

**Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera**

**Využití fotovoltaických článků k přímému napájení železničních
vozidel**

Bc. Jaroslav Tichý

**Diplomová práce
2011**

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jaroslav TICHÝ**
Osobní číslo: **D09774**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura-Elektrotechnická zařízení**
Název tématu: **Využití fotovoltaických článků k přímému napájení železničních vozidel**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Parametry soudobých a perspektivních fotovoltaických článků a základní vlastnosti na zem dopadající sluneční energie
2. Energetická náročnost vlakové dopravy a její minimalizace, k reálnosti použít solární zdroje elektrické energie
3. Princip a aplikační pole vozidel s přímým solárním zdrojem elektrické energie
4. Distribuovaný trakční pohon
5. Uspořádání trakčního pohonu železničního vozidla s přímým solárním zdrojem elektrické energie
6. Projekční studie železničního vozidla s přímým solárním zdrojem elektrické energie

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

CIHELKA, Jaromír. Solární tepelná technika. Malina Tomáš, 1994. 203 s. ISBN 80-900759-5-9.

KEMEL, Miroslav. Klimatologie, meteorologie, hydrologie. Vydavatelství ČVUT, 2000. 289 s.

POHL, Jiří. Trakční mechanika 1. - 4. Prezentace. Siemens.

POHL, Jiří. Využití solární energie pro pohon kolejových vozidel. 2010. 20 s. Prezentace. Siemens.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **16. února 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **31. května 2011**

prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.

doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 11. března 2011

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Tuto práci 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., autorský zákon, 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.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 20. 05. 2011

Bc. Jaroslav Tichý

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Jiřímu Pohlovi z firmy Siemens s.r.o. za odborné vedení a cenné připomínky. Velmi si vážím jeho vstřícného přístupu a množství času, které mi ochotně věnoval.

Dále děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Radovanu Dolečkovi Ph.D.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za podporu během studia.

Anotace

Práce se zabývá problematikou návrhu železničního vozidla přímo napájeného fotovoltaickými panely. V práci je obsažen popis základních vlastností slunečního záření a fotovoltaických panelů, včetně přehledu vybraných technologií výroby fotovoltaických panelů.

Hlavním výstupem práce je projekční studie vozidla s přímým solárním zdrojem elektrické energie. Vozidlo je poháněno synchronním motorem s permanentními magnety.

Klíčová slova

Fotovoltaický panel, přímé napájení, synchronní motor s permanentními magnety, jízdní odpory, sluneční záření

Annotation

This thesis deals with problems of railway vehicle with directly powered by photovoltaic panels. The work included a description of the basic properties of solar radiation and solar modules including an overview of selected technologies for the production of photovoltaic panels.

The main output of this work is a design study of a vehicle with a direct solar power supply of electrical power. The vehicle is driven by synchronous motor with permanent magnets.

Keywords

Photovoltaic panel, direct power supply, synchronous motor with permanent magnets, driving resistance, solar radiation

Obsah

Úvod.....	10
1 Základní vlastnosti na zem dopadající sluneční energie a parametry soudobých a perspektivních fotovoltaických článků	11
1.1 Charakteristika slunečního záření	11
1.2 Popis průchodu záření atmosférou	13
1.2.1 Rozptyl (difúze) slunečních paprsků	13
1.2.2 Pohlcování slunečního záření	14
1.3 Metody a postup výpočtu intenzity dopadajícího slunečního záření	15
1.3.1 Parametry definující polohu Slunce vzhledem k zemskému obzoru	16
1.3.2 Přímé sluneční záření	19
1.3.3 Difúzní sluneční záření	20
1.3.4 Energie záření dopadajícího na osluněnou plochu	21
1.4 Vypočtené hodnoty energie dopadajícího záření pro vybrané lokality.....	23
1.4.1 Volba vhodné lokality pro provoz solárního vlaku.....	23
1.4.2 Energie slunečního záření pro jednotlivé lokality.....	24
1.5 Parametry soudobých a perspektivních fotovoltaických článků	27
1.5.1 Princip a vlastnosti fotovoltaického článku.....	27
1.5.2 Základní parametry fotovoltaických článků	28
1.5.3 Vliv teploty na parametry fotovoltaických článků	32
1.5.4 Vliv teploty na výkon vozidla přímo napájeného fotovoltaickými panely	35
1.5.5 Fotovoltaické články z krystalického křemíku	36
1.5.6 Spojování křemíkových fotovoltaických článků do panelu	36
1.5.7 Tenkovrstvé solární články	39
1.5.8 Perspektivní technologie výroby solárních článků.....	40
1.5.9 Srovnání vybraných typů fotovoltaických článků	44
2 Energetická náročnost vlakové dopravy a její minimalizace	46
2.1 Analýza jízdních odporů a početní určení trakčních vlastností železničních vozidel	47
2.2 Charakteristika jízdních odporů.....	47
2.2.1 Vozidlové odpory	47
2.2.2 Traťové odpory	50
2.2.3 Tažná síla na obvodu kol	52
2.3 Trakční výpočty.....	52

2.3.1	Elektrický výkon fotovoltaického zdroje	52
2.3.2	Trakční výkon a jízdní odpor vozidla	55
2.3.3	Diagram $s_0 - v$	60
3	Princip a aplikační pole vozidel s přímým solárním zdrojem elektrické energie	61
3.1	Výhody přímého solárního napájení železničního vozidla:	61
3.2	Nevýhody přímého solárního napájení železničního vozidla:	61
3.3	Perspektiva	62
3.4	Oblast aplikace	62
3.5	Možné způsoby zvýšení výkonu fotovoltaického zdroje	62
3.5.1	Standardní vůz	62
3.5.2	Standardní vůz s rozšířenou plochou střechy	63
3.5.3	Vůz o délce skříně 23 m s rozšířenou plochou střechy	64
3.6	Výpočet dosažitelné rychlosti vlaku	65
3.7	Výpočet vykonané dráhy vlaku	68
3.8	Teoretická bezetrátová přeměna fotovoltaických panelů	69
3.8.1	Výpočet dosažitelné rychlosti	69
3.8.2	Výpočet vykonané dráhy	70
4	Distribuovaný trakční pohon	72
4.1	Lokomotiva s fotovoltaickým zdrojem	72
4.1.1	Parametry lokomotivy	72
4.2	Lokomotiva a netrakční vozy s fotovoltaickým zdrojem	73
4.2.1	Parametry lokomotivy	73
4.2.2	Parametry nákladního vozu	73
4.3	Samostatně jedoucí vozy s fotovoltaickým zdrojem	74
4.3.1	Parametry nákladního vozu	74
4.4	Ve skupině jedoucí vozy s fotovoltaickým zdrojem	75
5	Uspořádání trakčního pohonu železničního vozidla s přímým solárním zdrojem energie	77
5.1	Stejnoseměrné napětí a proud fotovoltaického zdroje – U_d, I_d	78
5.2	Sdružené třífázové střídavé napětí a proud na výstupu střídače – U_a, I_a	79
5.3	Moment síly a otáčky trakčního motoru – M, n	80
5.4	Tažná síla na obvodu kol a rychlost vozidla – F_o, v	81
6	Projekční studie železničního vozidla s přímým solárním zdrojem elektrické energie	82
6.1	Návrh fotovoltaického zdroje na střeše vozidla	82

6.1.1	Rozměry solárního vozidla.....	82
6.1.2	Rozměry fotovoltaického panelu Sunpower E19 / 320.....	82
6.1.3	Rozměry fotovoltaického zdroje na střeše vozidla	82
6.1.4	Sérioparalelní zapojení fotovoltaických panelů.....	82
6.1.5	Překlenovací a blokovací diody, vliv stínění	83
6.1.6	Parametry sérioparalelního zapojení fotovoltaických panelů na střeše vozidla	84
6.2	Napěťový střídač.....	84
6.2.1	Parametry tranzistoru IRG4PC40WPbF.....	84
6.2.2	Dynamické ztráty IGBT tranzistoru	85
6.2.3	Propustný úbytek IGBT tranzistoru	85
6.2.4	Výstupní napětí střídače.....	85
6.3	Návrh pohonu železničního vozu	86
6.3.1	Volba převodu	86
6.3.2	Výpočet tažné síly na obvodu kol	87
6.3.3	Volba počtu poháněných dvojkolí	88
6.3.4	Potřebný moment síly a výkon motoru.....	89
6.4	Charakteristiky fotovoltaickými panely přímo napájeného vozidla	89
6.4.1	Trakční charakteristika	90
6.4.2	s_0 - v diagram	90
6.4.3	Dosažitelná rychlost vlaku během dne	91
6.4.4	Vykonaná dráha během dne	92
6.5	Typový výkres.....	92
6.6	Tabulky parametrů	93
	Závěr	95
	Seznam použité literatury	97
	Seznam tabulek	99
	Seznam obrázků.....	100
	Seznam grafů.....	102

Úvod

V současné době, se vzrůstající spotřebou ropy a zároveň s výrazným poklesem jejich zásob, nabývají na důležitosti obnovitelné zdroje energie. Výjimečné postavení mezi nimi má solární energie transformovaná fotovoltaickými články na energii elektrickou. Je dostupná prakticky kdekoli, její výroba není vázána na přítomnost větru, vodního toku či mořského přílivu.

Výroba solárních článků je v současnosti jedním z nejrychleji se rozvíjejících odvětví průmyslu. Se zdokonalující se technologií a objemem výroby solárních článků dochází ke zvyšování jejich účinnosti a zároveň i dostupnosti. Díky tomuto je možné jejich masové uplatnění v oblastech s nižší energií dopadajícího záření ročně a zároveň využití v aplikacích, které byly před lety nemyslitelné. Jednou z takových se zabývá tato diplomová práce.

Přestože je železniční doprava oproti silniční, letecké a lodní dopravě výrazně méně závislá na fosilních palivech, nabízí se myšlenka využít pro pohon železničního vozidla fotovoltaické články. A to buď v kombinaci se zásobníkem elektrické energie v podobě akumulátoru či superkapacitoru (jedná se o tzv. nepřímé napájení), či bez využití zásobníků energie, kdy je hnací elektromotor napájen přímo ze solárních článků na střeše vozidla (tzv. přímé napájení). Přímým napájením z fotovoltaických panelů se zabývá tato diplomová práce.

Z hlediska maximalizace elektrické energie transformované fotovoltaickými panely je při návrhu vozidla žádoucí plně zužít plochu střechy železničního vozu a zároveň použít vysoce účinné solární panely, střídače a trakční pohony. Při výběru lokality určené k provozu přímo napájeného vozidla je rozhodující velikosti energie dopadajícího slunečního záření. V úvahu připadá využití vozidla v tropickém pásu vyznačujícím se vysokou energií dopadajícího solárního záření (s téměř kolmým úhlem dopadu záření). V této oblasti má energie záření v průběhu roku podstatně nižší výkyvy v porovnání s např. mírným či subtropickým pásem. Pro dobrou dynamiku pohybu vozidla je zároveň nezbytná minimalizace traťových odporů. Trať určená k provozu vozidla by se měla vyznačovat nízkých či nulovým převýšením a minimem traťových oblouků. Z důvodu nižšího jízdního odporu je výhodný provoz soupravy složené z více vozidel.

Přeprava osob vozidlem přímo napájeným fotovoltaickými panely se nejeví s ohledem na nízkou dynamiku vozidla a značnou závislost na aktuální oblačnosti jako perspektivní. Proto je vozidlo určeno zejména pro nákladní dopravu.

Konkrétní cíle diplomové práce jsou:

- analýza slunečního záření a vytvoření modelu pro výpočet intenzity dopadajícího záření na oslněnou plochu pro libovolnou lokalitu,
- rozbor parametrů fotovoltaických článků a přehled současných i perspektivních technologií výroby článků,
- analýza jízdních odporů a jejich výpočet,
- početní potvrzení hypotézy o využití fotovoltaických článků k přímému napájení železničního vozidla,
- návrh možných způsobů provedení vozidel s přímým solárním zdrojem elektrické energie,
- návrh koncepce přímo napájeného železničního vozidla včetně definování konkrétních parametrů vozidla a komponentů přenosu výkonu.

1 Základní vlastnosti na zem dopadající sluneční energie a parametry soudobých a perspektivních fotovoltaických článků

Pro provoz solárního vozidla je z hlediska velikosti dodávaného elektrického výkonu fotovoltaických panelů žádoucí co možná nejvyšší hodnota energie dopadajícího slunečního záření. Na velikosti elektrického výkonu panelů závisí hodnota trakčního výkonu a tedy i dynamické vlastnosti vozidla. Pro co možná největší dosaženou vzdálenost vozidla za den je třeba hledat takovou lokalitu, pro kterou je charakteristické:

- vysoké množství dopadajícího záření denně (integrace průběhu intenzity dopadajícího záření během dne),
- nízká oblačnost a vyrovnaná doba dopadu slunečních paprsků za den,
- malé výkyvy množství denně dopadajícího záření během roku (je kladen důraz na přibližně stejnou průměrnou rychlost vozidla a dobu jeho jízdy během roku).

Pro kvantitativní určení dopadajícího záření je třeba blíže se seznámit s problematikou slunečního záření dopadajícího zemský povrch a jeho přeměnou na elektrickou energii. Zmíněnými tématy se zabývá tato kapitola.

