole této práce. Pro návrh modelu v následující kapitole, kde budeme z krátkodobého hlediska řešit kam a jak získanou energii uložit a jak a kdy jí následně využít, je vhodné si zde ukázat modelové průběhy získané energie v průběhu dne.

3.4.1 Teoreticky získatelná energie

Pro dimenzování a strategii dobíjení bychom měli mít jeden případ velmi vysokého množství získané energie v průběhu dne. Jedná se v tomto případě o den letního slunovratu, kdy pro panel nebudou žádné překážky a obloha bude celý den jasná, průběh vidíme na grafu 3.6, celková energie získaná v tomto dni je 1,31 kWh, jedná se opět o výpočet pro 1 m², můžeme tak tento případ násobit plochou panelů pro různé velikosti panelů na elektromobilu. V realitě se samozřejmě s takovým perfektním průběhem nesetkáme, je však vhodné pro strategii dobíjení počítat i s takovýmto případem.

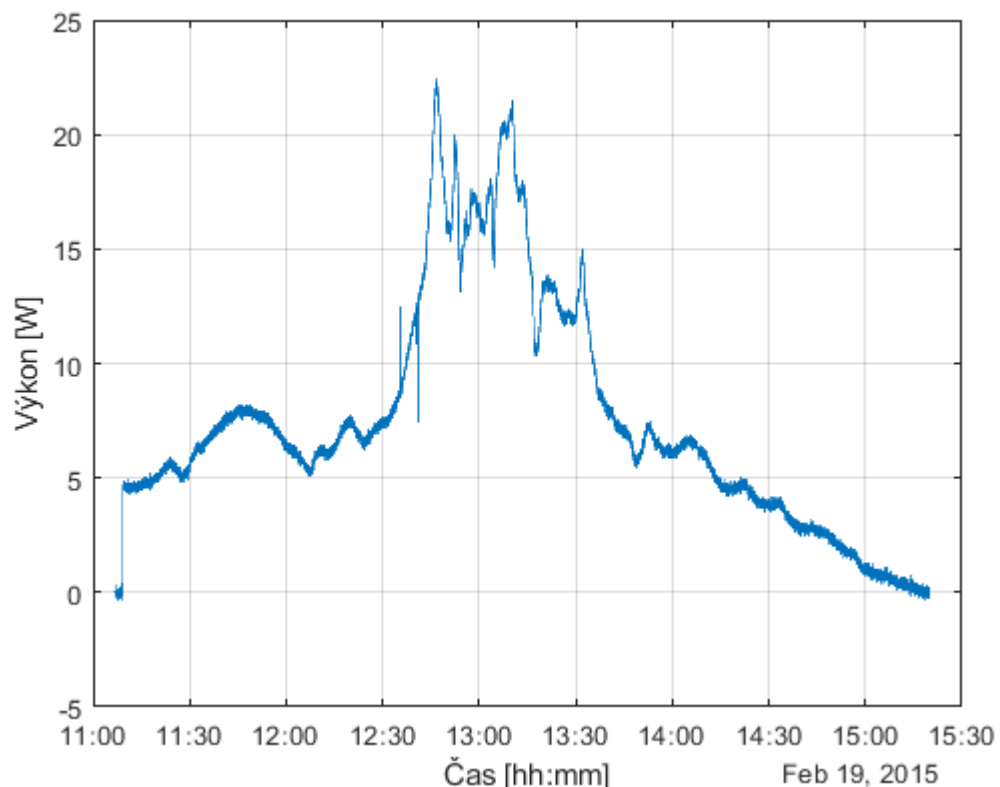
Graf 3.6 – maximální výkon horizontálního panelu v průběhu dne letního slunovratu



3.4.2 Realistický denní průběh

V realitě bude průběh ovlivněn oblačností a různými překážkami. Na grafu 3.7 je sice naměřený průběh na fotovoltaickém panelu ve statické aplikaci, ale s četnými výkyvy může odpovídat i průběhu panelu na vozidle. Tento průběh tak může odpovídat nepříznivému stavu průběhu výkonu v zimním období, kdy bude výkon panelu omezen a také se často budou vyskytovat různé překážky dopadajícímu záření a kde se tak tomu musíme přizpůsobit strategii energetických toků.

Graf 3.7 – naměřený průběh výkonu solárního panelu v průběhu zimního dne



Tento naměřený průběh odpovídá panelu FVP Solartec SG 72-113 s $P_{\max} = 113$ W. Měření proběhlo 19.2.2015, orientace panelu byla přímo na jih se sklonem 60° . [32]

4 STRATEGIE DOBÍJENÍ ELEKTROMOBILU

Cílem této kapitoly bude navrhnout celkovou strategii energetických toků elektromobilu s fotovoltaickým nabíjením především z krátkodobějšího pohledu, abychom rozebrali možnosti, jak můžeme získanou energii uložit a jak jí nejlépe využít. Snahou bude, abychom vždy měli volnou kapacitu, kam získanou energii uložit. Do modelu zahrneme trakční spotřeby elektromobilu, pomocné spotřeby a modely získané solární energie, tak jak jsme je stanovili v předchozí kapitole.

Obrázek 4.1 – vozidlo Hyundai Kona Electric, na kterém probíhalo měření



Modely pomocných i trakčních spotřeb stanovíme z naměřených dat z různých jízd, které byly naměřeny na podzim 2020 diplomantem a v létě 2021 vedoucím práce na vozidle Hyundai Kona Electric, vybrané parametry vozidla v tabulce níže.

Tabulka 4.1 – vybrané parametry vozu na kterém probíhalo měření

Parametr	Hodnota
Typ motoru	Synchronní s permanentními magnety
Maximální točivý moment	395 Nm
Maximální výkon	150 kW
Poháněná náprava	přední

Parametr	Hodnota
Maximální rychlost	167 km/h
Převodovka	Jednostupňová redukční 1:7,981
Udávaná kombinovaná spotřeba	14,7 kWh / 100km
Typ akumulátoru	Lithium-ion Polymer
Jmenovité napětí akumulátoru	356 V
Udávaná kapacita akumulátoru	64 kWh
12 V akumulátor	Olověný, 45 Ah, 12 V (cca. 0,5 kWh)
Hmotnost	Provozní 1789 kg, nejvyšší přípustná 2170 kg, při jízdě přibližně 1850 kg (řidič těžší než normy + měřicí vybavení)
Další výbava	Tepelné čerpadlo, třífázová palubní nabíječka 10,5 kW, osvětlení LED

4.1 Trakční odběr elektromobilu

4.1.1 Jízda ve městě

Tabulka 4.2 – vybrané naměřené parametry jízdy po městě

Parametr	Hodnota
Délka trasy	86 km
Doba jízdy	3h 36m
Průměrná rychlost	24 km/h
Spotřebovaná energie z trakční baterie	14,5 kWh
Rekuperovaná energie do trakční baterie	3,9 kWh
Podíl rekuperované energie na spotřebované	26,9 %
Bilance spotřebované energie	10,6 kWh
Spotřeba	12,3 kWh / 100 km
Průměrný odběr z trakční baterie	2,95 kW
Spotřebovaná energie na 12 V spotřeby	0,97 kWh
Průměrný příkon 12 V spotřeb	270 W
Podíl 12 V spotřeb na bilanci spotřebované energie	9,2 %

Daná jízda byla provedena několikrát po stejné trase v Pardubicích ze sídliště Dukla do průmyslové zóny v Semtíně. Měření probíhalo 29.06.2021 v dopoledních hodinách, byla využívána klimatizace na 22 °C a průměrná teplota okolí byla mezi 21–23 °C. Svítlo se potkávacími světly a ve vozidle byla jedna osoba a žádný náklad. Jízda ve městě je charakteristická nízkou průměrnou rychlostí a vzhledem k častým rozjezdům a zastavování se často využije schopnost rekuperovat energii. Vzhledem k pomalé jízdě máme relativně vysoký podíl pomocných spotřeb, které působí i v době kdy vozidlo stojí.

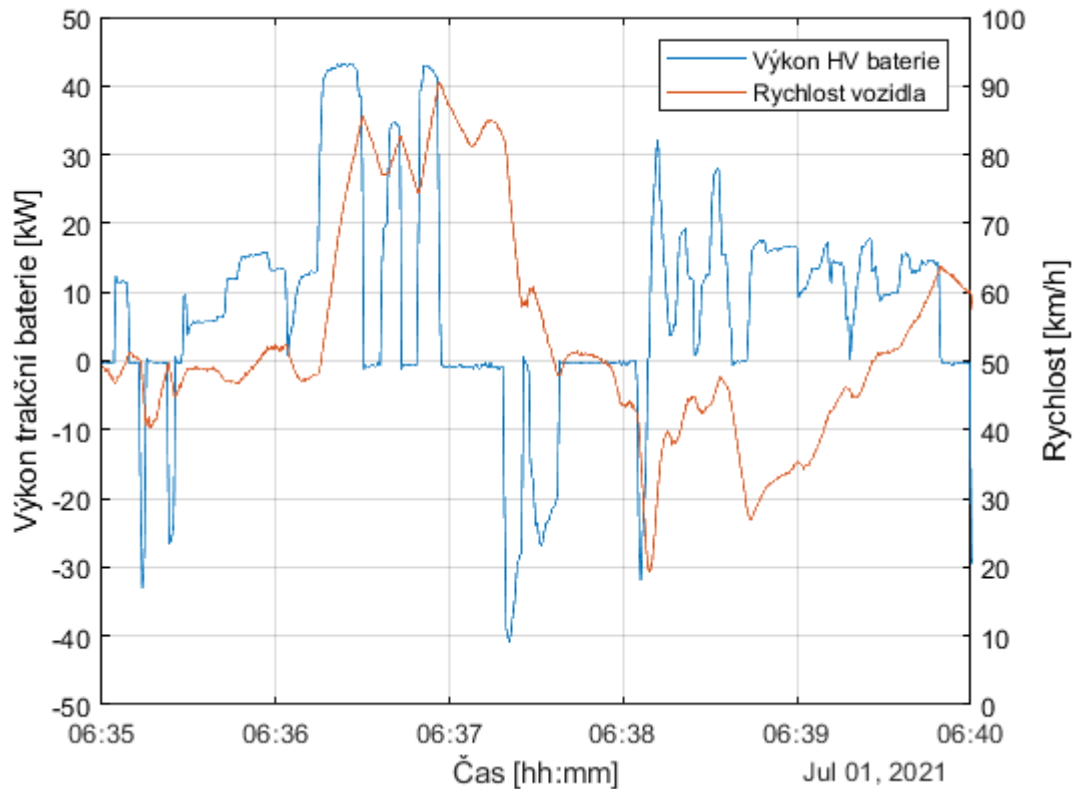
4.1.2 Jízda mimo město

Tabulka 4.3 – hodnoty vybrané jízdy po okresních silnicích

Parametr	Hodnota
Délka trasy	119 km
Doba jízdy	2h 8m
Průměrná rychlost	56 km/h
Spotřebovaná energie z trakční baterie	21,6 kWh
Rekuperovaná energie do trakční baterie	6,4 kWh
Podíl rekuperované energie na spotřebované	29,6 %
Bilance spotřebované energie	15,2 kWh
Spotřeba	12,76 kWh / 100 km
Průměrný odběr z trakční baterie	7,14 kW
Spotřebovaná energie na 12 V spotřeby	0,43 kWh
Průměrný výkon 12 V spotřeb	203 W
Podíl 12 V spotřeb na bilanci spotřebované energie	2,9 %