1.1 Charakteristika slunečního záření

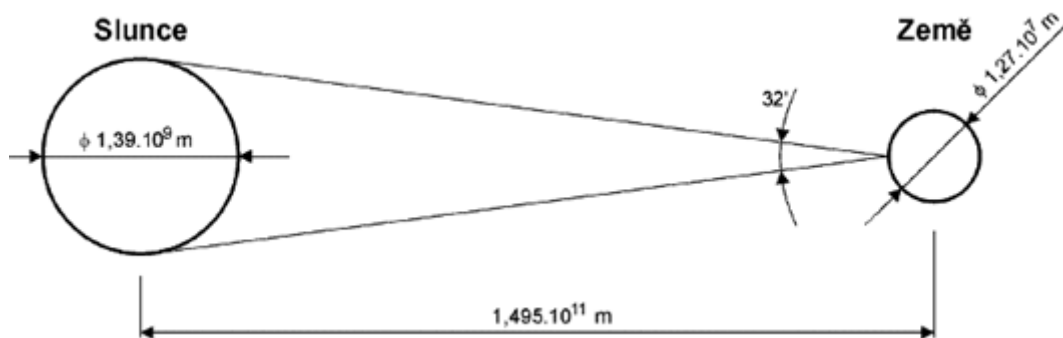
Slunce je hvězda typu žlutý trpaslík o průměru $1,39 \cdot 10^9$ km, jeho povrch zaujímá plochu $6,087 \cdot 10^{12}$ km² a má teplotu přibližně 6 000 K. Slunce jako zdroj světla a tepla tvoří prakticky jediný zdroj energie jak pro planetární geosystém, tak pro úplný (planetární) klimatický systém. Zdrojem energie slunečního záření je vodík, který se proměňuje na hélium při termonukleárních reakcích na Slunci.

Na energii ze Slunce závisí všechny projevy života, ostatní zdroje energie jsou v porovnání s ní nepatrné. Slunce vyzařuje do okolního prostoru značné množství energie o širokém vlnovém spektru od 10^{-10} do 10^3 m, avšak pro přenos energie je nejvýznamnější tzv. krátkovlnné záření o vlnových délkách $0,1 \cdot 10^{-6}$ až $4 \cdot 10^{-6}$ m (0,1 až 4 μm), tvořící až 99 % celkové intenzity slunečního záření. Země zachytí stranou přivrácenou ke Slunci jen zlomkovou část vyzářené sluneční energie.

Sluneční záření se dělí elektromagnetické a korpuskulární (částicové) záření. V případě korpuskulárního záření se jedná o proud elektricky nabitých částic hmoty (elektrony, protony), který má rychlost nižší než rychlost světla a podstatně nižší intenzitu než záření elektromagnetické. Korpuskulární záření je zachycováno ionosférou a odváděno směrem k magnetickým pólům Země, což má za následek vznik polární záře a magnetických bouří.

Elektromagnetické záření se šíří od Slunce rychlostí blízkou $3 \cdot 10^8$ m·s⁻¹. Míra účinků na jednotkovou plochu zemského povrchu dopadajícího elektromagnetického záření je označována jako intenzita elektromagnetického záření (E, někdy též I). Vyjadřuje se v jednotkách W·m⁻², úhrnná intenzita delšího časového intervalu se udává ve Wh, resp. kWh, přičemž 1 Wh je $3,6 \cdot 10^3$ J. Souhrnný výkon, který vyzařuje Slunce do mezihvězdného prostoru (tzv. zářivý výkon) je $3,83 \cdot 10^{26}$ W. Na Zem dopadne ročně $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh sluneční energie. Při porovnání se světovou spotřebou energie za rok 2009 ($1,304 \cdot 10^{14}$ kWh) převyšuje velikost sluneční energie dopadající na Zem v průběhu roku přibližně 11 500 násobně spotřebu lidstva. Většina rozvojových zemí leží v tropickém pásu, kde je značná intenzita slunečních paprsků a logicky chtějí zmíněné oblasti této možnosti využít nejefektivnějším způsobem. Mezi 35° severní šířky a 35° jižní šířky žije na 80% světové populace. V této oblasti je 3 000 – 4 000 slunných hodin ročně, což je ekvivalent ke zhruba 2 000 kWh/m²

sluneční energie za rok a je zde tedy velký potenciál pro využití fotovoltaických článků. Geometrické vztahy mezi Sluncem a Zemí znázorňuje obr. 1.1.

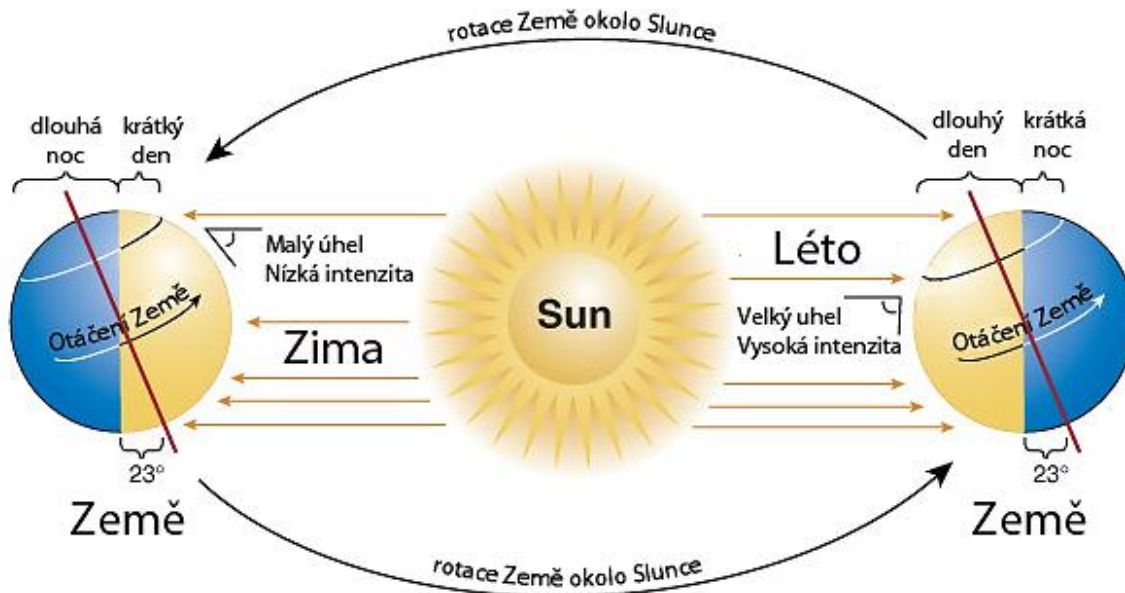


Obr. 1.1 Geometrie Slunce a Země [1]

Celková intenzita úplného spektra elektromagnetického záření Slunce dopadající na horní hranici atmosféry na jednotkovou plochu kolmou ke slunečním paprskům při střední vzdálenosti Země od Slunce se nazývá solární konstanta E_s .

Hodnota E_s je $1\,366,1 \pm 7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ [4].

Země se pohybuje okolo Slunce po eliptické dráze a se vzdáleností Země se mění i intenzita elektromagnetického záření dopadající na horní hranici atmosféry. Tato intenzita elektromagnetického záření se nazývá aktuální solární konstanta E_r . Pohyb Země okolo Slunce během roku je znázorněn na obr. 1.2.



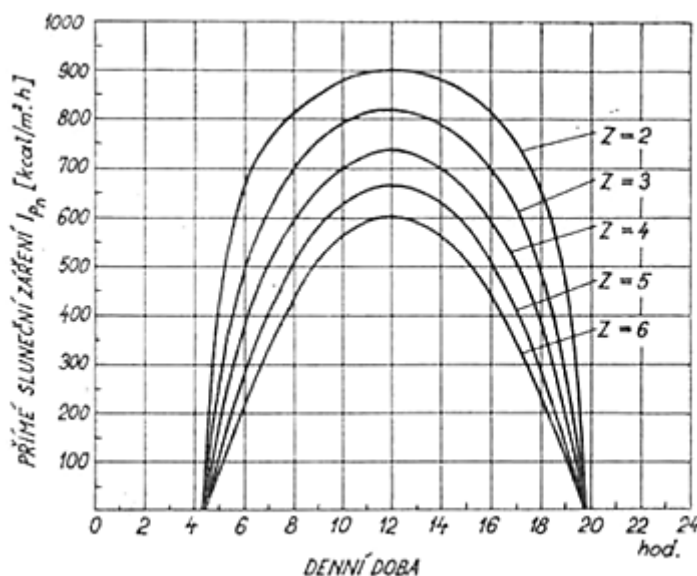
Obr. 1.2 Znázornění rotace Země okolo Slunce pro severní polokouli

Vzdálenost mezi Zemí a Sluncem se pohybuje v průběhu roku v rozmezí od $1,47 \cdot 10^8 \text{ km}$, kdy je Země Slunci nejbliže (přisluní, perihélium), do $1,52 \cdot 10^8 \text{ km}$, kdy je Země od Slunce nejdále (odsluní, afélium), čímž se E_r mění během roku o $\pm 3,5\%$. Díky tomuto je zima na severní polokouli mírnější a léto chladnější, než na jižní polokouli.

1.2 Popis průchodu záření atmosférou

Průchodem slunečního záření atmosférou dochází k jeho změnám jak z hlediska poklesu intenzity, tak změnou fyzikálních vlastností. Pokles intenzity záření způsobuje rozptyl paprsků odražených od částic prachu (zemský prach, kosmický prach, vulkanický prach) a molekul vzduchu a zároveň dochází k pohlcování slunečních paprsků plyny obsaženými v atmosféře - oxidem uhličitým, ozónem a vodními parami. Stupeň poklesu intenzity záření udává tzv. součinitel slunečního znečištění atmosféry (Z). Jedná se o součinitel, udávající kolikrát by musela být čistá atmosféra hmotnější, aby měla stejnou propustnost pro sluneční radiaci, jako atmosféra znečištěná [8]. Jeho hodnota je primárně závislá na tlaku vzduchu a na obsahu příměsí v atmosféře. Na velikosti součinitele se tak projevují změny teploty v průběhu dne i roku, neboť s klesající teplotou klesá i množství vodní páry ve vzduchu.

Nejnižší hodnota znečištění byla zjištěna na vrcholech nejvyšších hor světa, neboť velikost Z je nepřímo úměrná nadmořské výšce. Naopak nejvyšší hodnoty součinitele slunečního znečištění atmosféry byly naměřeny ve městech se značně rozvinutým průmyslem ($Z = 5 - 6$, špičkově až 8). Města obecně mají díky průmyslovým a dopravním exhalacím součinitel znečištění vyšší (průměrná velikost $Z = 4$) nežli venkov (průměrná velikost $Z = 3$). Pro místa s nadmořskou výškou nad 1 000 m n. m. se udává $Z = 2,5$, pro místa s nadmořskou výškou nad 2 000 m n. m. je $Z = 2$. Intenzita přímého slunečního záření v závislosti na hodnotě součinitele Z (platí pro 15. července a 50° s.š.) je na obr. 1.3.



Obr. 1.3 Denní průběh intenzity záření při různé velikosti součinitele znečištění Z (pro 15. července) [9]

Sluneční paprsky procházející atmosférou jsou měněny jak z hlediska kvalitativního, tak kvantitativního. Velikost změn je závislá na množství příměsí v atmosféře a na délce dráhy, kterou paprsky v atmosféře opisují a na hustotě vzduchu.

1.2.1 Rozptyl (difúze) slunečních paprsků

Kromě přímého slunečního záření existuje i záření rozptýlené. To vzniká v situaci, kdy se rovnoběžné sluneční paprsky dostanou do opticky nestejnorodého prostředí. Rozptýlené záření se od přímého záření liší tím, že se původně přímé paprsky po kontaktu s rozptylující částicí šíří prostorem všemi směry tak, jako by sama částice byla zdrojem záření. Rozptyl je závislý nejenom na velikosti a charakteru částic, ale i na vlnové délce záření. Rozptyl se dělí na dva typy, molekulární a částicový.

Rozptyl molekulární (Rayleighův)

Vyskytuje se po dopadu slunečního záření na molekuly a atomy plynů obsažených v ovzduší, přičemž nepostihuje všechny vlnové délky slunečního záření stejně, ale uplatňuje se převážně u krátkovlnného záření.

Tento fakt vysvětluje příčinu modrého zabarvení oblohy, neboť modrofialová část spektra je rozptylována více než složky s větší vlnovou délkou. Maximální intenzitu při dopadu na povrch Země má v důsledku ztráty modré složky zelenožluté spektrum. V době, kdy sluneční parsky opisují nejdelší dráhu při průchodu atmosférou, tedy při východu a západu Slunce, se obloha a Slunce jeví pozorovateli oranžově až červeně zbarvené. Tento jev je zapříčiněn rozptylem složky viditelného světla s nejdelší vlnovou délkou – červené (650 – 800 nm).

Rozptyl částicový (aerosolový)

Jedná se o nejvýznamnější změnu přímého slunečního záření v atmosféře. Aerosolový rozptyl závisí zejména na rozměru a velikosti částic v atmosféře. Třebaže nepřímo úměrně závisí také na vlnové délce záření, není zde velikost λ klíčová jako u rozptylu molekulárního. Rozptyl klesá se zvyšováním velikosti částic ve vzduchu (ϵ se blíží nule). Pokud jsou rozměry rozptýlených částic větší než 1,2 μm , pak je $\epsilon = 0$ a rozptyl již není nijak závislý na vlnové délce a stává se stejně intenzivní ve všech částech světla. Z toho důvodu má obloha nad znečištěnými městy nebo za přítomnosti vzduchu nasyceným vodními výparů barvu bílou, naproti tomu v oblastech s čistým ovzduším má barvu tmavě modrou (vlivem nízkého obsahu částic v ovzduší se zmenšuje i rozptyl). Obloha na horní hranici atmosféry má barvu černou, neboť se intenzita rozptylu (Rayleighova i částicového) snižuje s poklesem hustoty vzduchu a obsahem příměsí až na nulovou hodnotu.

1.2.2 Pohlcování slunečního záření

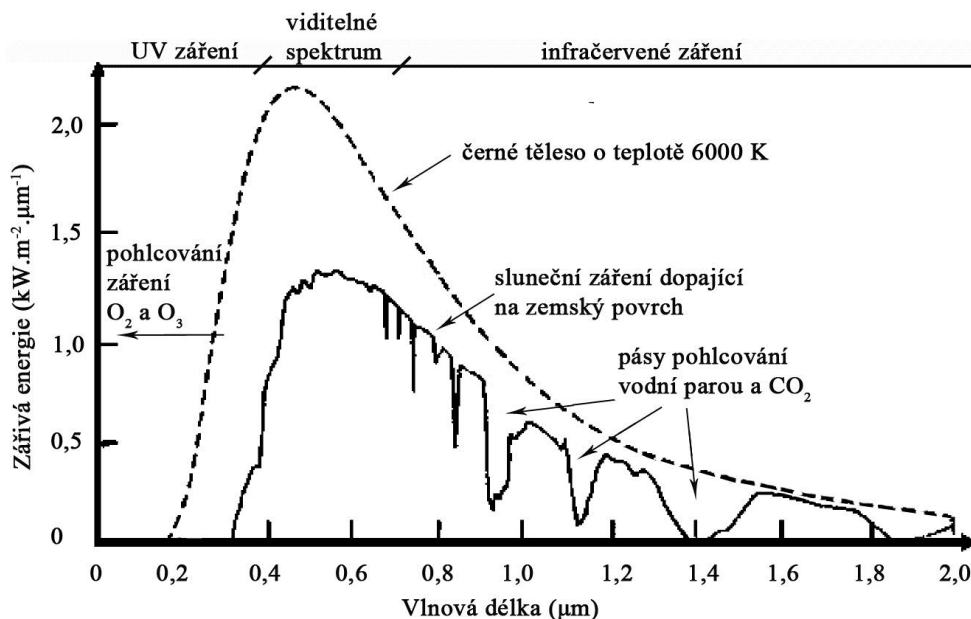
Sluneční spektrum odpovídá dokonalému černému tělesu s teplotou 6 000 K. Toto záření musí při své cestě na zemský povrch překonat několik překážek. Šíření elektromagnetických vln netlumí meziplanetární prostor ani geomagnetické pole. K jejich absorpci dochází až v ionosféře a neutrální atmosféře Země, přičemž jednotlivé plyny, které jsou stálou součástí vzduchu, pohlcují zcela nebo jen částečně záření o určitých vlnových délkách. Z těchto plynů se na pohlcování nejvíce podílí kyslík, oxid uhličitý a ozón. Značný vliv mají i vodní páry. Při pohlcování zářivé energie dochází k její přeměně na energie jiných forem, zejména však na energii tepelnou a ve vyšších vrstvách atmosféry též i na energii elektrickou.

Přestože Slunce vyzařuje velmi široké spektrum elektromagnetického záření, od gama paprsků s vlnovou délkou přibližně 10^{-12} m až po radiové vlny s délkou v řádech kilometrů, do troposféry pronikne pouze ultrafialové záření UV-B (vlnová délka 0,28 – 0,32 μm), neškodná složka UV záření způsobující např. opálení pokožky (0,32 – 0,39 μm), viditelné světlo, infračervené záření i úzké pásmo radiového spektra (o vlnových délkách přibližně 1 mm až 30 m). Úhrnné pohlcení atmosféry je asi 15% záření přicházející ze Slunce. UV záření s nejnižší vlnovou délkou (0,13 – 0,24 μm) je úplně pohlceno kyslíkem ve vysokých hladinách atmosféry.

Také ozón hraje významnou roli z hlediska pohlcování záření. Navzdory jeho nízkému procentuálnímu zastoupení v atmosféře stratosférický ozón velmi silně pohlcuje ultrafialové záření se intervalem vlnové délky od 0,20 až 0,28 μm . Díky ozónu a kyslíku tedy dochází k úplné filtraci UV záření s vlnovou délkou menší než 0,28 μm , které poškozuje živé organizmy. Vodní pára společně s oxidem uhličitým částečně pohlcují infračervené a tepelné záření, tedy záření dlouhovlnná.

Obrázek 1.4 zobrazuje křivku standardního spektra slunečního záření získanou na základě

rozsáhlým měření. Jak je možné vidět na obrázku, maximum energie slunečního záření je na vlnové délce $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$, která spadá do oblasti viditelného záření ($0,39 \leq \lambda \leq 0,76 \mu\text{m}$).



Obr. 1.4 Spektrum slunečního záření

Země vyzařuje do mezihvězdného prostoru stejné množství energie, jaké pohltí ve formě slunečního záření, jedná se zejména o vlny o délkách okolo 5, 10 a 20 μm . Z dlouhodobého hlediska je energetická bilance (rozdíl energie pohlcené a vyzářené soustavou zemský povrch - atmosféra) nezbytně rovna nule.

1.3 Metody a postup výpočtu intenzity dopadajícího slunečního záření

Existuje značný počet způsobů zjištění denní energie dopadajícího záření na osluněnou plochu pro jednotlivé měsíce v roce. Tyto metody se liší přesností, počtem potřebných parametrů k výpočtu, množstvím výstupních dat i náročností početních úkonů. Zjištění energie solárního záření (pomineme-li měření záření) je možné pomocí tří odlišných způsobů.

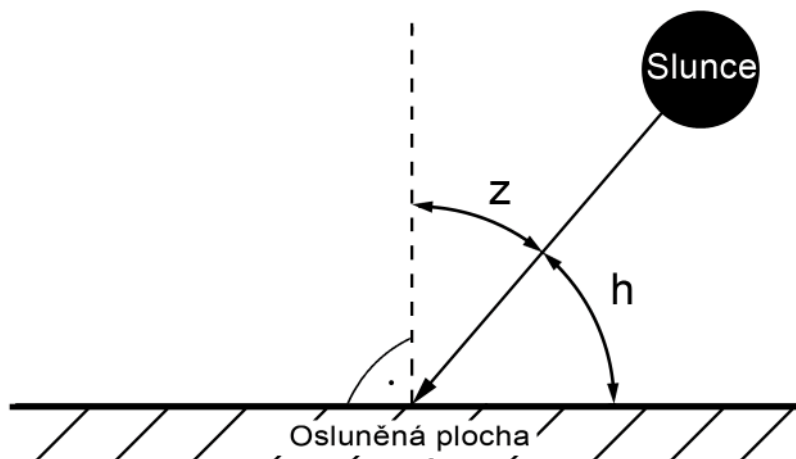
- Statistiky a vědecké práce na toto téma zveřejněných meteorologickými stanicemi, univerzitami aj. Využití těchto dat sebou nese velice přesné výsledky, založené obvykle na mnohaletém měření, se kterými je možné ihned operovat bez nutnosti dalších výpočtů. Údaje se však týkají jen konkrétních lokalit, nejčastěji větších měst nebo míst, kde se nacházejí meteorologické stanice.
- Software a on-line aplikace sloužící k určení mnoha meteorologických údajů včetně dat týkajících se energie dopadajícího slunečního záření. Příkladem softwaru je např. NASA HOMER, který je možné použít pro určení energie záření dopadajícího na osluněnou plochu kdekoli na světě. Mezi volně dostupné on-line aplikace patří NASA SSE (Surface meteorology and Solar Energy) obsahující údaje z 220 satelitů a 1195 meteorologických stanic posbírané za 22 let měření, dalšími aplikacemi jsou PVWatts, Meteonorm, WRDC aj.
- Výpočet modelu dopadajícího záření, například: Ångström-Preseottův model, Atwaterův a Ballův model, Birdův model, Hoytův model, Wattův model. V České Republice se opírá množství odborných publikací a přednášek na modelu popsaném Dr. Cihelkou v knize Solární tepelná technika, který dosahuje poměrně přesných výsledků. Další výhodou tohoto modelu je fakt, že kromě zeměpisných souřadnic

osluňené plochy, nadmořské výšky, součinitele znečištění atmosféry Z a skutečné doby slunečního svitu τ_{skut} není nutné znát pro určení dopadajícího solárního záření jakékoliv další parametry. Z těchto důvodů byl v této práci pro další výpočty slunečního záření zvolen právě model dle Dr. Cihelky. Autor využíval k výpočtům i hojně rozšířený Ångström-Prešcottův model. Pro tento model je však zapotřebí znát empiricky zjištěné konstanty vázané na konkrétní lokalitu. Tím se stává tento model značně neuniverzálním a tedy v tomto případě nevyhovujícím, neboť jedním z cílů této práce je vytvoření modelu, pomocí kterého by bylo možné po dosažení základních (výše zmíněných) údajů o dané lokalitě vypočítat energii dopadajícího záření na osluňenou horizontální plochu.

1.3.1 Parametry definující polohu Slunce vzhledem k zemskému obzoru

Směr dopadu slunečních paprsků závisí na orientaci a úhlu sklonu plochy, na kterou dopadá záření a na poloze Slunce vzhledem k této ploše. Poloha Slunce je časově proměnná, oproti obvykle časově stálé poloze osluňené plochy.

Okamžitá poloha Slunce nad obzorem je dána zenitovou vzdáleností z a azimutem Slunce a . Zenitová vzdálenost z je úhel svíraný vertikálou a dopadajícími paprsky, jak znázorňuje obr. 1.5, kde je osluňená plocha zároveň plochou vodorovnou.



Obr. 1.5 Výška slunce nad obzorem a zenitová vzdálenost

Výška slunce nad obzorem h je definována jako úhel mezi horizontální plochou a svazkem dopadajících paprsků. Závislost výšky Slunce nad obzorem h a zenitové vzdálenosti z určuje rovnice:

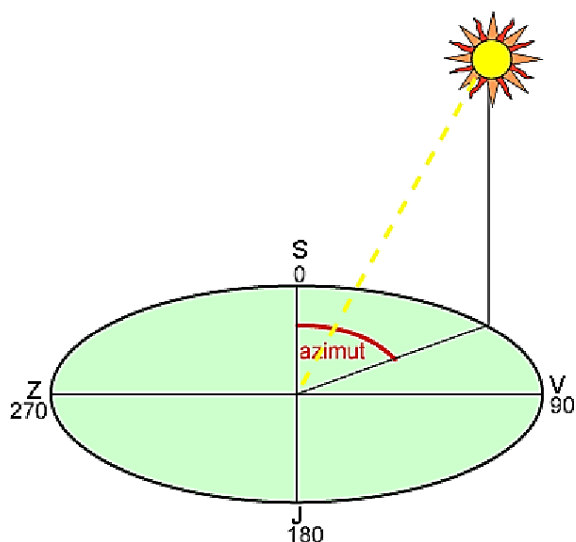
$$z = 90^\circ - h \quad [^\circ] \quad (1.1)$$

Zenitovou vzdálenost Slunce určuje také zeměpisná šířka φ , deklinace Slunce δ a hodinový úhel t . Vypočítá se jako:

$$\cos z = \cos \varphi \cos \delta \cos t + \sin \varphi \sin \delta \quad (1.2)$$

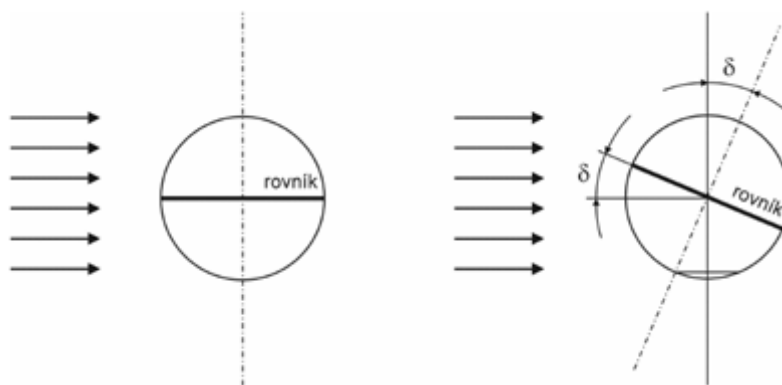
Azimut na obr. 1.6 se vyjádří vztahem:

$$\sin a = \frac{\cos \delta}{\cos h} \sin t \quad (1.3)$$



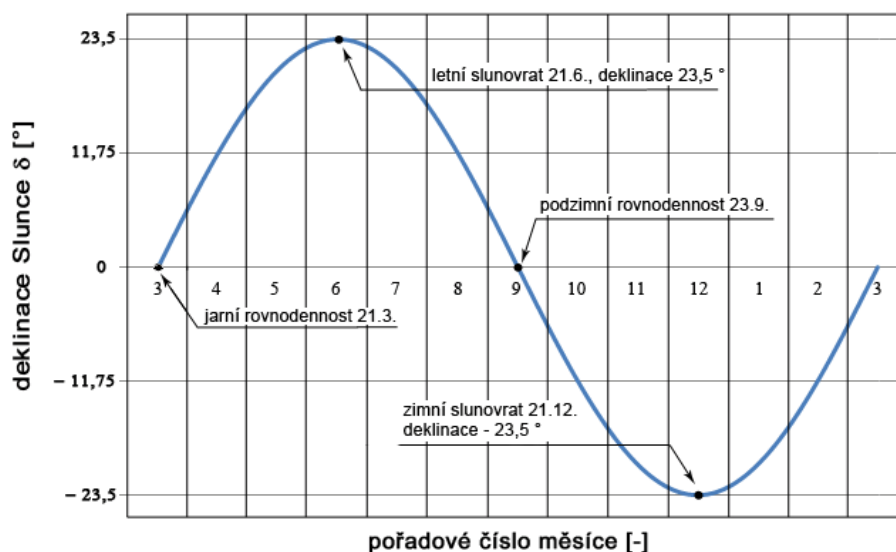
Obr. 1.6 Azimut Slunce [10]

Sluneční deklinace δ je úhel náklonu zemské osy vlivem precesního pohybu během rotace a také úhel, který svírá spojnice středů Země a Slunce s rovinou zemského rovníku [1], viz obr 1.7.



Obr. 1.7 Znáznornění sluneční deklinace [1]

Hodnota sluneční deklinace se v průběhu roku mění a je tedy každý den odlišná - její vývoj v závislosti na čase odpovídá sinusoidě, obr. 1.8.