Daná jízda odpovídá trase z Pardubic do Týnce nad Sázavou. Měření probíhalo 01.07.2021 v ranních hodinách. Klimatizace využívána nebyla a svítlo se pouze světly pro denní svícení. Teplota okolí se pohybovala mezi 17–20 °C. Ve vozidle byla jedna osoba a přibližně 50 kg nákladu. Na silnicích mimo město dosahujeme vyšších rychlostí než ve městě, stále však dochází často ke změnám rychlosti, rekuperaci tak využijeme i zde. Níže vidíme detail průběhu toku energie z trakčního akumulátoru, kde je i zřetelná rekuperovaná energie při brzdění. Abychom zachovali konzistenci s časem solárních panelů v předchozí kapitole, budou veškeré časové osy v středoevropském čase (takzvaný zimní čas).

Graf 4.1 – detail průběhu jízdy na okresní silnici



4.1.3 Jízda na dálnici

Tabulka 4.4 – hodnoty vybrané jízdy po dálnici

Parametr	Hodnota
Délka trasy	77,7 km
Doba jízdy	0h 42m
Průměrná rychlost	111 km/h
Spotřebovaná energie z trakční baterie	16,6 kWh
Rekuperovaná energie do trakční baterie	1,4 kWh
Podíl rekuperované energie na spotřebované	8,4 %
Bilance spotřebované energie	15,2 kWh
Spotřeba	19,57 kWh / 100 km
Průměrný odběr z trakční baterie	21,76 kW
Spotřebovaná energie na 12 V spotřeby	0,25 kWh
Průměrný výkon 12 V spotřeb	367 W
Podíl 12 V spotřeb na bilanci spotřebované energie	1,6 %

Jízda byla naměřena na trase z mimoúrovňové křižovatky u Opatovic nad Labem ke sjezdu na 50. kilometru dálnice D11 a zpět. Měření probíhalo 17.06.2021 od 13 hodin, byla využívána klimatizace na teplotu 22 °C a teplota okolí byla 32 °C. Ve vozidle byla jedna osoba a zanedbatelná hmotnost nákladu. Když to bylo možné, byla rychlost jízdy 130 km/h, která byla dodržována tempomatem. Jedná se tak o relativně svižnou jízdu, čemuž odpovídá i spotřeba. Na dálnici jedeme s relativní konstantní rychlostí, méně tak využíváme rekuperaci a vzhledem k vysokým trakčním spotřebám máme i malou procentuální spotřebu pro pomocné spotřeby.

4.2 Klimatizace a topení

Spotřeby klimatizace bohužel nemohly být měřeny přímo. Můžeme však porovnat data, pro stylově podobné jízdy, kdy při jedné byla klimatizace vypnutá a při dalších zapnutá. V tabulce níže jsou agregovaná data z několika provedených jízd bez klimatizace a s klimatizací.

Tabulka 4.5 – porovnání průměrné spotřeby s klimatizací a bez

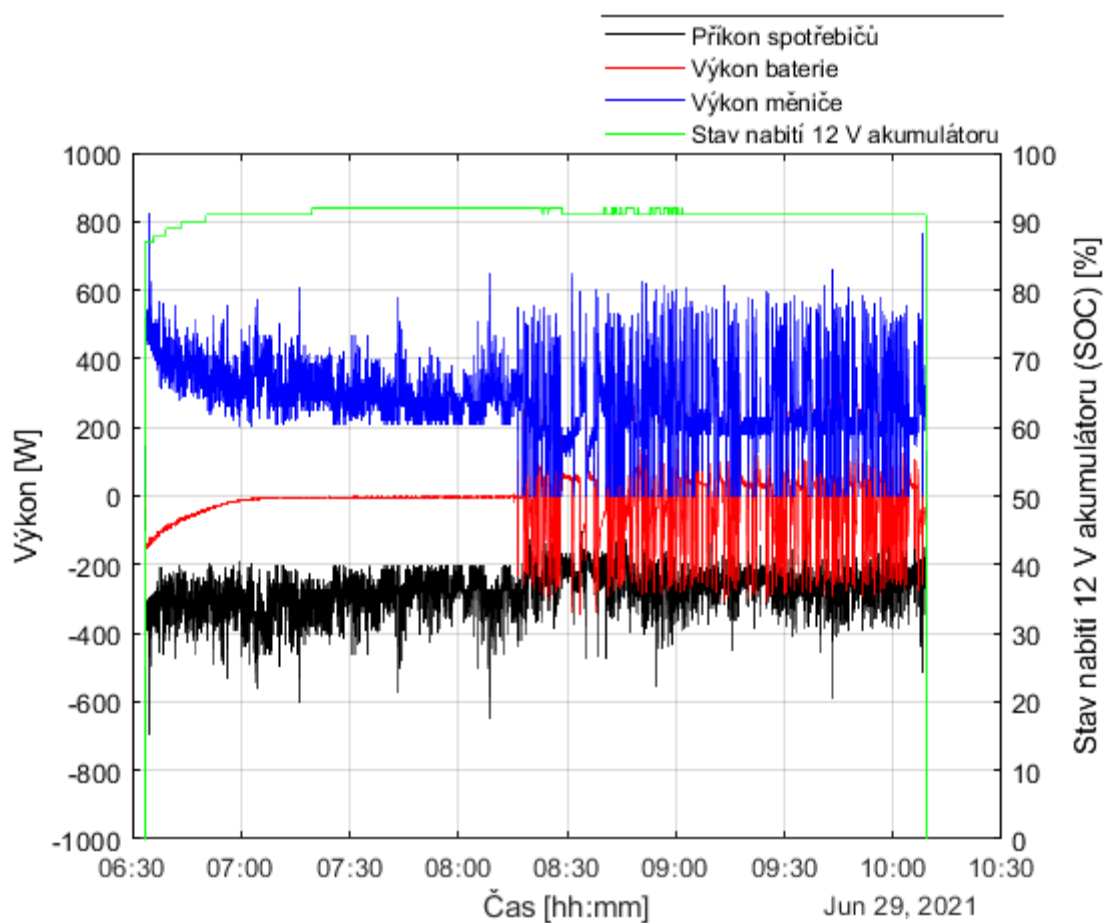
Jízda	Spotřeba bez klimatizace	Spotřeba s klimatizací
Město, max 50 km/h	9,7 kWh / 100 km	11,5 kWh / 100 km
Dálnice, max. 90 km/h	12,5 kWh / 100 km	12,8 kWh / 100 km
Dálnice, max. 130 km/h	19,4 kWh / 100 km	20,5 kWh / 100 km

Vozidlo bylo vždy chlazeno na teplotu 22 °C, je však třeba dodat, že venkovní teplota nebyla u všech jízd stejná, údaje tak nejsou dobře porovnatelné mezi městem a dálnicí. Venkovní teplota při jízdě na dálnici s klimatizací byla 30–32 °C, při jízdě ve městě byla průměrná venkovní teplota 25 °C. S většími rozdíly teplot se spotřeba zvyšuje, ve městě je však doba jízdy výrazně delší, tak se v přepočtu celkové spotřeby na kilometr klimatizace projeví více. V zimním období se bohužel neprovedl dostatek jízd, aby bylo možné stanovovat závěry o náročnosti vytápění vozidla, jelikož předmětné vozidlo využívá stejného tepelného čerpadla jak pro klimatizaci, tak pro vyhřívání, tak by pravděpodobně při daném rozdílu teplot byla náročnost velmi podobná. V zimě je však obvykle rozdíl teplot žádané a venkovní teploty vyšší, celková spotřeba pro vytápění tak bude vyšší. Pro náš model nabíjení však není konkrétní hodnota příkonu klimatizace tak důležitá, protože tyto spotřebiče jsou napájené z trakčního akumulátoru vozidla a modelu pro nabíjení 12 V akumulátoru se tak týkat nebudou a v modelu pro trakční akumulátor není z energetického hlediska podstatné, zda se energie využívá pro trakci či klimatizaci.

4.3 Spotřeby napájené z 12 V akumulátoru

Budeme se nyní věnovat výkonovým tokům v rámci 12 V sítě. Měření probíhalo jak pomocí sériově vyčítaných hodnot pomocí OBD diagnostiky, tak kontrolně pomocí paralelní diagnostiky přímo na kabelu od měniče a 12 V baterie pomocí loggeru MCR-4V. Perioda vzorkování OBD diagnostiky byla cca 0,6 s, perioda vzorkování loggeru MCR-4V je výrazně kratších 0,01 s, které následně logger průměroval na periodu 1 s. Rozdíl změřených hodnot zmíněnými metodami činil do 5 %, z praktických důvodů se tak zde využijí především data získaných pomocí sériové diagnostiky.

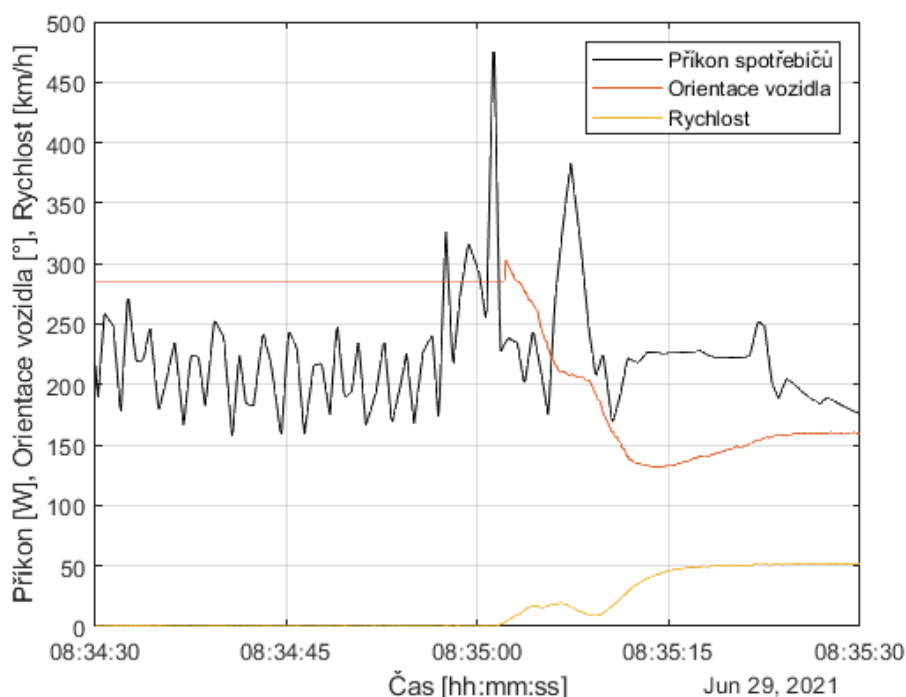
Graf 4.2 – průběh toku výkonů během městské jízdy ve 12 V síti elektromobilu.



Na grafu kladný výkon reprezentuje dodaný výkon, záporný odebraný výkon. Baterie se při nabíjení chová jako spotřebič, při vybíjení jako zdroj elektrické energie. Řízení napětí měniče umožňuje velmi rychle měnit směr toku elektrické energie z baterie dle potřeby, energii spotřebičům tak může dodávat zároveň jak měnič, tak baterie. Na grafu vidíme, že nejprve se baterie nabíjí a až poté se začíná využívat jako další zdroj energie pro spotřebiče. V současnosti řídicí logika udržuje tento akumulátor nabitý obvykle na hodnotě kolem 90 %, přesný způsob, jak fungují algoritmy, které rozhodují o využívání 12 V akumulátoru se však zjistit nepodařilo.

Podíváme na nyní na detail průběhu, Jednotlivé výrazné špičky ve spotřebách jsou jednoznačně způsobeny posilovačem řízení, jak vidíme z průběhu natáčení vozidla, ke špičkám dochází vždy krátce před změnou orientace vozidla, ve chvíli, kdy otáčíme volantem. Orientace 270° na grafu odpovídá směřování vozidla na západ, 180° odpovídá jihu. Celkově tak tyto spotřeby mají konstantní základ pro různé odběry, tak občasné výrazné krátkodobé výkyvy pro spotřebiče, které působí krátkodobě.

Graf 4.3 – detailní průběh příkonu 12 V spotřeb



4.4 Zobecněný model využívání elektromobilu

Pro zahrnutí fotovoltaického nabíjení je potřeba nejprve stanovit model s realistickým nájezdem pro elektromobil. Hodnoty stanoveného modelu jsou shrnuty v tabulce níže, jednotlivé vzdálenosti a doby jízdy vychází ideově z výše naměřených jízd.

Tabulka 4.6 – přehled zvolených jízd modelového případu využívání elektromobilu

Den v týdnu	Místo a denní doba	Délka trasy	Doba jízdy
Pracovní den (pondělí až čtvrtek)	Město ráno	11 km	28 minut
	Město večer	11 km	28 minut
Pátek	Dálnice odpoledne	38 km	20 minut
Sobota	Okresní silnice ráno	50 km	56 minut
	Okresní silnice večer	50 km	56 minut
Neděle	Dálnice večer	38 km	20 minut

Týdně se tak s elektromobilem najede celková trasa 264 kilometrů. To odpovídá ročnímu nájezdu 13 700 km, což je roční nájezd, který může odpovídat běžnému osobnímu vozidlu v soukromém vlastnictví. Podíl cest tak bude: 34 % tras budeme jezdit ve městě, 28 % po dálnici a 38 % cest na běžných komunikacích mimo obec. Časově vzhledem k rychlostem však strávíme ve vozidle ve městě 59 % celkového času, 11 % na dálnicích a 30 % na okresních silnicích. Celkově strávíme ve vozidle 3,5 hodiny týdně, což se může zdát málo, ale koeficient denního využití osobních automobilů je běžně kolem půl hodiny denně, zbytek času vozidla stojí.

Detailním průběhům energií při jízdě jsme se ve stručnosti věnovali v předchozí podkapitole, pro model fotovoltaického nabíjení budeme počítat s konstantním průběhem výkonu při dané jízdě, aby model nabíjení byl dostatečně přehledný. Uvažované odběry po dobu jízdy na daném časovém úseku jsou uvedeny v tabulce níže.

Tabulka 4.7 – uvažované odběry při jízdě na daném typu komunikace

Jízda	Průměrný odběr z trakční baterie	Průměrný odběr 12 V spotřeb
Ve městě	2,95 kW	270 W
Okresní silnice	7,14 kW	203 W
Dálnice	21,76 kW	367 W

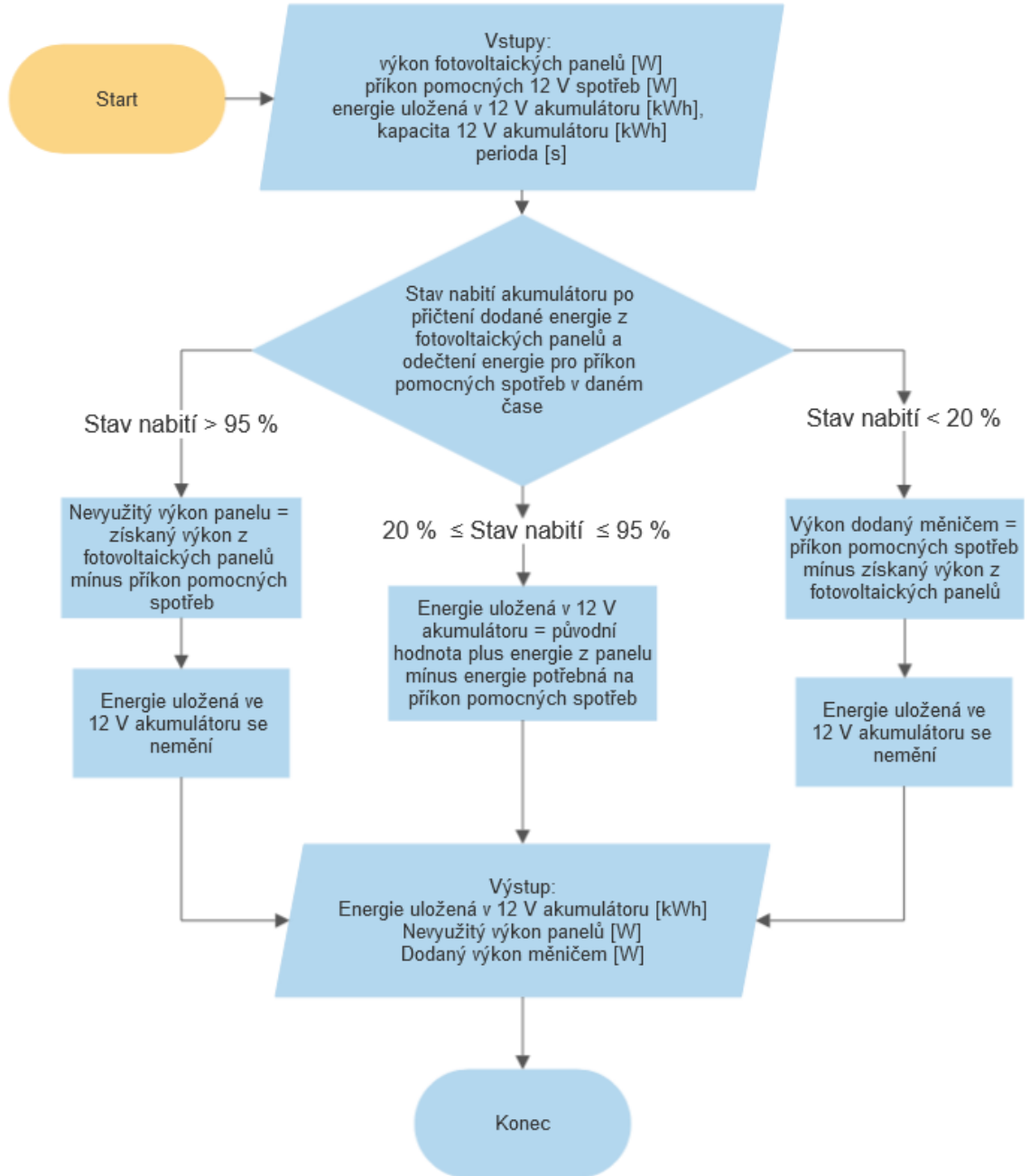
4.5 Model s nabíjením 12 V akumulátoru

V této části probereme možnosti integrace fotovoltaického systému pouze do 12 V části vozidla a provedeme simulaci pro získanou energii. Jako výkon panelů využijeme namodelovaných průběhů z kapitoly 3 pro případ Prahy bez uvažování překážek v dopadu záření. Tyto data máme k dispozici ve formě tabulky pro každý den v roce a hodinový úhel slunce od 0 do 360°. Panel uvažujeme v horizontální poloze.

Příkony pomocných spotřeb stanovíme z tabulky 4.7 a dobu jejich využívání z tabulky 4.6. Počáteční stav nabití 12 V akumulátoru budeme uvažovat jako 80 %. Účinnost měniče fotovoltaických panelů budeme uvažovat 90 %. Strategii nastavíme tak, že při poklesu nabití akumulátoru na 20 % začneme pokrývat příkon pomocných spotřeb z měniče, tak aby nedošlo k příliš hlubokému vybití. Dobíjení akumulátoru z měniče uvažovat nebudeme, budeme jej nabíjet pouze z fotovoltaických panelů. Na druhé straně při překročení hranice nabití akumulátoru 95 % budeme předpokládat, že dostupný výkon fotovoltaických panelů již nedokážeme efektivně využívat ani ukládat a bude tak nevyužitelný.

Na diagramu níže je zobrazena logická část strategie nabíjení 12 V akumulátoru. Tato část se v cyklu postupně provede pro celý den a poté pro všechny dny v týdnu s rozlišením na 4 minuty.