Obr. 1.8 Roční průběh sluneční deklinace

Pro usnadnění výpočtů se volí tzv. charakteristický den v měsíci, tedy den, pro který se spočítá sluneční deklinace (a od ní se odvíjející ostatní parametry pro definici polohy Slunce i intenzita slunečního záření) a tato hodnota je považována za typickou pro celý měsíc. Tato metoda je obzvláště výhodná, pokud jsou některé klimatické parametry uváděny jen jako průměrné měsíční hodnoty, příkladem může být tzv. skutečná doba slunečního svitu.

Některé prameny udávají za prospěšné volit pro výpočet sluneční deklinace 21. den v měsíci (např. zdroj [6]), avšak přesnějších výsledků bude dosaženo výpočty se specifickým charakteristickým dnem (početně určeným pro každý měsíc zvlášť), pro něhož vypočtená sluneční intenzita je nejbližší průměru intenzit všech dní v měsíci. Tato data udává tabulka 1.1.

Tab. 1.1 Charakteristický den v měsíci

Měsíc	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
Charakteristický den	17.	15.	15.	14.	14.	11.	17.	17.	16.	16.	15.	12.

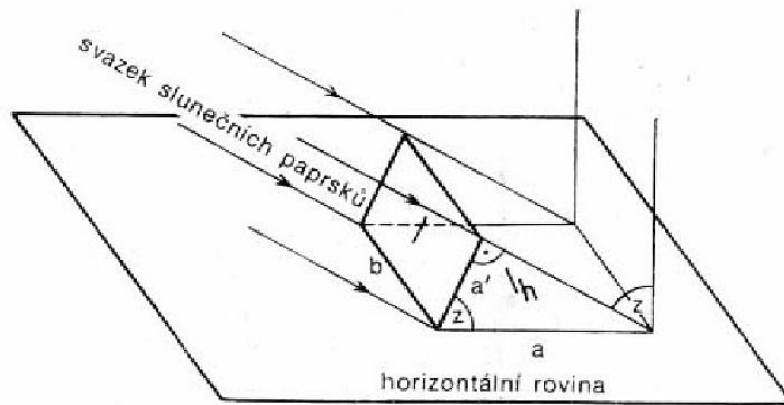
Pokud je známý azimut slunce a i výška slunce nad obzorem h , pak lze určit úhel dopadu slunečních paprsků na obecně položenou rovinu. Tento úhel γ , který svírá normála oslněné plochy se směrem dopadajícího záření (obr. 1.9), je definován jako:

$$\cos \gamma = \sin h \cos \alpha + \cos h \sin \alpha \cos (a - a_s) \quad (1.4)$$

kde:

α = úhel sklonu oslněné plochy od vodorovné roviny [°],

a_s = azimutový úhel normály oslněné plochy [°].



Obr. 1.11 Závislost insolace na zenitové vzdálenosti [2]

Intenzita přímého záření dopadajícího na zemský povrch na plochu kolmou ke směru paprsků se vyjádří:

$$E_{pn} = E_0 \cdot \exp\left(-\frac{Z}{\varepsilon}\right) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1.6)$$

kde:

E_0 = sluneční konstanta [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

Z = součinitel znečištění atmosféry [-],

ε = součinitel závislejší na nadmořské výšce konkrétního místa a na výšce Slunce nad obzorem [-].

Součinitel ε se dle Heindla a Kocha [6] vyjádří ve tvaru

$$\varepsilon = \frac{9,38076[\sin h + (0,003 + \sin^2 h)^{0,5}]}{2,0015(1 - H \cdot 10^{-4})} + 0,91018 \quad [-] \quad (1.7)$$

kde:

h = výška slunce nad obzorem [$^\circ$],

H = nadmořská výška daného místa [m].

Intenzita přímého slunečního záření na obecně položenou plochu je dána vztahem

$$E_p = E_{pn} \cos \gamma \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1.8)$$

kde:

γ = úhel dopadu na osluněnou plochu [$^\circ$].

1.3.3 Difúzní sluneční záření

Difúzní záření vzniká v atmosféře odrazem záření od částic prachu, molekul plynů a vodních par ve vzduchu. Vlnová délka dopadajícího difúzního záření zůstává rovna vlnové délce záření přímého. Jako difúzní se považuje i to záření, které se odrazí od okolních objektů a dopadá na osluněnou plochu. Stejně jako u přímého záření se intenzita difúzního záření dopadajícího na zem zvyšuje se zmenšením zenitové vzdálenosti Slunce z , a klesá s rostoucí propustností atmosféry.

Difúzní záření se projevuje i v situacích, kdy na osluněnou plochu nedopadá žádné přímé

záření (Slunce je za mrakem či jeho paprsky přímo neozařují danou plochu). V takovýchto případech dochází ke zvýšení rozptylu paprsků v atmosféře, avšak naopak dochází i ke snížení odrazu záření od okolí. Proto lze při zatažené obloze difúzní záření s přípustnou odchylkou vypočítat dle stejného vztahu, jako při obloze jasné:

$$E_D = 0,5(1 + \cos \alpha) E_{Dh} + 0,5r (1 - \cos \alpha)(E_{Ph} + E_{Dh}) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.9)$$

kde:

E_{Ph} = intenzita přímého slunečního záření na horizontální rovinu [W/m^2],

E_{Dh} = intenzita difúzního slunečního záření na horizontální rovinu [W/m^2],

α = úhel sklonu oslněné plochy od vodorovné roviny [$^\circ$],

r = albedo (míra odrazivosti tělesa nebo jeho povrchu okolních ploch, nejčastěji $r = 0,2$).

Intenzita přímého záření dopadajícího na horizontální plochu se určí jako:

$$E_{Ph} = E_{Pn} \sin h \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.10)$$

Pro intenzitu difúzního záření dopadajícího na horizontální plochu platí vztah:

$$E_{Dh} = 0,33(E_0 - E_{Pn}) \sin h \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.11)$$

Sluneční záření dopadající na oslněnou plochu se skládá z přímého a difúzního záření. Intenzita tohoto záření se nazývá se intenzita celkového dopadajícího záření, která se vypočítá jako:

$$E = E_P + E_D \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.12)$$

1.3.4 Energie záření dopadajícího na oslněnou plochu

Teoretická velikost energie dopadajícího záření

Za předpokladu nulové oblačnosti, při níž by sluneční paprsky dopadaly na danou plochu od okamžiku východu Slunce do jeho západu, by energie, která dopadla na danou plochu během jednoho dne, tvořila tzv. teoretickou denní energii:

$$Q_{S \text{ den teor}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} E \, d\tau \quad [W \cdot h \cdot m^{-2}] \quad (1.13)$$

kde:

τ_1 = čas východu slunce [h],

τ_2 = čas západu slunce [h].

Teoretická denní energie slunečního záření dopadajícího na oslněnou plochu lze také zjistit sumací hodnot intenzity pro jednotlivé časové úseky $\Delta\tau$ (nejčastěji jednotlivé hodiny):

$$Q_{S \text{ den teor}} = \sum_{t=1}^n E_t \quad [W \cdot h \cdot m^{-2}] \quad (1.14)$$

Pro doby východu a západu slunce platí výraz:

$$\cos \tau_{1,2} = -tg\delta \cdot tg\varphi \quad (1.15)$$

kde:

δ = sluneční deklinace [$^\circ$],

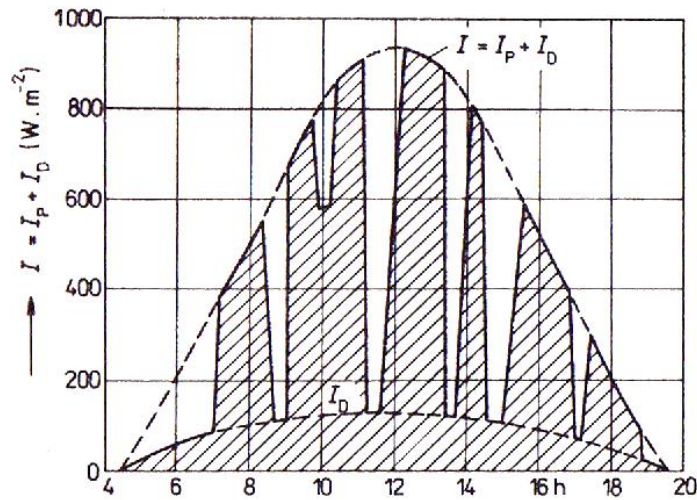
φ = zeměpisná šířka [°].

Teoretická doba slunečního svitu (tzv. astronomická doba) je určena algebraickým rozdílem času západu a východu Slunce:

$$\tau_{teor} = \tau_2 - \tau_1 \quad [h] \quad (1.16)$$

Skutečná velikost energie dopadajícího záření

Vlivem oblačnosti dochází ke střídání fází jasné a zatažené oblohy a tedy skutečná energie záření dopadajícího na osluněnou plochu se vlivem přítomnosti mračen zákonitě liší od energie teoretické. Zatímco se v bezoblačném stavu projevují obě složky intenzity celkového záření – přímé a difúzní, v situaci, kdy je Slunce stíněno mračky, působí na osluněnou plochu jen intenzita difúzního záření, jak znázorňuje obr. 1.12.



Obr. 1.12 Příklad denního průběhu intenzity osvětlení [6]

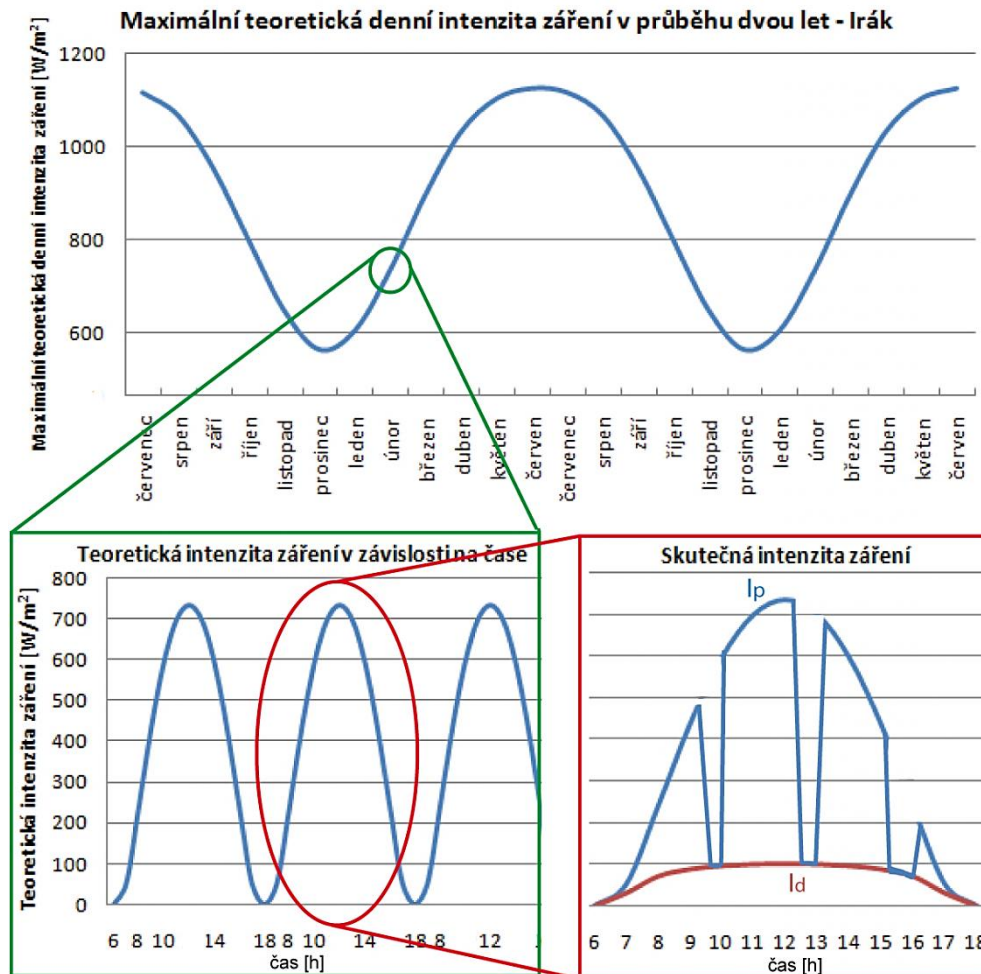
Z dlouhodobého hlediska se uvádí tzv. skutečná doba slunečního svitu τ_{skut} za určitý časový úsek – nejčastěji měsíc. Na základě této doby je možné určit tzv. poměrnou dobu slunečního svitu $\bar{\tau}$, kterou vyjadřuje vztah:

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_{skut}}{\tau_{teor}} \quad [h] \quad (1.17)$$

Skutečná energie záření dopadající na osluněnou plochu je dána výrazem:

$$Q_{S\ den} = \bar{\tau} \cdot Q_{S\ den\ teor} + (1 - \bar{\tau}) \cdot Q_{D\ den} \quad [W \cdot h \cdot m^{-2}]. \quad (1.18)$$

Následující obrázek (obr. 1.13) znázorňuje průběh intenzity dopadajícího slunečního záření pro různé časové úseky:



Obr. 1.13 Intenzita záření pro různé časové úseky

1.4 Vypočtené hodnoty energie dopadajícího záření pro vybrané lokality

1.4.1 Volba vhodné lokality pro provoz solárního vlaku

Pro výpočet energie dopadajícího slunečního záření na vodorovnou plochu byly zvoleny dvě vzorové lokace: důl na zlato a hliník v brazilském Alto Horizonte ($14^{\circ}11'$ j.š., $49^{\circ}20'$ z.d., 375 m n. m.) a plánovaný sulfátový důl umístěný v poušti, 35 km severovýchodně od iráckého města Samarra ($34^{\circ}11'$ s.š., $43^{\circ}52'$ v.d., okolo 130 m n. m.).