Obrázek 4.2 – vývojový diagram rozhodovacího algoritmu řízení nabití 12 V akumulátoru



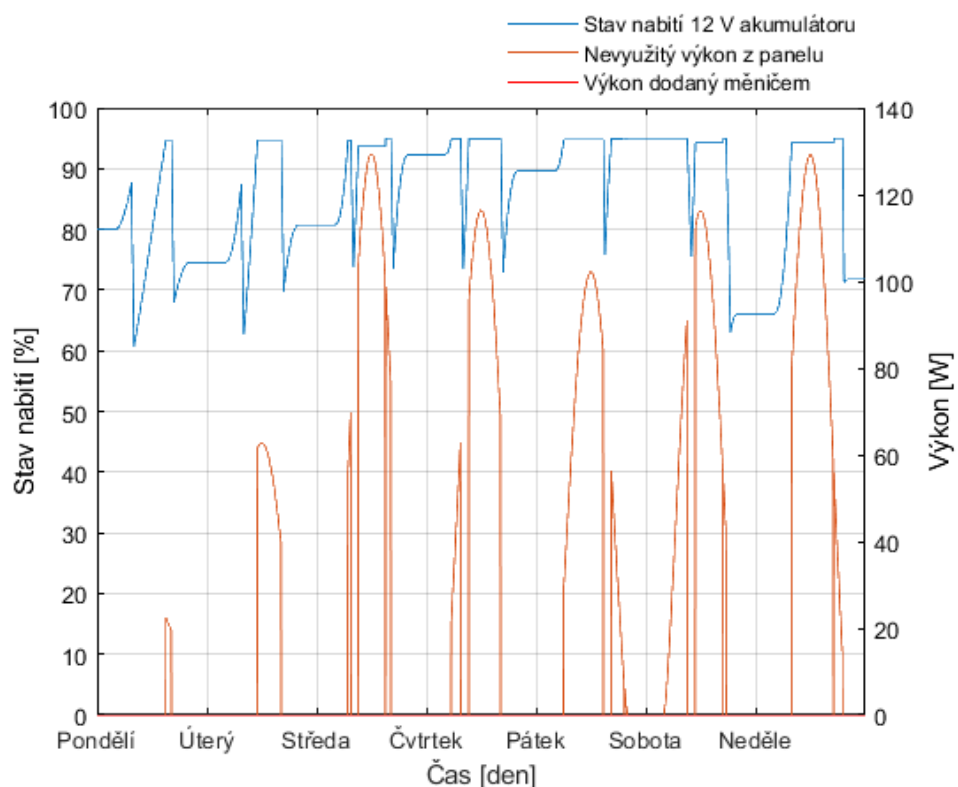
Z výstupu si můžeme stanovit koeficient využití dostupného výkonu fotovoltaického panelu:

$$k_v = 1 - \frac{P_n}{P_p} \quad (4.1)$$

Kde: k_v – koeficient průměrného využívání dostupného výkonu panelu [-]
 P_n – průměrný nevyužívaný výkon z panelu [W]
 P_p – průměrný výkon získaný z panelu [W]

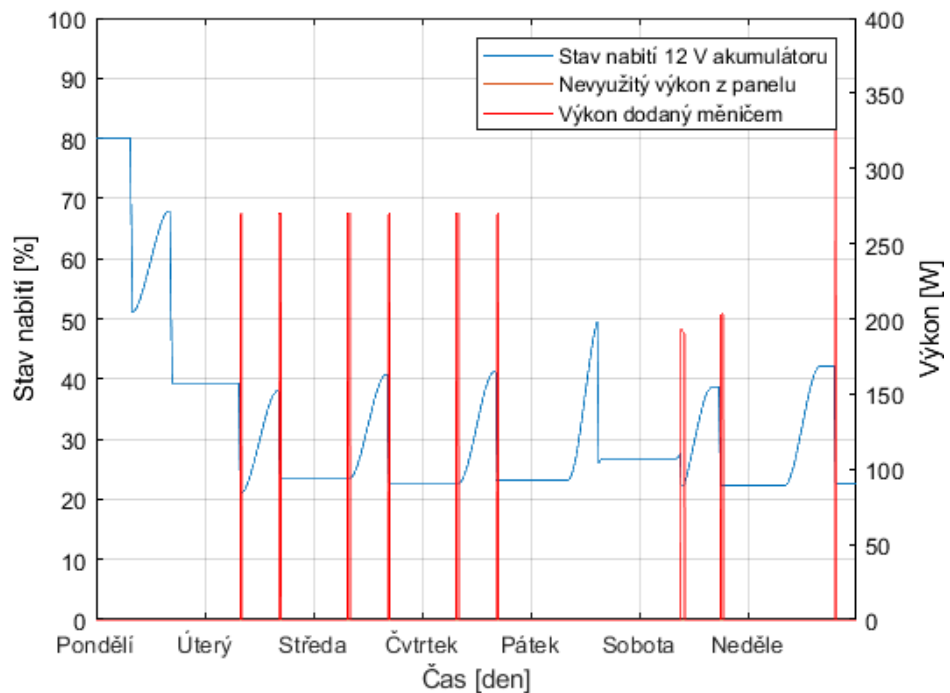
Na grafu 4.4 vidíme průběh stavu nabití akumulátoru v červencovém týdnu, i takto malý panel pokryje bez problému 12 V spotřebiče, spíše je problém, že o část výkonu fotovoltaických panelů přijdeme, protože jí v časech, kdy vozidlo stojí, nebudeme moci kam uložit, protože kapacita 12 V akumulátoru je nedostatečná a příkon pomocných spotřeb příliš malý, než aby se dokázala energie získaná z fotovoltaických panelů efektivně využít. Za tento týden byly panely schopny dodat 6,4 kWh elektrické energie, spotřeba 12 V spotřebičů je 1,78 kWh, koeficient průměrného využití je tak pouze 27 %. Fotovoltaické panely pokryly tyto spotřeby beze zbytku, po celou dobu jsme nemuseli dodat žádnou energii skrze měnič z trakční baterie.

Graf 4.4 – stav nabití 12 V akumulátoru, letní období, panel 1 m²



Naproti tomu v prosincovém týdnu je týdenní zisk panelu pouze 0,7 kWh, z čehož nejsme schopni pokrýt ani veškeré 12 V spotřeby, které činí 1,77 kWh. Z trakční baterie se přes měnič dodalo 0,8 kWh energie, jak je znázorněno na grafu 4.5. Zbytek chybějící energie je zahrnut v poklesu stavu nabití 12 V akumulátoru z 80 % na začátku týdne na 23 % na jeho konci. V tomto případě je tato varianta rovnocenná variantě se zapojením do trakčních baterií elektromobilu, protože energie nemáme dost ani na pokrytí 12 V spotřebičů, koeficient využití získané energie je 100 %.

Graf 4.5 – stav nabití 12 V akumulátoru, zimní období, panel 1 m²



4.5.1 Možnosti zvýšení kapacity akumulátoru

Obrázek 4.3 – motorový prostor vozidla Hyundai Kona Electric



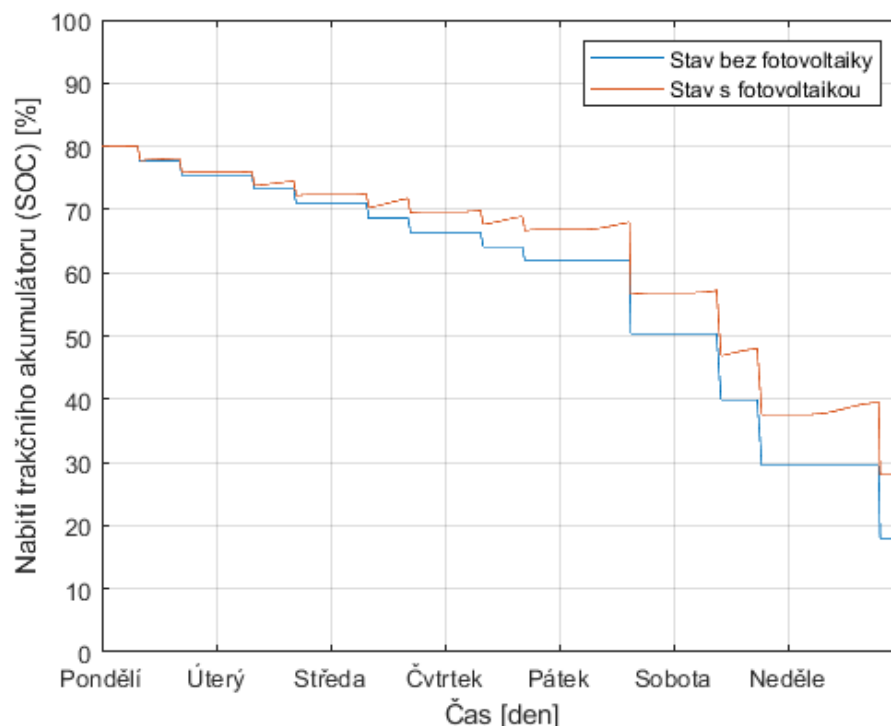
Na obrázku 4.3 vidíme, že v motorovém prostoru vozidla Hyundai Kona Electric je stále relativně dost prostoru, především pokud to porovnáme s moderními vozidly se spalovacím motorem, kde bývá motorový prostor často naplněn až po kapotu. Samozřejmě nemusí být dostatečný prostor k dispozici vždy, často se u elektromobilů pod přední kapotou nachází další

prostor pro zavazadla. Případně se ale pro 12 V akumulátor dá uvažovat o bateriích typu LiFePO_4 , které patří k těm bezpečnějším lithiovým bateriím, bylo by tak možné zvětšit kapacitu baterie na stejném prostoru. U předmětného vozidla ale prostor pro umístění většího 12 V akumulátoru je, neměl by tak být konstrukční problém zvýšit kapacitu akumulátoru přibližně o polovinu na 75 Ah, to je hodnota běžně využívaná u osobních vozidel. Taková kapacita by nám umožnila lépe hospodařit v určitých případech, které zde však simulovány nebyly. Mohlo by se jednat například o případ, kdy by se vozidlo využívalo pro delší jízdy, ale ve větších časových odstupech.

4.6 Modely pro nabíjení vysokonapětového akumulátoru

V tomto modelu se budeme zabírat situací, že nebudeme pokrývat panelem drobné 12 V spotřeby, ale budeme mít k dispozici měnič pro dodávání energie přímo do trakčního akumulátoru. Počáteční stav nabití trakčního akumulátoru uvažujeme 80 %. Jednotlivé poklesy ve stavu nabití akumulátoru na grafu odpovídají daným časům, kdy s vozidlem jezdíme podle jednotlivých jízd, tak jak jsme je stanovili v kapitole 4.4. Výkon panelů opět použijeme pro horizontální panel bez překážky z kapitoly 3, pro podmínky České republiky a nebudeme uvažovat žádné překážky. Průběh v letním období odpovídá týdnu v červenci a v zimním období týdnu v prosinci. Účinnost měniče fotovoltaických panelů budeme uvažovat 90 %.