Lokalita Alto Horizonte byla vybrána z důvodu:

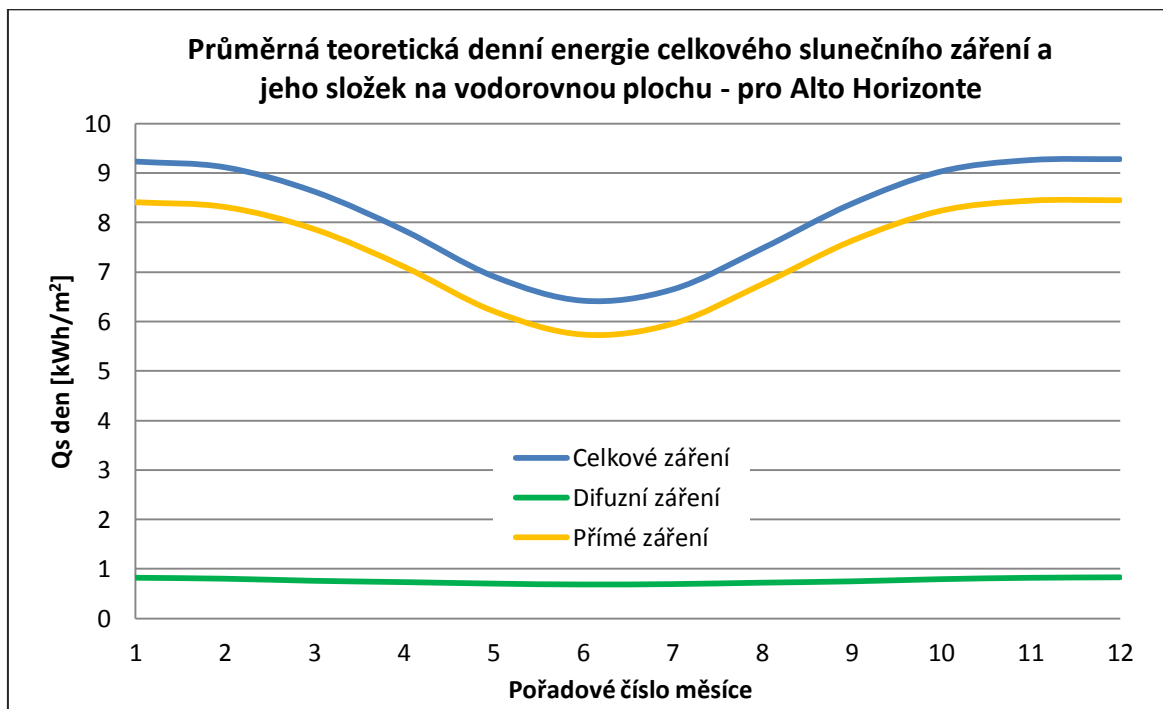
- malé vzdálenosti od rovníku – důsledkem je vysoká hodnota energie dopadajícího záření, avšak na rozdíl od rovníkové oblasti Brazílie, která leží v povodí řeky Amazonky, je zde výrazně nižší oblačnost;
- povrchového dolu na zlato a hliník nacházejícího se v těsné blízkosti Alto Horizonte;
- rovinatého terénu v závodu na zpracování rudy a v jeho okolí, což umožňuje zanedbání traťových odporů.

Oblast nedaleko města Samarra v Iráku byla zvolena pro:

- vysoké množství dopadajícího záření ročně, tato oblast je polopouští, tedy je zde velmi nízké množství oblačnosti;
- takřka nulové převýšení v této oblasti a proto je možné zanedbat traťové odpory;
- zahraničním investorům nabízené možnosti výstavby závodu na těžbu sulfátů.

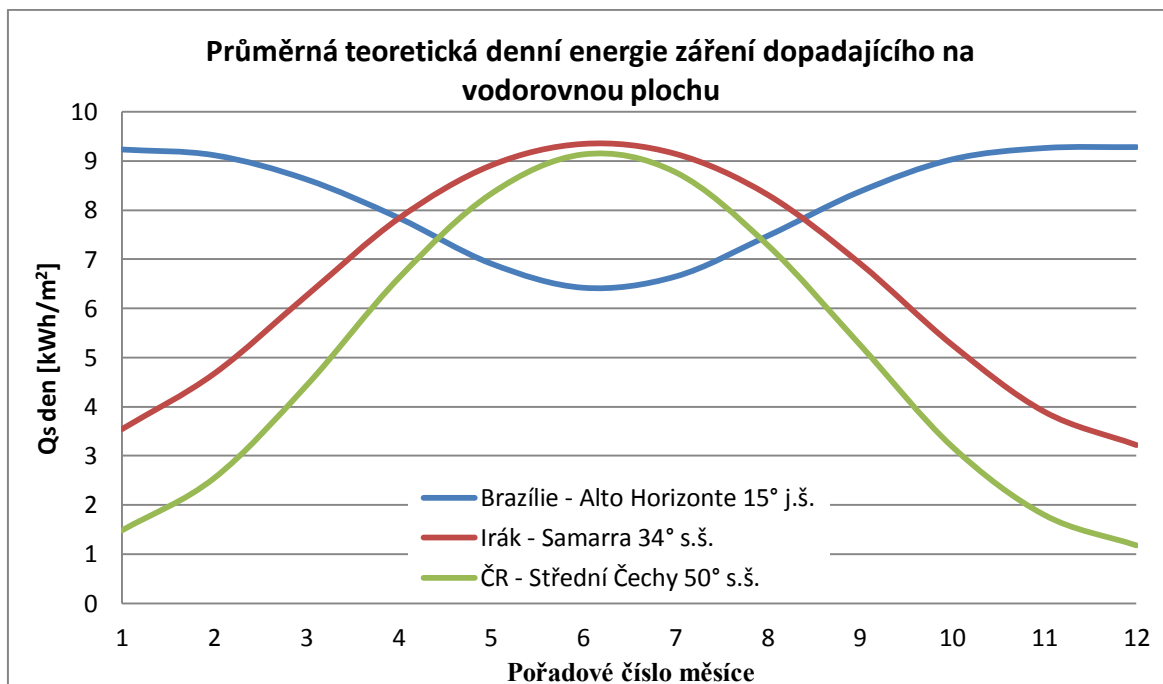
1.4.2 Energie slunečního záření pro jednotlivé lokality

Pro obě oblasti byla dle výše popsaných vztahů vypočtena průměrná teoretická denní energie dopadajícího záření na vodorovnou plochu $Q_{S,den,teor}$ pro jednotlivé měsíce v roce. Tato hodnota je integrací průběhu intenzity dopadajícího slunečního záření na osluněnou plochu během charakteristického dne v měsíci. Pro názornost byly vypočtené hodnoty porovnány s denní energií dopadajícího záření na vodorovnou plochu o poloze odpovídající České Republice, resp. její průměrné severní šířce (50. rovnoběžka – na níž leží například město Praha) a průměrné nadmořské výšce ČR - 450 m n. m. Příklad výsledků výpočtu průměrné denní teoretické energie přímého, difúzního a celkového záření pro Alto Horizonte dle způsobu výpočtu popsaném v kapitole 1.3 zobrazuje následující graf 1.1. Je z něj patrný poměrně vyrovnaný průběh difúzního záření v průběhu celého roku a závislost celkového záření na záření difúzním a přímém, jejichž algebraický součet celkové záření vyjadřuje.



Graf. 1.1 Přímé, difúzní a celkové záření

Porovnání teoretických energií celkového denního záření pro všechny tři lokality zobrazuje následující graf 1.2.

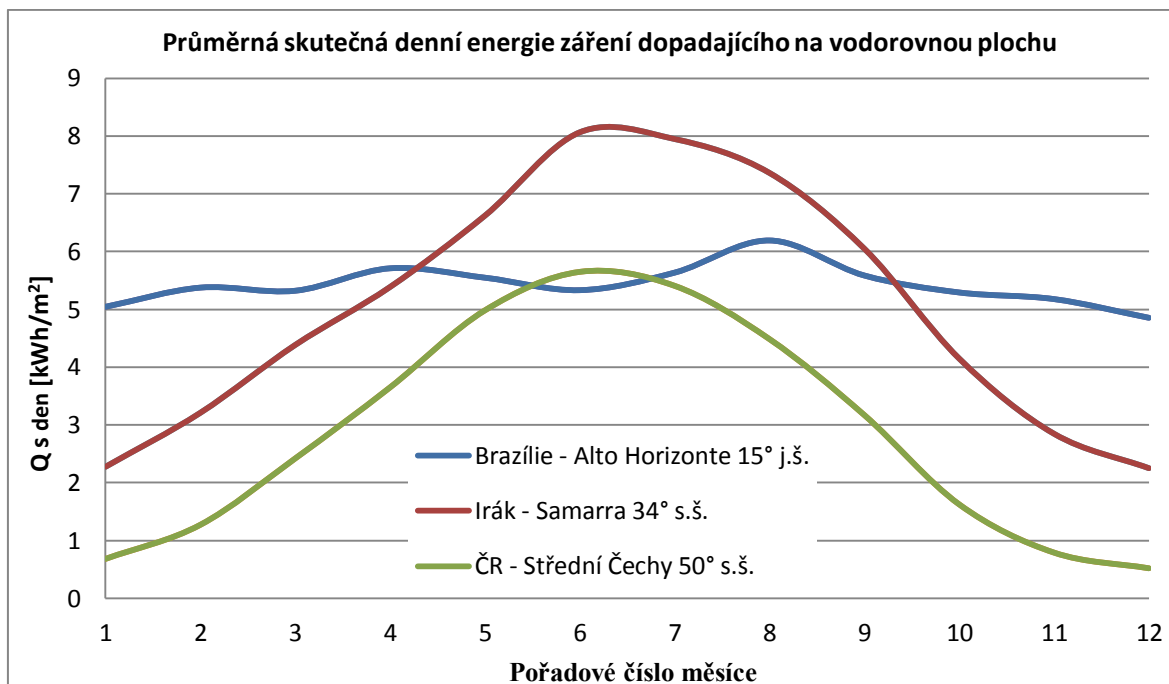


Graf. 1.2 Teoretická energie záření pro jednotlivé lokality

Vzhledem k faktu, že Slunce vlivem oblačnosti obvykle nesvítlí po celou dobu od východu do západu Slunce, je třeba operovat s tzv. poměrnou dobu slunečního svitu $\bar{\tau}$, tedy poměrem skutečné doby slunečního svitu k době teoretické, viz rovnice 1.18.

Teoretickou dobu slunečního svitu lze snadno zjistit výpočtem algebraického rozdílu dob východu a západu Slunce. Skutečná doba slunečního svitu závisí na množství oblačnosti v konkrétní lokalitě a její hodnota vychází z mnohaletého meteorologického pozorování. Zjistit skutečnou dobu slunečního záření je možné z odborných publikací meteorologických stanic a universit daného státu (např. [3]), z meteorologických tabulek, z tzv. atlasů solárního záření (například ESRA – European solar radiation atlas, First solar radiation atlas for the Arab world) či za pomoci softwaru pro určení velkého množství různých meteorologických údajů včetně dat týkajících se dopadajícího záření kdekoli na světě (např. NASA HOMER, NASA SSE).

Po dosažení poměrné doby slunečního svitu pro každý měsíc do výrazu 1.19 získáme skutečnou denní energii dopadajícího záření na osluněnou plochu pro jednotlivé měsíce v roce, graf 1.3.



Graf. 1.3 Skutečná energie záření pro jednotlivé lokality

Z porovnání obou předchozích grafů je patrný značný vliv $\bar{\tau}$ na skutečnou energii dopadajícího záření. Výraznější pokles nastal u skutečné energie záření pro brazilské Alto Horizonte. Zatímco v podzimním a zimním období dosahuje teoretická energie záření (integrace denního průběhu intenzity záření) hodnot nad 9 kWh/m²/den (maximum je v prosinci - 9,28 kWh/m²/den), vlivem značné oblačnosti v těchto ročních obdobích je skutečná energie dopadajícího záření výrazně snížena na cca 5 kWh/m²/den. Tím se stává celoroční průběh skutečné energie záření na Alto Horizonte poměrně vyrovnaný (roční průměr činí 5,42 kWh/m²/den).

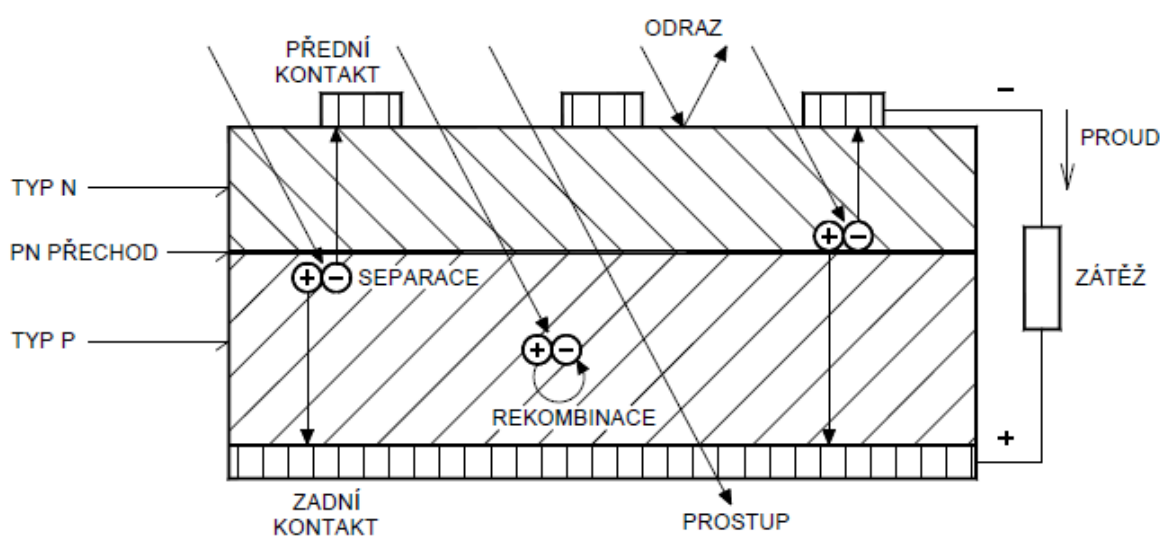
Přestože je skutečná energie záření dopadajícího na osluněnou plochu v Samaře v letních měsících podstatně vyšší, než je tomu v Alto Horizonte a pochopitelně i na 50. rovnoběžce, je její průběh v průběhu roku velmi nevyrovnaný (od prosincové hodnoty 2,25 kWh/m²/den až po 8,06 kWh/m²/den v měsíci červnu). Z tohoto důvodu se, díky rovnoměrnému průběhu skutečné energie solárního záření dopadajícího na osluněnou plochu během roku, jeví pro provoz solárního vlaku brazilská lokace výhodnější. Díky charakteru tohoto průběhu se nevyskytují natolik značné výkyvy energie záření závislé na ročním období, aby výrazně ovlivnily průměrný denní výkon solárních panelů a tím i rychlost vlaku během roku. K tomu v Alto Horizonte přispívá poměrně konstantní délka dne během roku, pohybující se v intervalu od 12,9 hodiny (prosinec) po 11,3 hodiny (červen), oproti Samaře, kde délka dne kolísá mezi 10 hodinami (prosinec) a 14,3 hodinami (červen).