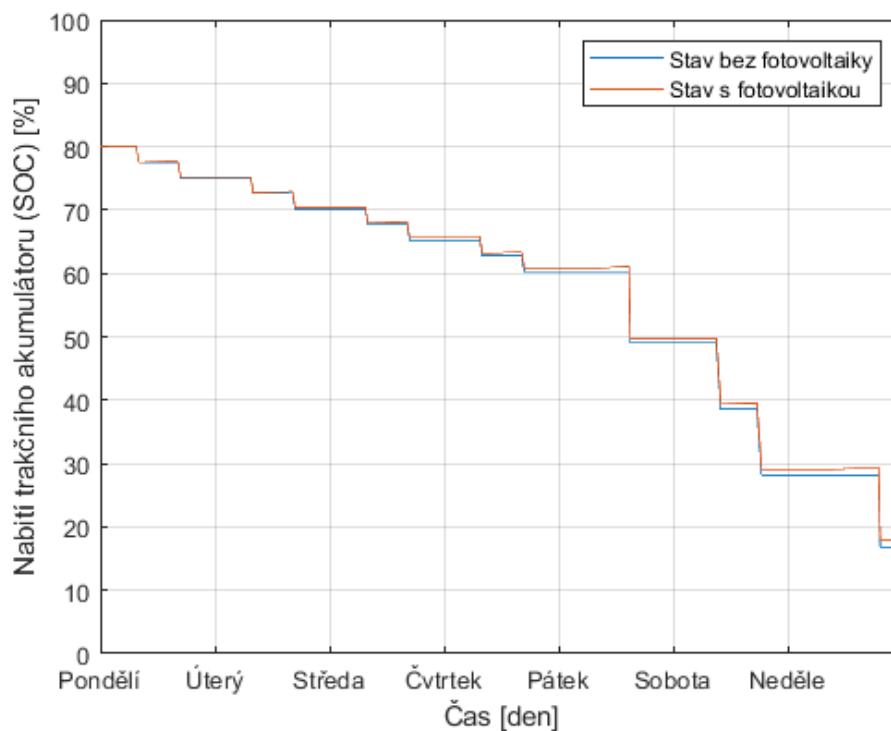
Graf 4.6 – stav nabití trakčního akumulátoru, letní období, panel 1 m²



Na grafu výše zřetelně vidíme mírné nárůsty stavu nabití v průběhu dne díky získané energii z fotovoltaických panelů, poté následují krátké úseky s jízdou, způsobující výrazný pokles stavu nabití akumulátoru. V tomto případě byl po týdnu využívání elektromobilu stav nabití trakčního akumulátoru vyšší o 10 %, což odpovídá 6,4 kWh, to je množství energie, které nám může stačit na najetí cca 50 km.

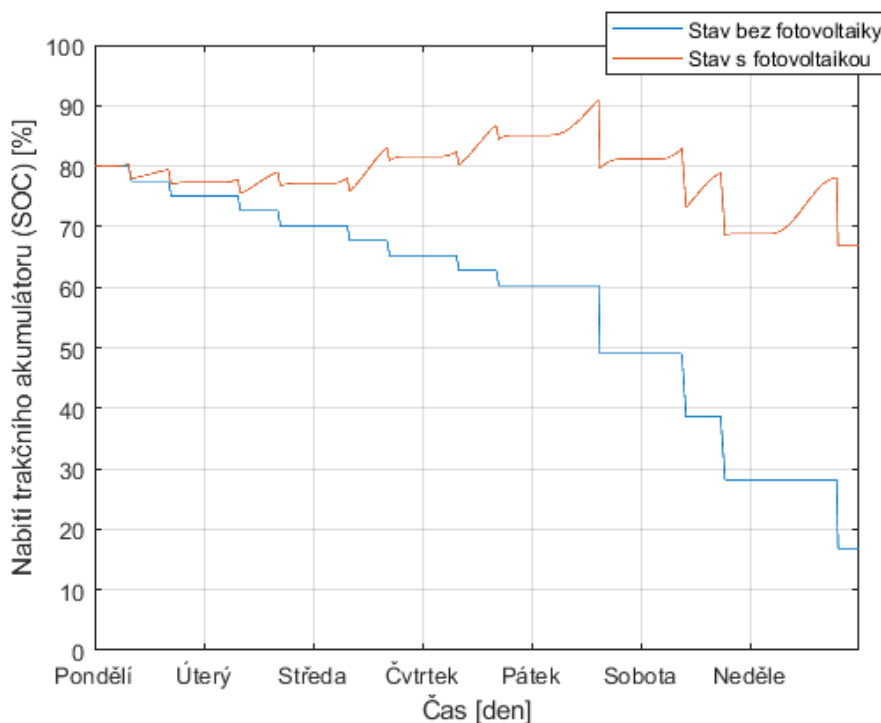
V zimním období bude získaná energie výrazně menší, po celý týden jsme získali pouze 0,7 kWh energie, což je vzhledem ke spotřebě téměř zanedbatelné. V takovém případě bychom efekt fotovoltaického systému pravděpodobně ani nepoznali, průběh tohoto případu je znázorněn níže na grafu 4.7.

Graf 4.7 – stav nabití trakčního akumulátoru, zimní období, panel 1 m²



Na elektromobil lze ale umístit i daleko větší panel, jak jsme viděli na konceptech v kapitole 2. Nasimulujeme si tedy stav pro panel s plochou 5 m² v červenci. V létě pak dostáváme velmi zajímavý průběh, fotovoltaické panely by nám v tomto optimistickém případě pokryly téměř všechny spotřeby, jak je zřetelné z grafu 4.8. Rozdíl ve stavu nabití trakčního akumulátoru je tak na konci sledovaného období 50 %, získali jsme celkově 32 kWh energie, s tímto množstvím energie můžeme najet až 200 km. Jedná se však o velmi velkou plochu panelů a období, kdy zisk fotovoltaických panelů byl nadprůměrně vysoký.

Graf 4.8 – stav nabití trakčního akumulátoru, letní období, panel 5 m²



Model s nabíjením trakčního akumulátoru je relativně přímočarý, energii jsme schopni využívat i ukládat v plném rozsahu i v létě kdy budeme počítat s maximálním ziskem ze solárních panelů. Výjimkou by jediné bylo, kdybychom baterie měli nabít, a pak například na delší dobu odjeli na dovolenou a elektromobil nechali stát na sluníčku. Ale to už je velmi okrajový případ. Výhody tohoto způsobu tak jsou zřejmé, využití velkého úložiště ve formě trakčních baterií. Nevýhodou je, že elektrický proud vždy minimálně projde dvěma měniči, než se spotřebuje a tím nám vznikne o něco menší účinnost řetězce toku energie. Každopádně u tohoto řešení je nutnost spolupráce v řízení mezi měničem pro fotovoltaikou a BMS trakčních baterií.

4.6.1 Možnost využití měniče pro 12 V síť

Další možností může být využití měniče mezi trakčním akumulátorem a palubní sítí a využívat ho pro obousměrný tok energie. Obvykle se tyto měniče v elektromobilech využívají pouze pro směr toku výkonu od trakční části do 12 V sítě, avšak jejich modifikace pro obousměrný tok výkonu by vyžadoval spíše zásah do jeho řízení, samotný návrh měniče by se příliš komplikovat neměl, cenu by tato změna také zvýšit neměla. Už dnes se již u hybridních vozidel někdy využívá obousměrného toku výkonu mezi palubním a trakčním okruhem. Tento měnič by také měl mít dostatečný výkon pro tok výkonu ze solárních panelů do trakčních baterií, u vozidla Hyundai Kona Electric činí 1,8 kW, což je výrazně více, než může být maximální výkon panelů na takovém vozidle.

Tento model tak do určité míry kombinuje výhody obou možností, můžeme využít jednoduššího měniče mezi panelem a palubní sítí a při přebytku energie ve 12 V síti jí můžeme ukládat přes měnič do trakčních baterií. Sice je potřeba počítat s nižší efektivitou, než když budeme mít měnič napřímo, zato nebudeme zbytečně přidávat další výkonové komponenty do elektromobilu.

4.7 Shrnutí strategie

U menšího panelu kolem 1 m² bychom si vystačili nejspíše i s možností využívání panelu pouze pro nabíjení 12 V akumulátoru, je však třeba vzít v úvahu, že jeho kapacita je omezená a při delším stání vozidla může rychle dojít k naplnění jeho kapacity. V případě větších panelů bude vhodné navrhnout takové zapojení, aby se využíval jako úložiště i trakční akumulátor.

Vzhledem k tomu, že výrobce vozidla nebude vědět dopředu, jak bude uživatel elektromobil využívat, zdá se být vhodnější ve strategii dobíjení počítat i s tím, že bude potřeba občas k ukládání energie z panelů využít i trakční akumulátor. V každém případě bude potřeba s panelem počítat v řídicích algoritmech elektromobilu, tak aby v akumulátoru byla rezervována určitá část pro nabíjení z fotovoltaických panelů. Například ponechání rezervy 2 kWh u daného elektromobilu znamená možnost snížení dojezdu kolem 10 kilometrů, nejedná se tak o zcela zásadní hodnotu, avšak v tomto případě by se mohla nechat volba na uživateli vozidla, který by si sám mohl nastavit, jak velkou rezervu ponechávat pro případné ukládání energie z fotovoltaických panelů.

4.7.1 Další možnosti budoucí optimalizace

Zajímavé by také bylo do řídicích algoritmů zakomponovat roční období, například v závislosti na zeměpisné poloze můžeme ponechat případnou rezervu v akumulátorech výrazně menší, protože například zisk panelů v zimě bude malý. Vzhledem k tomu, že je už poměrně velká část moderních vozidel vybavena jak přijímačem signálu GPS, tak přístupem na internet, tak by bylo určitě přínosné při aktuálních strategiích dobíjení počítat i s předpovědí počasí, která tím pádem bude vozidlu k dispozici a podle toho rozhodovat jakou ponechávat rezervu v bateriích pro další nabíjení. Spotřebou, s kterou tento model nepočítal je, že po zastavení vozidla, vypnutí motoru a jeho zamknutí má ještě po určitou dobu menší spotřebu, než se všechny řídicí jednotky uspí. V tomto modelu jsme jí zanedbali, pro přesnější model by bylo vhodné počítat i s tímto odběrem.

5 VYČÍSLENÍ PŘÍNOSU FOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU

V této kapitole se budeme věnovat vyčíslení přínosu fotovoltaického systému z různých pohledů, především z pohledu vyčíslení energetických úspor a jejich přepočet do roviny ekologické a ekonomické. Stručně zde jsou také popsány případné negativní stránky fotovoltaického systému v elektromobilu a v závěru je představena alternativní možnost k řešení navrženého v této diplomové práci.