Území České Republiky má z uvedených lokalit nejnižší skutečnou energii dopadajícího záření na osluněnou plochu ročně. Její celoroční průměr činí 2,88 kWh/m²/den, přičemž průběh dopadající energie na vodorovnou plochu během roku je velmi nevyrovnaný. Minima dosahuje skutečná energie v prosinci (0,52 kWh/m²/den) a maxima v měsíci červnu (5,65 kWh/m²/den), což je více než jedenáctinásobek prosincové hodnoty. Díky velmi nevyrovnanému průběhu dopadající sluneční energie během roku a nízké intenzitě záření v zimních měsících je zřejmé, že Česká Republika je pro celoroční provoz fotovoltaickými články přímo napájeného železničního vozidla naprosto nevhodná.

1.5 Parametry soudobých a perspektivních fotovoltaických článků

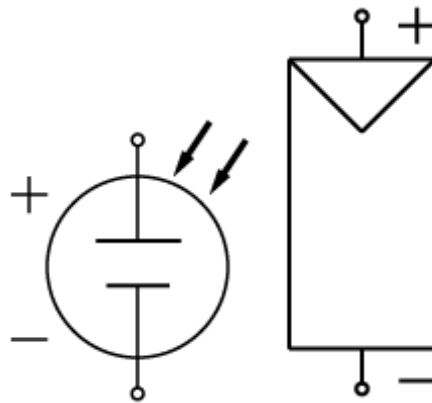
1.5.1 Princip a vlastnosti fotovoltaického článku

Přeměna energie elektromagnetického záření na energii elektrickou byla objevena Edmundem Becquerelem v roce 1839. V roce 1904 fotoelektrický jev fyzikálně popsal Albert Einstein, za což mu byla později udělena Nobelova cena. Fotovoltaická přeměna se uskutečňuje ve vhodném polovodičovém fotovoltaickém prvku označovaném jako fotovoltaický či solární článek. V současné době je převážná část vyrobených fotovoltaických článků na bázi krystalického křemíku. Fotovoltaický článek je v podstatě velkoplošná dioda, kde je přechod PN orientován kolmo k čelní ploše mezi přední a zadní stranou fotovoltaického článku. Princip činnosti fotovoltaického článku je znázorněn na obr. 1.14.



Obr. 1.14 Princip fotovoltaického článku [12]

Při dopadu elektromagnetického záření dochází k jeho vzájemnému působení s hmotou, přičemž jsou pohlcovány fotony a uvolňovány elektrony. V případě, kdy na fotovoltaický článek dopadají fotony s energií o vyšší hodnotě, než odpovídá šíři zakázaného pásma (u krystalického křemíku je šíře zakázaného pásma $\Delta E_G \approx 1,1$ eV), jsou těmito fotony generovány vodivostní páry elektron – díra. Tímto způsobem fotony předají svou energii a dochází k jejich pohlcení. Pokud je část energie fotonů přebytečná, je obvykle přeměněna krystalickou mřížkou materiálu na teplo, čímž dochází ke zvýšení teploty materiálu polovodiče a tedy i fotovoltaického článku. Generované páry elektron-díra jsou od sebe v oblasti přechodu separovány elektrickým polem. Elektrony jsou urychleny směrem k oblasti typu N a díry k oblasti typu P. Rozdělení náboje má za následek vznik napětí (rozdíl potenciálů) mezi předním a zadním kontaktem. V oblasti typu P je následně nedostatek elektronů a v oblasti typu N je nadbytek elektronů. V případě, že dojde k propojení oblastí typu N a P s vnějším zatíženým elektrickým obvodem, budou se elektrony z oblasti typu N přesouvat skrz zátěž do oblasti typu P. Do vnějšího zatíženého elektrického obvodu v takovém případě teče stejnosměrný elektrický proud, jehož velikost je úměrná účinnosti článku a tím pádem i materiálu a technologii výroby článku, ploše fotovoltaického článku, intenzitě dopadajícího elektromagnetického záření, znečištění článku a dalším faktorům.



Obr. 1.15 Schematická značka fotovoltaického článku (vlevo) a fotovoltaického panelu (vpravo)

Některé z hlavních výhod využití fotovoltaických článků jako zdroje elektrické energie:

- přímá přeměna solárního záření v elektrickou energii,
- neobsahují mechanické pohyblivé části, čím při jejich provozu nevzniká žádný hluk,
- nedosahují vysokých teplot,
- nulové znečištění a zápach, při výrobě elektrické energie neprodukuje CO₂,
- fotovoltaické panely jsou poměrně robustní a mají dlouhou životnost,
- zdroj energie (Slunce) je „nevyčerpatelný“.

Z uvedeného výčtu pozitivních vlastností fotovoltaických článků lze usuzovat, že fotovoltaická přeměna sluneční energie v elektrickou energii je k životnímu prostředí nejšetrnějším využívaným způsobem výroby elektřiny. Je však třeba vzít v potaz i energetickou náročnost a ekologičnost samotné výroby fotovoltaických panelů. Proto se udává tzv. doba energetické návratnosti, což je doba, po kterou musí fotovoltaické články vyrábět elektrickou energii, aby nahradily energii spotřebovanou při jejich výrobě. Hodnota doby energetické návratnosti se, v závislosti na technologii výroby a použitém materiálu panelu, obvykle pohybuje okolo 1 až 5 let. Vzhledem k životnosti fotovoltaických panelů, která je běžně mezi 20 až 30 roky, je doba návratnosti podstatně kratší.

1.5.2 Základní parametry fotovoltaických článků

Účinnost solárního článku

Účinnost solárních článků specifikuje, jak velká část energie solárního záření je článkem přeměněna na energii elektrickou dle následujícího vztahu:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{zár}} = \frac{P_m}{E \cdot S_{\check{c}}} \quad (1.19)$$

kde:

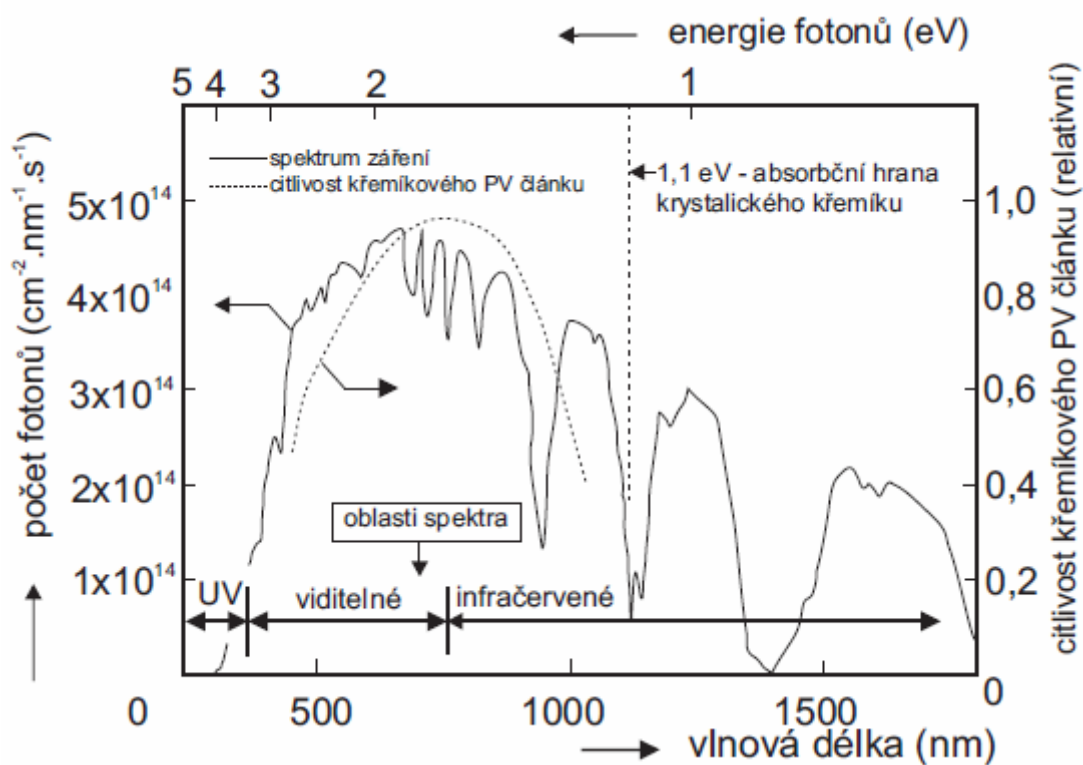
P_m = maximální elektrický výkon dodávaný fotovoltaickým článkem [W],

$P_{zár}$ = výkon dopadajícího záření [W],

E = intenzita osvětlení při standardizovaných zkušebních podmínkách ve směru kolmém na plochu článku [$W \cdot m^{-2}$],

$S_{\check{c}}$ = plocha fotovoltaického článku [m^2].

Čím je účinnost vyšší, tím více elektrické energie mohou solární články přeměňovat ze slunečního záření. Účinnost článků závisí na vlastnostech materiálu fotovoltaického článku, například tzv. spektrální citlivosti článku na vlnovou délku dopadajícího záření, která udává účinnost článku pro různá pásma vlnových délek záření. Fotovoltaické články z krystalického křemíku jsou citlivé na fotony viditelného a částečně i infračerveného záření o vlnových délkách kratších než 1100 nm. Spektrum slunečního záření dopadající na zemský povrch a absorpční hranu krystalického článku znázorňuje obr. 1.16.



Obr. 1.16 Spektrum slunečního záření dopadajícího na zemský povrch [13]

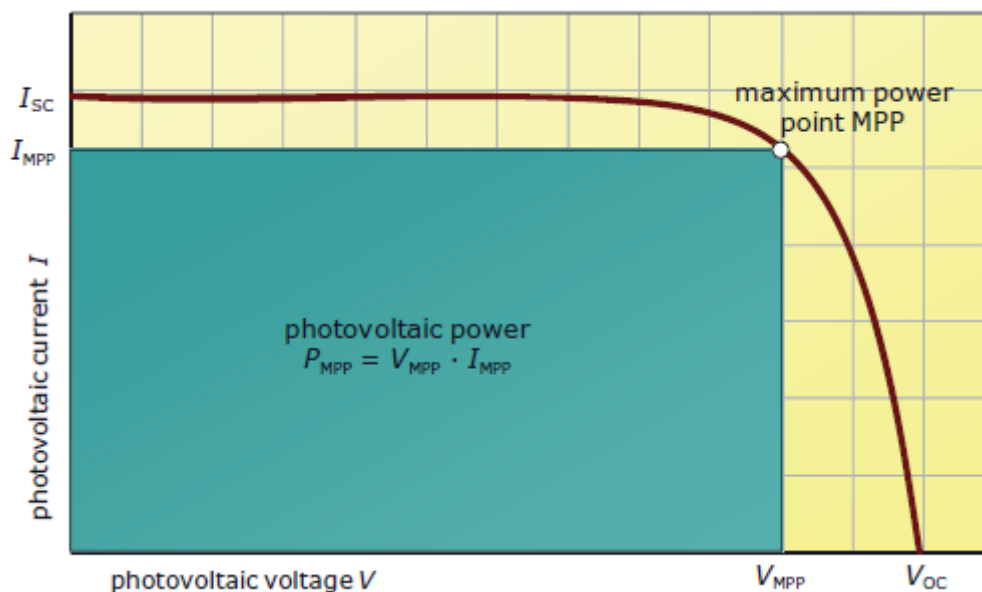
Dnešní sériově vyráběné křemíkové články dosahují účinnosti téměř 20%. V laboratorních podmínkách bylo dosaženo účinnosti až 25 %.

Pokud jsou jednotlivé články spojovány do fotovoltaických panelů, účinnost klesá vlivem prostoru nezbytného mezi jednotlivými články a vlivem rámu panelu. Pro podstatné zvýšení elektrického výkonu článků lze využít tzv. koncentrátory záření, což mohou být například zrcadla nebo čočky, které koncentrují záření dopadající na povrch článku. Cena takto upravených článků je však podstatně vyšší než u běžných křemíkových článků. Další možností maximalizace zisku sluneční (a tím i elektrické) energie jsou tzv. sledovače Slunce, což jsou zařízení sloužící k natáčení solárních panelů tak, aby byl udržován ideální úhel dopadu slunečních paprsků na fotovoltaické panely v průběhu dne.

Kromě účinnosti existují i další parametry popisující fotovoltaické panely. Tyto parametry jsou popisovány voltampérovou charakteristikou, která udává závislost proudu na napětí. Na této charakteristice jsou určeny body používané k hodnocení kvality fotovoltaických článků a při návrhu fotovoltaických aplikací.

Proud nakrátko

Maximální proud panelem nakrátko (fotoelektrický proud) se značí I_{sc} a je obvykle vždy uváděn nebo lze odečíst z voltampérové charakteristiky, viz následující obrázek.



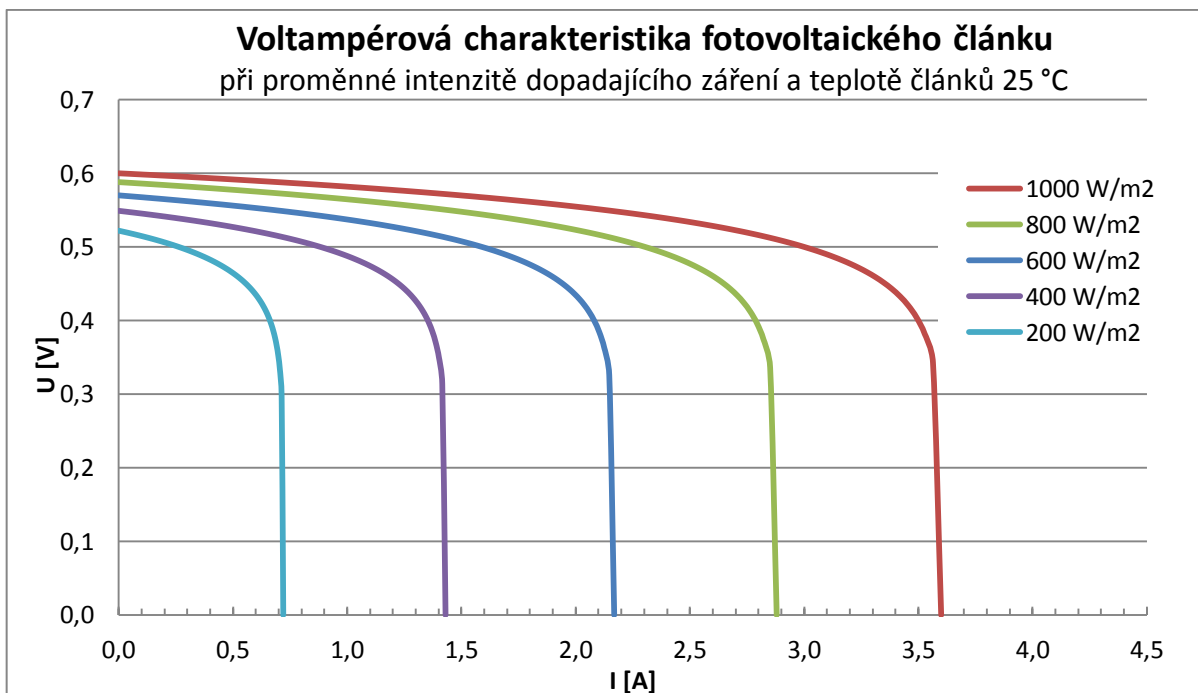
Obr. 1.17 Voltampérová charakteristika s vyznačenými charakteristickými hodnotami článku [17]

Zkratování není pro panel nebezpečné, neboť je zkratový proud omezen a závisí na intenzitě slunečního záření, ploše a spektrální citlivosti článku i jeho teplotě. Hodnota proudu nakrátko se pohybuje v řádech desítek mA až jednotek A. Největší běžně dostupné fotovoltaické články dosahují při plném ozáření velikosti proudu I_{sc} nad 6 A.

Napětí naprázdno

Pokud není připojena zátěž k fotovoltaickému panelu, neteče obvodem proud a napětí na svorkách se v takovém případě nazývá napětí naprázdno U_{oc} (open – circuit), což je další charakteristická hodnota voltampérové charakteristiky. V případě monokrystalických článků se toho napětí pohybuje okolo hodnoty 0,6 V. Fotovoltaický panel ve stavu naprázdno nebo nakrátko neprodukuje žádný elektrický výkon.

Výstupní elektrické hodnoty fotovoltaického článku závisí na počtu přichozích fotonů - intenzitě záření přichozícího světla. Pokud intenzita slunečního světla klesne na polovinu, pak je výkon fotovoltaických článků snížen také na polovinu. Následující graf znázorňuje změnu proudu nakrátko, napětí naprázdno a tím i výkonu článku v závislosti na různé velikosti intenzity dopadajícího slunečního záření.



Graf. 1.4 Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku z monokrystalického křemíku pro různé intenzity osvětlení

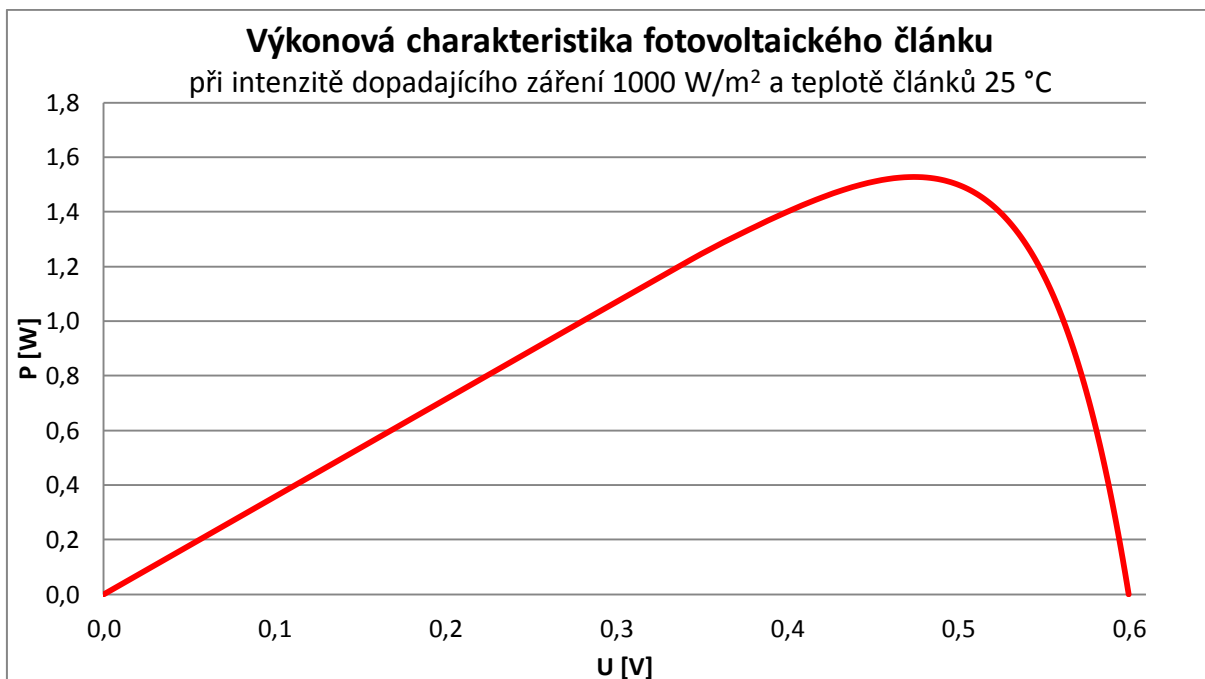
Výkon a pracovní bod článku

V praxi je cílem získat z fotovoltaických panelů maximální výkon, který odpovídá největší ploše obdélníku pod křivkou. Horní pravý vrchol obdélníku tvoří bod maximálního výkonu MPP (Maximum Power Point).

Napětí, které odpovídá MPP, se nazývá napětí MPP (U_{MPP}). Totéž platí i pro proud I_{MPP} , při kterém dodává fotovoltaický článek maximální výkon. Pro výkon v bodě MPP lze tedy psát:

$$P_{mpp} = U_{mpp} \cdot I_{mpp} \quad [W] \quad (1.20)$$

Následující graf znázorňuje závislost výkonu křemíkového fotovoltaického článku a jeho výstupního napětí.



Graf. 1.5 Výkonová charakteristika křemíkového fotovoltaického článku

Momentální poloha na voltampérové charakteristice, kde fotovoltaický článek pracuje, se nazývá pracovní bod (PB). Jeho poloha závisí na vlastnostech spotřebiče připojeného k panelu, přičemž snahou je, aby se poloha pracovního bodu blížila poloze MPP.

V reálných situacích může být provozu blízko MPP dosaženo v případě, že je k fotovoltaickým článkům připojen akumulátor s napětím blízkým U_{MPP} , kdy je poloha pracovního bodu dána napětím akumulátorů, nebo je připojen střídač automaticky nastavující napětí MPP. Pokud články pracují do obecné zátěže, je poloha pracovního bodu určena odporem zátěže.

Fill factor

Poměr mezi výkonem P_{MPP} a výkonem daným proudem nakrátko a napětím naprázdno se nazývá činitel naplnění, neboli parametr FF (Fill Factor). Hodnota parametru FF závisí na kvalitě kontaktů fotovoltaického článku, morfologii materiálu a odporu aktivní polovodivé vrstvy. Pro činitel naplnění platí následující výraz:

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad [-] \quad (1.21)$$

Pokud by byl maximální výkon P_{MPP} dán proudem nakrátko a napětím naprázdno, byla by hodnota FF parametru rovna 1, což je ideální případ. Avšak v praxi není reálné této hodnoty dosáhnout. Podle velikosti činitele naplnění se dá posuzovat kvalita konkrétního fotovoltaického článku.

Pro porovnání vlastností fotovoltaických panelů byly na mezinárodní úrovni definovány standardní testovací podmínky STC (Standard Test Condition). Podle nich je výkon MPP solárních článků a panelů stanoven při intenzitě kolmo dopadajícího solárního záření 1000 W na metr čtvereční, průzračnosti atmosféry $A_m = 1,5$ a teplotě článku 25 °C.

1.5.3 Vliv teploty na parametry fotovoltaických článků

S rostoucí teplotou fotovoltaických článků dochází ke změně elektrických vlastností článků.

Pokud jsou solární panely vystaveny vysokým teplotám, mají nižší elektrický výkon než panely umístěné v chladnějším prostředí.

Fotovoltaické panely vystavené slunečnímu záření se zahřívají zejména díky infračervené složce záření, kterou absorbují. V oblastech s vysokými denními teplotami mohou solární panely dosahovat teploty 80 – 90 °C.

NOCT

V katalogích fotovoltaických panelů bývá často uváděna teplota NOCT (Nominal Operation Cell Temperature), která definuje teplotu fotovoltaického článku při teplotě okolí 20 °C, intenzitě záření 800 W/m² a rychlosti větru 1 m/s. Hodnota NOCT obvykle leží mezi 42 – 50 °C (nejčastěji je teplota NOCT okolo 45 °C). Vztah mezi teplotou panelu, teplotou okolí, teplotou NOCT a intenzitou slunečního záření E udává následující výraz:

$$T_{pa} = T_{ok} + \left(\frac{NOCT - 20}{0,8} \right) \cdot E \quad [^{\circ}C] \quad (1.22)$$

kde:

T_{pa} = teplota fotovoltaického panelu [°C],

T_{ok} = teplota okolí [°C].

Závislost proudu nakrátko na teplotě

Proud nakrátko článků I_{sc} je přímo úměrný nejen intenzitě solárního záření, ale jeho hodnota stoupá i s teplotou článku. Koeficient α udává relativní přírůstek hodnoty proudu při vzrůstu teploty o jeden stupeň Celsia nad standardních 25 °C. Pro monokrystalický křemíkový článek se obvyklá hodnota α pohybuje okolo 0,4 % na stupeň Celsia.

Výpočtem lze tuto hodnotu ověřit na příkladu monokrystalického fotovoltaického panelu E19/320 firmy Sunpower, která udává velikost teplotního koeficientu pro proud nakrátko 3,5 mA/°C (platí pro celý panel). Teplotní koeficient α pro jeden článek se vyjádří následovně:

$$\alpha = \frac{I_{sc_p}}{n} = \frac{3,5}{128} = 0,027 \text{ mA}/^{\circ}C \quad (1.23)$$

kde:

I_{sc_p} = teplotní koeficient fotovoltaického panelu pro proud nakrátko [mA/°C],

n = počet článků ve fotovoltaickém panelu [-].

Hodnota 0,027 mA/°C odpovídá změně proudu nakrátko I_{sc} o 0,44 % se změnou teploty o stupeň Celsia.

Velikost proudu nakrátko I_{sc} pro libovolnou teplotu okolí a intenzitu záření se vyjádří dle vztahu:

$$I_{sc}(T_{\text{čl}}, E) = I_{sc}(STC) \cdot \frac{E}{1 \text{ kW}/m^2} \cdot [1 + \alpha(T_{\text{čl}} - 25^{\circ}C)] \quad (1.24)$$

kde:

$T_{\text{čl}}$ = teplota fotovoltaických článků,

$I_{sc}(STC)$ = proud nakrátko při STC.

Závislost napětí naprázdno na teplotě

Také napětí naprázdno fotovoltaického článku závisí na teplotě - lineárně s ní klesá.

Pro změnu napětí naprázdno při změně teploty platí dle [5]:

$$\frac{dU_{oc}}{dT} = \frac{1}{T_{\text{čl}}} (U_{oc} - \Delta W) \quad (1.25)$$

kde:

$T_{\text{čl}}$ = teplota fotovoltaického článku [K],

ΔW = šíře zakázaného pásu [eV].

V případě křemíkového fotovoltaického článku o teplotě 25 °C (298,15 K) je možné po dosazení psát:

$$\frac{dU_{oc}}{dT} = \frac{1}{298,15} (0,6 - 1,1) = -0,00168 \quad [V/K] \quad (1.26)$$

V případě uvažování U_{oc} o velikosti 0,6 V vyvolá změna teploty o stupeň Celsia změnu U_{oc} o 0,28 %.

Závislost výkonu na teplotě

Na změnu maximálního výkonu fotovoltaického panelu má vliv mnoho proměnných. Souhrnně tento vliv vyjadřuje parametr γ , který je definován jako relativní změna výkonu fotovoltaického panelu při změně teploty článku o 1 °C [11].

Hodnota koeficientu γ je dána materiálem fotovoltaického článku a obvykle ji udává výrobce panelu, avšak je možné ji dle [26] určit početně jako:

$$\gamma = \frac{1}{T_o - T_{\text{čl ref}}} \quad (1.27)$$

kde:

T_o = teplota, při které klesá elektrická účinnost fotovoltaického článku k nule [°C], pro článku z monokrystalického křemíku je běžně $T_o = 270$ °C,

$T_{\text{čl ref}}$ = referenční teplota fotovoltaického článku.