5.1 Výpočet energetických úspor

Pro výpočet energetických úspor budeme vycházet z modelu v kapitole 3. Abychom se přiblížili realitě získané energie z fotovoltaického panelu na vozidle budeme uvažovat občasnou překážku dopadu v jihozápadním směru, kterou jsme vyčíslili na úbytek o 12 % získané energie, budeme také počítat s vyšší teplotou, kterou budou panely na vozidle pravděpodobně vystaveny, která znamená další snížení o 9 %. Účinnost měniče pro fotovoltaiku budeme uvažovat 90 %. Abychom se dále přiblížili realitě, tak budeme násobit výslednou získanou energii koeficientem využití 0,95, protože jak vyplývá ze simulací v kapitole 4, tak někdy i přes veškerou snahu o optimalizaci dobíjení nebudeme moct dokázat využít získané energie z fotovoltaických panelů, z důvodu, že akumulátory jsou plně nabitě. Tento koeficient se velmi těžko stanovuje, pokud neznáme přesné využívání vozidla v daném případě, které je často funkcí velmi náhodnou. Budeme uvažovat plochu panelů, která bude odpovídat zhruba konceptům elektromobilů s fotovoltaickým nabíjením které jsme představili v kapitole 2.

Tabulka 5.1 – odhadované získané roční množství energie pro různé velikosti fotovoltaických panelů a přepočet na kilometry, které lze díky této energii najet při uvažované spotřebě elektromobilu 15 kWh na 100 km

Uvažovaná plocha a orientace panelů	Odhadovaná získaná roční energie	Množství kilometrů, které lze najet při dané spotřebě
1 m ² malý střešní (horizontální)	124 kWh	826 km
2 m ² střešní (horizontální panely)	248 kWh	1653 km
5 m ² kapota a střecha (horizontální panely)	620 kWh	4133 km
4 m ² kapota a střecha (horizontální panely) + 3,5 m ² obvod karosérie (vertikální panely)	783 kWh	5220 km

5.2 Výpočet snížení nepřímých emisí

Ekologičnost provozu elektromobilů do výrazné míry závisí na tom, jakým způsobem elektrickou energii vyrábíme. Česká republika v tomto pohledu patří s emisemi z elektráren 432 g CO₂/kWh [33] k horším zemím v Evropě, přičemž nejvyšší emise má Polsko s 751 g CO₂/kWh. Při těchto hodnotách je provoz elektromobilu se spotřebou 15 kWh elektrické energie na 100 km z hlediska těchto emisí na tom podobně jako běžné vozidlo se spalovacím motorem (emise kolem 120 g CO₂ na km). Nejnižší emise CO₂ na vyrobenou kWh elektřiny mají Island a Švédsko, kde jsou téměř nulové, z větších zemích pak Francie kvůli využívání jaderné energetiky, kde emise jsou 56 g CO₂/kWh. Hmotnost celkového vypuštěného CO₂ za dané množství vyrobené elektrické energie můžeme vypočítat podle následující rovnice:

$$m_{CO_2} = \frac{E \cdot emise_{kWh}}{1000} \quad (5.1)$$

Kde: m_{CO_2} – hmotnost vypuštěného oxidu uhličitého [kg]

E – celková energie [kWh]

$emise_{kWh}$ – emise CO₂ na vyrobenou kWh [g CO₂/kWh]

Pokud se tak podíváme na přínos fotovoltaického systému, tak v České republice by nám horizontální panel o velikosti 1 m² s výše uvedeným ziskem 124 kWh ročně nepřímo snížil emise provozu elektromobilu o 53,6 kilogramů CO₂ za rok, jak vyplývá z výpočtu pomocí rovnice 5.1.

Z dlouhodobého pohledu se však emise z vyrobené kWh elektřiny v čase snižují přechodem na jiné zdroje. V Evropě se za třicet let průměrné emise CO₂ snížily za vyrobenou kWh z 524 g na 255 g v roce 2019. [33] Tento trend bude zcela určitě pokračovat i v budoucnu vzhledem k silnému tlaku na snížení emisí. Tento aspekt ekologického přínosu fotovoltaických panelů umístěných přímo na vozidle tak bude pravděpodobně v budoucnu postupně klesat.

5.3 Výpočet ekonomických úspor

Ekonomické úspory ze získané energie nelze jednoznačně určit, bude záležet podle jaké sazby elektromobil obvykle dobíjíme. V tabulce 5.2 níže uvádíme přehled, kolik bychom zaplatili za elektrickou energii v různých distribučních sazbách, pokud bychom jí nezískali z fotovoltaických panelů.

Tabulka 5.2 – roční finanční úspora z využití fotovoltaické energie na vozidle při ceně dané distribuční sazby [34–36]

Distribuční sazba	D02d (standard)	D27d (elektromobilita)	Rychlonabíjecí stanice
Cena za kWh	4,2 Kč	2 Kč *	4,5–9,5 Kč
124 kWh (panel 1m ²)	521 Kč	248 Kč	558–1178 Kč
620 kWh (panel 5 m ²)	2604 Kč	1240 Kč	2790–5890 Kč
783 kWh (panel 7,5 m ²)	3289 Kč	1566 Kč	3524–7439 Kč

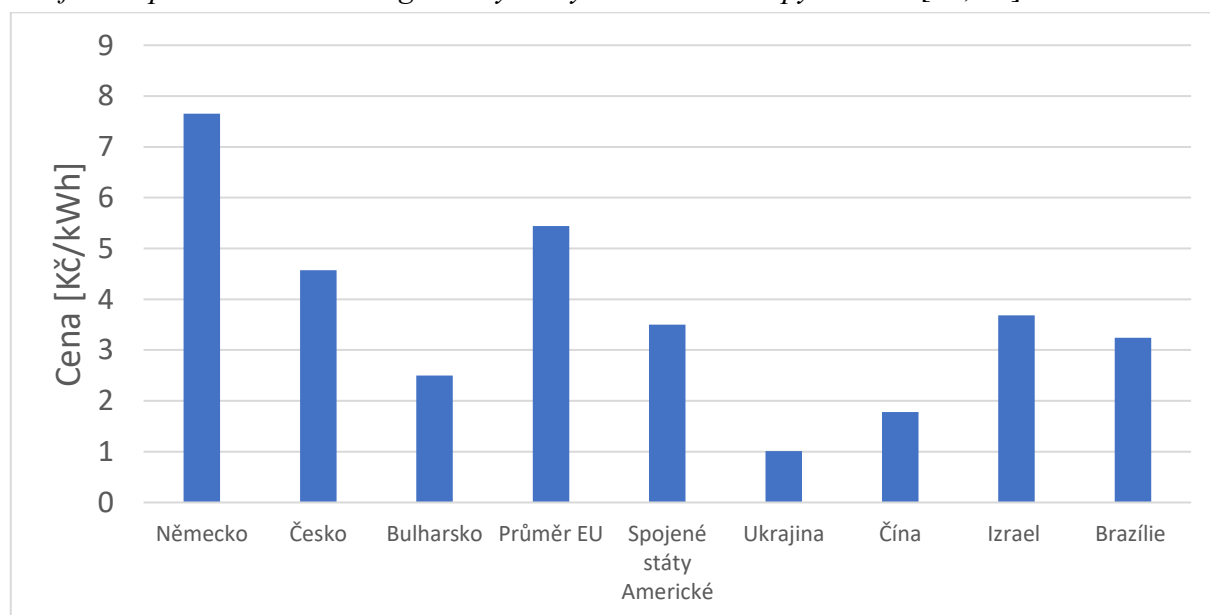
* v nízkém nočním tarifu, jinak podobná cena jako D02d

Obvykle budeme využívat různých nabíjecích míst s různými cenami, je však nutno brát do úvah i výrazně rozdílné ceny energií v jednotlivých distribučních sazbách. V případě veřejných rychlonabíjecích stanic, tak sice v současnosti existují stále některé, kde lze nabíjet zdarma, ale s vyšším počtem elektromobilů pravděpodobně jejich počet bude klesat. Navíc vzhledem k vysokému zatížení energetické sítě vysokým odběrem lze předpokládat, že se u těchto stanic etabluje vyšší cenová hladina než pro pomalejší nabíjení.

5.3.1 Porovnání zemí světa

Je přínosné se na ekonomickou stránku věci opět podívat globálním pohledem. Na grafu 5.1 vidíme průměrné ceny elektřiny pro domácnosti, při započítání všech poplatků v různých zemích světa. Podobně, jak jsme si to ukázali předtím na příkladu České republiky, mohou se samozřejmě v jednotlivých zemích výrazně lišit tarify elektrické energie, do těchto detailů zde však už zde zabíhat nebudeme.

Graf 5.1 – porovnání cen energie ve vybraných zemích Evropy a světa [37, 38]



Obecně ale platí, že ceny se mohou lišit i několikanásobně, a to i v rámci Evropské unie. Celosvětově nejdražší elektrická energie pro domácnosti je v Německu, kde v současnosti činí až kolem 8 korun za kWh. Česká republika patří k zemím s průměrnou cenou elektrické energie. Atraktivita fotovoltaického systému pro elektromobil tak může do značné míry záviset i na místních cenách energií. V rámci této problematiky je také potřeba se dívat trochu do budoucna, lze odhadovat, že nárůst cen elektrických energií bude dále pokračovat, což může být výhoda pro fotovoltaický systém na elektromobilu.

5.4 Negativní stránky

5.4.1 Zvýšení ceny vozidla

Odhadnout cenu za integraci fotovoltaiky do vozidla je velmi obtížné, vzhledem k tomu, že je zatím v produkci téměř nepotkáváme. Pokud bychom vycházeli čistě papírově z ceny panelů, a měniče s výkonem 0,5 kW, dostali bychom se pro panely s celkovou plochou kolem 2 m² na částku kolem 25 000 korun. Jedná se o maloobchodní ceny, pro velkoodběratele bude cena pravděpodobně menší. Velkou neznámou však je, kolik budou stát úpravy částí karosérie pro integraci solárních článků. Při sériové výrobě ve velkém měřítku a optimalizaci všech procesů by však tyto náklady už nemusely být zcela zásadní.

Jedinou cenu, kterou se podařilo v tomto směru v současnosti najít je v ceníku pro model Hyundai Ioniq 5, kde příplatek za polopropustný fotovoltaický panel v panoramatickém střešním okně je 10 000 korun (rozdíl mezi příplatkem za panoramatické střešní okno bez solárních článků a se solárními články). [39] V ceníku je však poznámka, že tato konfigurace bude dostupná až později, je tak potřeba to brát se značnou rezervou, navíc u prémiové příplatkové položky bude i pravděpodobně větší marže výrobce. Příplatek je tak na úrovni 1 % ceny celého elektromobilu, která se pohybuje nad milionem korun. Problémem je, že se nikde v technických specifikacích vozu nepodařilo dopátrat přesnou plochu tohoto panelu, dle nákrešů jí lze však odhadnout na 1,5 m². Pokud bychom se pokusili o jednoduchý výpočet návratnosti při této ceně pro tento elektromobil, tak získaná energie bude 186 kWh ročně, což při ceně 4 Kč / kWh znamená roční finanční úsporu kolem 750 Kč. Návratnost investice je tedy 13 let, což je na vozidlo už hraniční doba, a to uvažujeme původní výkon panelů bez jejich degradace. Pokud bychom uvažovali výše uvedené země s nejdražší cenou elektrické energie, tak návratnost se sníží na 7 let, což není zcela neatraktivní. Už dnes se tak za určitých podmínek zdá investice do příplatkového solárního panelu na vozidle jako poměrně zajímavá investice.

5.4.2 Degradace panelů

Fotovoltaickým panelům postupem času klesá účinnost, u současných panelů se udává snížení zhruba do 1 % ročně. Pokud bychom pro osobní automobil uvažovali relativně dlouhou dobu životnosti 20 let, tak by nám panely měly stále dodávat ještě minimálně tři čtvrtiny původního výkonu. Samozřejmě praxe může v budoucnu ukázat jiné výsledky, na základě současného stavu poznání se však nelze domnívat, že by bylo třeba solární panely během životnosti elektromobilu vyměňovat či servisovat, jejich výkon během času sice klesat bude, ale energii budou dodávat stále. Například životnost trakčních baterií je kolem 8 let, za tu dobu bychom je tak pravděpodobně měnili alespoň dvakrát. Co se týče měniče pro fotovoltaiku, tak vzhledem k jeho relativně malému výkonovému zatížení by také neměl být problémovější komponenta než ostatní měniče, které se v elektromobilu nachází.

5.4.3 Bezpečnost a poškození panelu

Pokud se podíváme na problematiku opravitelnosti panelu při případném poškození, tak se obecně u nových aut stejně často v servisech přistupuje k výměně celých dílů a reálně se příliš neopravují jednotlivé díly karosérie a spíše se rovnou mění, cena opravy tak bude pravděpodobně vyšší o cenu fotovoltaického panelu, který se na daném díle nachází. Naopak u starších ojetých vozidel se i dnes často postupuje pouze k nutným opravám, běžně potkáváme v provozu vozidla se zaslepeným EGR ventilem, odstraněným filtrem pevných částic, nefunkční klimatizací a podobnými úpravami, takže u takových vozů nejspíše budoucí majitel nebude ani zvlášť udržovat fotovoltaický systém, který není přímo potřeba k provozu vozidla. Také je potřeba vzít v úvahu, že střešní panely se budou nacházet na polohou dobře chráněném místě, které se při běžných nehodách nepoškodí. Vozidlo, které je po dopravní nehodě vážně poškozeno i na střeše, tak se pravděpodobně jednalo spíše o těžší dopravní nehodu a cena opravy bude tak jako tak vysoká nehledě na fotovoltaický systém.

Vlastností fotovoltaického panelu je, že jej nemůžeme jednoduše vypnout, i v případě, že nebude zapojen, bude na jeho výstupu určité napětí, za podmínky, že na něj dopadá záření. Je tak potřeba toto vzít v úvahu a dimenzovat fotovoltaický systém elektromobilu na malé napětí, aby nebyl nebezpečný v důsledku nehody dotykem živých částí, pokud by například došlo k jeho oddělení od zbytku vozidla. Pokud se podíváme na problematiku bezpečnosti v případě požáru, tak na rodinných domech je fotovoltaický systém problematický z toho hlediska, že bývá větší množství panelů zapojených do série a může se napětí pohybovat v stovkách až do tisíce voltu, které může znesnadnit hašení takového domu. Každopádně k elektromobilu se musí při hašení požáru stejně přistupovat jako k předmětu pod nebezpečným napětím, vzhledem

k napětí baterie a dalších výkonových komponent, které se může pohybovat do 1000 V. Fotovoltaický panel s napětím v řádu desítek voltů tak určitě bezpečnost elektromobilu příliš nezhorší, z hlediska nebezpečí zůstávají nadále lithiové baterie elektromobilu největším rizikem.

5.5 Alternativy

Alternativou k navrhovanému řešení může být solární nabíjecí stanice, kdy jsou rychlonabíjecí stanice pro elektromobily vybaveny fotovoltaickými panely. Výhodou tohoto řešení je, že můžeme panely umístit ve vhodném úhlu a můžeme se vyvarovat překážkám které by nám stínili. Nevýhodou je, že musíme stanice vybavit úložištěm, nejčastěji ve formě baterií, které zvýší cenu nabíječky. Také nám to ve svém důsledku zkomplikuje účinnost celého řetězce, protože vyrobenou energii nejprve uložíme do baterií nabíjecí stanice, poté je přes měnič dobíjecí stanice uložíme do baterií elektromobilu a poté přes další měnič v elektromobilu se bude energie teprve využívat. Fotovoltaický panel přímo v elektromobilu umožňuje přímější využití energie s vyšší účinností a menším počtem konverzí. Také přijdeme o určitý komfort, nad fotovoltaickými panely na střeše vozidla nebudeme muset přemýšlet, budou nám určitou energii dodávat vždy když to bude možné. Navíc v případě, že budou baterie u statické solární nabíjecí stanice plně dobité, tak o energii také pravděpodobně přijdeme, protože k připojení solárních elektráren pro zpětný tok do distribuční sítě se dnes již přistupuje spíše výjimečně vzhledem k nízké kvalitě elektrické energie z fotovoltaických systémů.

Obrázek 5.1 – solární nabíjecí stanice pro elektromobily [40]



ZÁVĚR

Závěrem lze konstatovat, že v současnosti je integrace fotovoltaických panelů do vozidla technicky proveditelná a může být po energetické stránce i smysluplná a přínosná. Určit přesný přínos fotovoltaických panelů na vozidle je relativně obtížné, protože do modelu vstupuje velké množství proměnných. Je ovlivňováno jak klimatickými podmínkami, tak samotným způsobem provozu vozidla a také téměř náhodnými vlivy, které nelze předpovědět, jako zda vozidlo bude na parkovacím místě ovlivňováno překážkami v dopadajícím záření, které mohou výrazně snížit získanou energii. Z krátkodobého hlediska jedné jízdy nám fotovoltaický systém na vozidle dojezd příliš nezvýší, ale z dlouhodobějšího pohledu nám může v průběhu týdne dodat energii, která nám už může stačit na nájezd 50 kilometrů za příznivých podmínek.

Pokud bychom se krátce věnovali slabším stránkám této práce, tak některá témata by si jistě zasloužila větší pozornost. Praktická měření se prováděli pouze v rozsahu, ve kterém to situace, kdy vznikala tato práce, dovozovala. Stanovení výkonu fotovoltaických panelů si zasloužilo spíše praktičtější přístup měření v reálných podmínkách, spolehli jsme se na simulační program. Ale například na počítači simulovat, jak se v praxi projeví různé překážky, jako může být listí, prach na střeše nebo vliv stínění od různé vegetace je téměř nemožné. Bylo třeba ve větší míře spoléhat na teoretické výpočty či praktická měření provedená v minulosti či čerpat z jiných zdrojů. Do budoucna by mohlo být přínosné dlouhodobé praktické měření panelu umístěného na vozidle, případně pomocí pyranometru umístěného na vozidle. V této práci jsme se také soustředili především na základní stránku věci z pohledu energetických zisků a toků a neřešili příliš účinnosti a vlastnosti jednotlivých komponent za daných podmínek.

Pokud si zkapitulujeme cíle práce stanovených v zadání a úvodu této práce, tak byly do větší míry naplněny. Byl proveden rozbor spotřeb elektromobilu a seznámili jsme s možnostmi umístění fotovoltaických panelů na vozidle. Pro modelaci zisků z fotovoltaických panelů byl vytvořen simulační skript v Matlabu, který je relativně univerzálně použitelný, dokáže simulovat získanou energii v průběhu dne i roku pro libovolné místo na zemi a pro jakoukoliv orientaci panelů, také umožňuje simulaci vlivu pevné překážky v dopadajícím záření. Byla provedena analýza trakčních spotřeb elektrického vozidla za různých podmínek a byla navržena strategie dobíjení pro dané zisky z fotovoltaických panelů, která potvrzuje, že u elektromobilu s běžným nájezdem lze tuto energii relativně dobře v čase využít a spotřebovat. Jedná se však o optimistický model. V reálném provozu by také mohl být zisk minimální, například pokud by vozidlo většinu času parkovalo u vysokých budov nebo v podzemních garážích. Měl by tak být vždy zvážen konkrétní případ, zda takové řešení má smysl v daných podmínkách.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HAYES, John G. a G. Abas GOODARZI. *Electric Powertrain: Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles* [online]. B.m.: Wiley, 2018. ISBN 9781119063643. Dostupné z: doi:10.1002/9781119063681
- [2] PORSCHE AG. *The battery: Sophisticated thermal management, 800-volt system voltage* [online]. [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: <https://newsroom.porsche.com/en/products/taycan/battery-18557.html>
- [3] INNOLECTRIC AG. *Datasheet: On-Board Charger OBC42 & OBC82* [online]. Dostupné z: <https://innoelectric.ag/on-board-charger-2-2/?lang=en>
- [4] ON SEMICONDUCTOR. Datasheet DN05107 - 3.3kW On Board EV Charger. 2018.
- [5] GONG, Xun a Jayanth RANGARAJU. Taking charge of electric vehicles – both in the vehicle and on the grid. *Texas Instruments* [online]. 2020, 1–13. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/pdf/szzy007>
- [6] FICBAUER, Michal. *Návrh nabíjecí stanice pro elektromobilitu*. B.m., 2020. Univerzita Pardubice.
- [7] VOLKSWAGEN AG. *Technical data VW e-up!* [online]. 2019 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/the-e-up-taken-to-a-new-level-5583/technical-data-5590>
- [8] PORSCHE AG. *Porsche Taycan Turbo - Technical Specs* [online]. 2020 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.porsche.com/international/models/taycan/taycan-models/taycan-turbo/>
- [9] NISSAN MOTOR CORPORATION. Heat-Pump Cabin Heater. *CAR TECHNOLOGY* [online]. [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/heat_pump_cabin_heater.html
- [10] BOSCH AG. iBooster - Vacuum-independent, electromechanical brake booster [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/driving-safety/ibooster/>

- [11] GREGORA, Stanislav a Zdeněk MAŠEK. *Elektronické a mechatronické systémy v konstrukci silničních vozidel*. B.m.: Univerzita Pardubice, 2008. ISBN 978-80-7395-082-8.
- [12] RODGERS, Lennon, Stephen ZOEPF a Johann PRENNINGER. Analysing the Energy Consumption of the BMW ActiveE Field Trial Vehicles with Application to Distance to Empty Algorithms. *Transportation Research Procedia* [online]. 2014, **4**(815), 42–54. ISSN 23521465. Dostupné z: doi:10.1016/j.trpro.2014.11.004
- [13] EVTIMOV, Ivan, Rosen IVANOV a Milen SAPUNDJIEV. Energy consumption of auxiliary systems of electric cars. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2017, **133**, 2–6. ISSN 2261236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201713306002
- [14] HYUNDAI. *Ioniq 5 Specifications* [online]. Dostupné z: <https://www.hyundai.com/uk/ioniq-5/ioniq5/specifications.html>
- [15] LIGHTYEAR. *Lightyear One - Solar electric vehicle technology* [online]. [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <https://lightyear.one/technology>
- [16] SONO MOTORS GMBH. *Sion electric car - datasheet* [online]. Dostupné z: <https://sonomotors.com/en/sion/>
- [17] NREL. *NREL.pdf* [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20200104.pdf>
- [18] RENOGY. RNG-175DB-H Datasheet - 175W Flexible Monocrystalline Solar Panel. nedatováno.
- [19] SUNPOWER CORPORATION. Sunpower Flexible solar panels - SPR-E-Flex-50 Datasheet [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://sunpower.maxeon.com/int/solar-panel-products/sunpower-flexible-solar-panels>
- [20] EUROPEAN COMMISSION. *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM* [online]. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
- [21] SARBU, Ioan a Calin SEBARCHIEVICI. *Solar Heating and Cooling*. 2016. ISBN 978-0-12-811662-3.

- [22] PETERSON, William A. a Inge DIRMHIRN. The Ratio of Diffuse to Direct Solar Irradiance. *Journal of Applied Meteorology* [online]. 1981, **20**(7), 826–828. ISSN 0021-8952.
- [23] *Global Solar Atlas* [online]. [cit. 2021-06-22]. Dostupné z: <https://globalsolaratlas.info/map>
- [24] PVEDUCATION. *Elevation Angle* [online]. [cit. 2021-07-09]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/elevation-angle>
- [25] DUFFIE, John A., William A. BECKMAN a Jon MCGOWAN. *Solar Engineering of Thermal Processes* [online]. 1985. ISBN 9780470873663. Dostupné z: doi:10.1119/1.14178
- [26] KASTEN, Fritz a Andrew T. YOUNG. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics* [online]. 1989, **28**(22), 4735. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/ao.28.004735
- [27] PVEDUCATION.ORG. *Air Mass* [online]. [cit. 2021-07-02]. Dostupné z: https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/air-mass#footnote1_0mp3ewc
- [28] NASA. Climate and Earth's Energy Budget. *The Earth Observatory* [online]. [cit. 2021-07-02]. Dostupné z: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance/page4.php>
- [29] HAROLD ZIRIN. Solar constant. *Encyclopedia Britannica* [online]. [cit. 2021-07-03]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/solar-constant>
- [30] *Portál ČHMÚ : Historická data : Počasí : Denní data : Data ze stanic sítě RBCN* [online]. [cit. 2021-06-15]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/denni-data/data-ze-stanic-site-RBCN#>
- [31] INFORMATION, World Weather & Climate. *Weather and Climate information for every country in the world* [online]. [cit. 2021-06-15]. Dostupné z: <https://weather-and-climate.com/>
- [32] SÝKORA, Petr. *Měření na fotovoltaickém panelu Solartec*. 2015

- [33] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe* [online]. [cit. 2021-06-25]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-3/assessment-1>
- [34] ČEZ DISTRIBUCE, a. s. *Ceníky elektřiny pro domácnosti Distribuční území ČEZ Distribuce, a. s.* [online]. 2020 [cit. 2021-07-05]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/podpora/ceniky.html?commodity=ele>
- [35] E.ON DRIVE. *Ceník dobíjení v síti dobíjecích stanic E.ON Drive* [online]. [cit. 2021-07-10]. Dostupné z: <https://www.eon-drive.cz/pro-ridice/>
- [36] PRAŽSKÁ ENERGETIKA A.S. *Pražská energetika upravuje ceny za dobíjení elektromobilů v síti PREpoint* [online]. [cit. 2021-07-10]. Dostupné z: <https://www.pre.cz/cs/profil-spolecnosti/media/tiskove-zpravy/prazska-energetika-upravuje-ceny-za-dobijeni-elektromobilu-v-siti-prepoint/>
- [37] EUROSTAT. *Electricity price statistics* [online]. 2020 [cit. 2021-06-15]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics
- [38] GLOBAL PETROL PRICES. *Electricity prices* [online]. 2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/
- [39] HYUNDAI MOTOR CZECH S.R.O. *Ceník Ioniq 5 - elektrické SUV* [online]. [cit. 2021-06-15]. Dostupné z: <https://www.hyundai.cz/modely/ioniq-5>
- [40] GREENBIZ GROUP INC. *Beam Global - solar charging station* [online]. 2021 [cit. 2021-07-03]. Dostupné z: <https://www.greenbiz.com/article/spotlight-beam-globals-profit-model-ev-charging>

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1 – porovnání vlastností vybraných elektromobilů [7][8]	13
Tabulka 1.2 – naměřené hodnoty pomocných spotřeb elektromobilu Hyundai Kona Electric	17
Tabulka 2.1 – vybrané ohebné solární panely [18, 19].....	21
Tabulka 2.2 – orientační hodnoty P_{\max} fotovoltaických panelů při daném pokrytí ploch	21
Tabulka 3.1 – hodnoty zadané do simulačního výpočtu.....	30
Tabulka 3.2 – výsledky modelu pro různé úhly natočení panelů	33
Tabulka 3.3 – získaná energie při vyšších teplotách a změna oproti původnímu modelu	35
Tabulka 3.4 – získaná energie při uvažované překážce a změna oproti původní hodnotě 181 kWh ročně.....	36
Tabulka 3.5 – vybraná klimatická data pro daná místa	37
Tabulka 3.6 – energie z panelů vypočtená pro různá místa na zemi	38
Tabulka 4.1 – vybrané parametry vozu na kterém probíhalo měření	42
Tabulka 4.2 – vybrané naměřené parametry jízdy po městě	43
Tabulka 4.3 – hodnoty vybrané jízdy po okresních silnicích	44
Tabulka 4.4 – hodnoty vybrané jízdy po dálnici	45
Tabulka 4.5 – porovnání průměrné spotřeby s klimatizací a bez	46
Tabulka 4.6 – přehled zvolených jízd modelového případu využívání elektromobilu.....	48
Tabulka 4.7 – uvažované odběry při jízdě na daném typu komunikace.....	49
Tabulka 5.1 – odhadované získané roční množství energie pro varianty panelů a počet kilometrů, které lze díky této energii najet při uvažované spotřebě 15 kWh na 100 km	57
Tabulka 5.2 – roční finanční úspora z využití fotovoltaické energie na vozidle při využívání dané distribuční sazby [34–36]	59

SEZNAM GRAFŮ

Graf 3.1 – průběh elevace slunce v průběhu roku, pro 50° s.š., tato rovnoběžka prochází i Českou republikou, na úrovni, kde se nachází například Praha nebo Pardubice	27
Graf 3.2 – průběh funkce AM v závislosti na elevaci slunce	28
Graf 3.3 – závislost koeficientu útlumu na elevaci slunce	29
Graf 3.4 – produkovaná energie v jednotlivých dnech pro horizontální panel.....	34
Graf 3.5 – získaná energie v průběhu roku pro různá místa na zemi	39
Graf 3.6 – maximální výkon horizontálního panelu v průběhu dne letního slunovratu	40
Graf 3.7 – naměřený průběh výkonu solárního panelu v průběhu zimního dne.....	41
Graf 4.1 – detail průběhu jízdy na okresní silnici.....	45
Graf 4.2 – průběh toku výkonů během městské jízdy ve 12 V síti elektromobilu.	47
Graf 4.3 – detailní průběh příkonu 12 V spotřeb	48
Graf 4.4 – stav nabití 12 V akumulátoru, letní období, panel 1 m ²	51
Graf 4.5 – stav nabití 12 V akumulátoru, zimní období, panel 1 m ²	52
Graf 4.6 – stav nabití trakčního akumulátoru, letní období, panel 1 m ²	53
Graf 4.7 – stav nabití trakčního akumulátoru, zimní období, panel 1 m ²	54
Graf 4.8 – stav nabití trakčního akumulátoru, letní období, panel 5 m ²	55
Graf 5.1 – porovnání cen energie ve vybraných zemích Evropy a světa [37, 38].....	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 – princip tepelného čerpadla, upraveno a převzato [9]	14
Obrázek 2.1 – současné koncepty umístění solárních panelů na vozidlo – zleva Lightyear One, Hyundai Ioniq 5, Sono motors Sion, Toyota Prius	19
Obrázek 2.2 – blokové schéma možnosti začlenění solárního panelu do elektrické sítě vozidla	23
Obrázek 3.1 – situační nákres natočeného panelu a vybraných úhlů, převzato a upraveno z [21]	26
Obrázek 3.2 – logický vývojový diagram pro výpočet výkonu fotovoltaického panelu	31
Obrázek 3.3 – situační nákres schématu uvažované překážky, všechny délky v [m]	36
Obrázek 4.1 – vozidlo Hyundai Kona Electric, na kterém probíhalo měření.....	42
Obrázek 4.2 – vývojový diagram rozhodovacího algoritmu řízení nabití 12 V akumulátoru ..	50
Obrázek 4.3 – motorový prostor vozidla Hyundai Kona Electric	52
Obrázek 5.1 – solární nabíjecí stanice pro elektromobily [40].....	62

PŘÍLOHY

Fyzickou přílohou této práce je nosič CD-ROM, který obsahuje simulační skripty v programu Matlab, které byly pro tuto práci vytvořeny a použity a dále další soubory s kterými se v simulacích pracuje:

- Příloha 1: panel.m, pro simulaci výkonu solárního panelu
 soubory typu .xlsx s daty o klimatických podmínkách

- Příloha 2: pomocne_spotreby.m, pro výpočet příkonů 12 V spotřebičů
 soubory typu .csv s naměřenými daty z jízd

- Příloha 3: spotreby_z_jezd.m, pro analýzu dat naměřených na vozidle
 soubory typu .csv s naměřenými daty z jízd

- Příloha 4: strategie.m, pro strategii nabíjení 12 V akumulátoru i trakčního akumulátoru
 soubory typu .xlsx se stanovenými modely trakčních a pomocných spotřeb
 soubor typu .mat s výkony panelu v průběhu celého roku ze skriptu panel.m