Po dosazení hodnot pro článek z monokrystalického křemíku a referenční teplotu 25 °C vychází velikost koeficientu γ :

$$\gamma = \frac{1}{T_o - T_{\text{čl ref}}} = \frac{1}{270 - 25} = 0,0041 \quad [1/^\circ\text{C}] \quad (1.28)$$

Z výrazu je patrné, že při kladné změně teploty o 1 °C poklesne velikost výkonu fotovoltaického článku z krystalického křemíku (s koeficientem $\gamma = 0,0041$ 1/°C) o 0,4 procenta. Zatímco při poklesu teploty o 1 °C se výkon solárního panelu zvýší o 0,4 %. Při vzestupu teploty u tohoto článku o 25 °C, klesne výkon již o 10 %. Proto je třeba dbát na dobré větrání panelů a případně zvýšenou teplotu řešit vhodným návrhem chlazení. K přehřívání může dojít za bezvětří, kdy jsou zhoršeny podmínky chlazení článku, či při kombinaci vysoké intenzity slunečního záření a déletrvajících nulových oblačností.

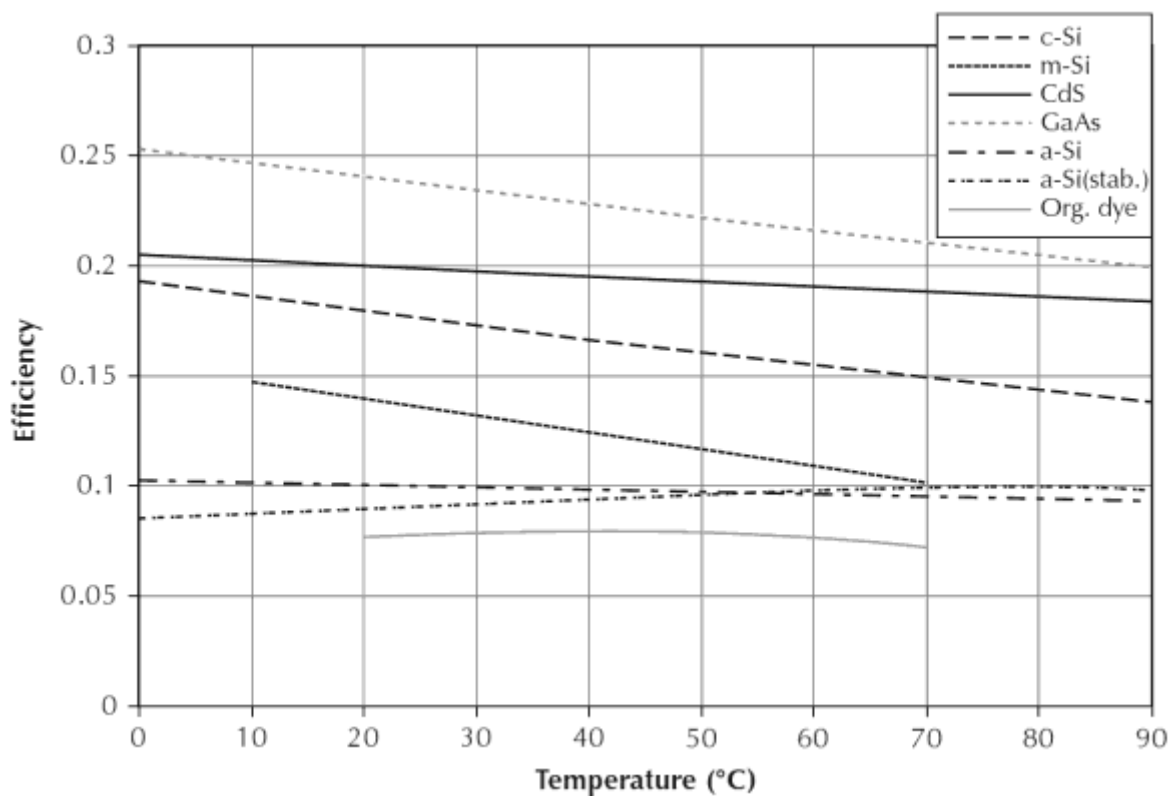
Účinnost fotovoltaického článku se za pomoci parametru γ vyjádří jako:

$$\eta_{\text{čl}}(T_{\text{čl}}, E) = \eta_{\text{čl}}(STC) \cdot [1 - \gamma(T_{\text{čl}} - 25^\circ\text{C})] \quad (1.29)$$

kde:

$\eta_{el}(STC)$ = účinnost fotovoltaického článku při STC.

Následující graf znázorňuje účinnost solárních článků v závislosti na teplotě článků pro různé materiály článků.



Graf. 1.6 Účinnost solárních článků v závislosti na jejich teplotě - pro různé materiály článků [13]

Je zřejmé, že u některých materiálů (amorfni křemík, CdS) klesá účinnost s teplotou podstatně méně, než je tomu například u článků z krystalického křemíku. U článků vyrobených z amorfniho hydrogenovaného křemíku dokonce účinnost s teplotou stoupá [13].

V oblastech mírného podnebného pásu (střední a severní Evropa, Kanada) není při návrhu fotovoltaické aplikace teplota příliš významný parametr. Avšak v subtropických a tropických podnebných pásech, kde jsou po většinu roku denní teploty nad 25 °C, se mohou tepelné vlastnosti solárních panelů stát důležitými faktory při výběru vhodných fotovoltaických panelů.

Zvýšenou teplotu solárních panelů je možné redukovat zajištěním volného proudění vzduchu okolo dolní a horní strany panelu. Proto se pro umožnění cirkulace vzduchu při umístění panelů na podklad rovnoběžný s panely (např. střecha domu či vozidla) ponechává mezi panelem a podkladem mezera 7 – 10 cm [12].

1.5.4 Vliv teploty na výkon vozidla přímo napájeného fotovoltaickými panely

Při návrhu solárního vozidla, kterým se zabývá tato práce, byla uvažována potřeba zajištění proudění vzduchu okolo fotovoltaických panelů. Fotovoltaické panely proto nejsou připevněny přímo na střechu vozu, ale na konzoli, která zajišťuje cirkulaci vzduchu okolo panelů. Při jízdě vozidla jsou panely ochlazovány proudícím vzduchem, jehož rychlost je dána mimo jiné rychlostí vozidla. Čím rychleji vlak pojedí, tím více budou panely ochlazovány a tím bude vyšší hodnota energie získané ze Slunce, což se projeví zvýšením

rychlosti vozidla. Jedná se tedy o kladnou zpětnou vazbu.

Při nízké intenzitě dopadajícího solárního záření (dané oblačností či denní dobou) klesá rychlost vozidla, avšak zároveň klesá i míra zahřívání fotovoltaických panelů slunečním zářením. Dále je zřejmé, že delší stání solárního železničního vozidla se bude projevovat nižším elektrickým výkonem fotovoltaických panelů, neboť panely nebudou ochlazovány proudícím vzduchem (není-li uvažován vliv větru). Proto je žádoucí dobu stání vozidla minimalizovat a využívat tak maximálně chlazení panelů proudícím vzduchem při jízdě vozidla. Vůz by po dlouhém stání disponoval (vlivem teploty) sníženým výkonem fotovoltaického zdroje, který by však rostl se zvyšující se rychlostí rozjíždějícího se vozu a tedy i zvyšující se rychlostí vzduchu.

1.5.5 Fotovoltaické články z krystalického křemíku

V současné době jsou nejrozšířenější fotovoltaické články na bázi křemíku, neboť ten je nejvíce používaným dobře dostupným polovodičem, jehož cena je poměrně nízká. V přírodě se čistý křemík nevyskytuje, avšak ve formě sloučenin je jeho výskyt hojný. Jde o v pořadí druhý nejvíce se vyskytující prvek v zemské kůře (první je kyslík). Dokonce i lidské tělo obsahuje křemík (okolo 20 mg). Základní surovinou pro výrobu čistého křemíku je snadno dostupný křemenný písek. Existuje několik metod na získání křemíku z křemenného písku, z nichž je dnes nejvyužívanější technologie firmy Siemens s tzv. chlórovým cyklem. Tato metoda výroby je však nešetrná k životnímu prostředí a energeticky (a tedy i finančně) náročná. V současné době jsou testovány nové technologie, které nepoužívají při výrobě chlor, což přispívá k ekologičnosti výroby i její bezpečnosti a nižší ceně. Křemík lze získat až o čistotě tzv. ppb, která obsahuje minimální množství příměsí (řádově 10^{-9}). Pro výrobu fotovoltaických článků však stačí křemík o množství příměsí řádově 10^{-6} (tzv. čistota ppm).

Fotovoltaické články z krystalického křemíku se dělí na monokrystalické a polykrystalické.

- Monokrystalické fotovoltaické články jsou tvořené destičkou z jediného krystalu křemíku s pravidelnou krystalickou mřížkou. Používá se křemík o čistotě vyšší než 99,9999%, který zároveň slouží pro výrobu polovodičových součástek. Účinnost monokrystalických článků je vyšší než u článků polykrystalických. U sériově vyráběných článků se účinnost pohybuje od 14 do 22%. Vyšší účinnost se projevuje i na jejich vyšší ceně oproti polykrystalickým článkům.
- Výroba polykrystalických článků je jednodušší. Čistota křemíku používaného pro výrobu těchto článků je nižší než u křemíku pro monokrystalické články a dosahuje hodnoty 99,99%. Jedná se o cenově dostupnější a méně výkonnou alternativu k monokrystalickým fotovoltaickým článkům. Účinnost sériově produkovaných polykrystalických článků se pohybuje mezi 13 až 16%.

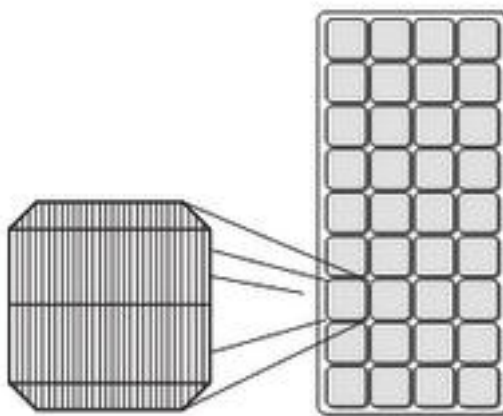
Přední strana článků bývá antireflexně upravena, pokrývá ji průhledná antireflexní folie o tloušťce menší než $1 \cdot 10^{-6}$ mm, která dává fotovoltaickým panelům typické modravé zbarvení. Tato vrstva snižuje odrazivost černo-šedého křemíku na přední ploše solárního článku. Čím jsou články tmavší, tím méně světla odráží. Přední a zadní kontakty jsou nanášeny pomocí síťotisku. K redukci ztrát danými neprůhlednými předními kontakty ukrývají některé firmy kontakty pod povrch nebo na zadní část článku. To je sice z hlediska účinnosti výhodnější, avšak přináší to s sebou náročnější technologii výroby a vyšší cenu.

1.5.6 Spojování křemíkových fotovoltaických článků do panelu

Fotovoltaický panel se může sestávat ze sériově, paralelně či sérioparalelně zapojených fotovoltaických článků. Křemíkové solární články bývají obvykle čtvercového tvaru (často se zkosenými rohy). Délka hrany „čtverce“ se z původních 10 cm ustálila na standardních 15 –

20 cm. Výroba panelu ze solárních článků velkých rozměrů je snazší, neboť je zapotřebí menší množství výrobních kroků pro vsazení článků do panelu. Nicméně riziko, že budou tyto větší buňky poškozeny v průběhu dalšího zpracování je vyšší než u článků menších rozměrů. Velikost výstupního elektrického proudu je přímo úměrná ploše fotovoltaického článku, napětí je na velikosti článku nezávislé. Jeho hodnota se pohybuje okolo 0,6 V.

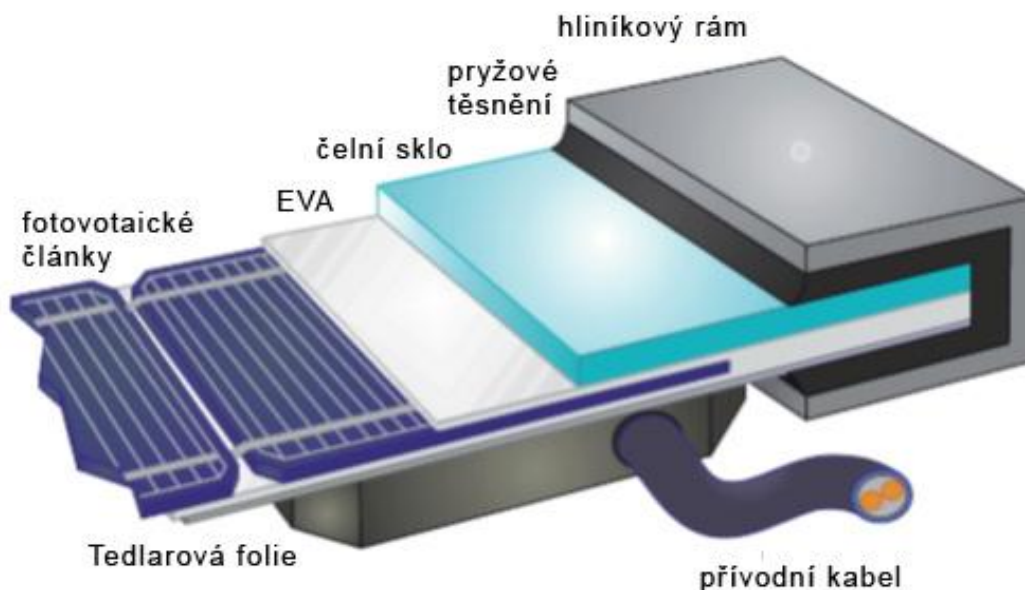
Praktické aplikace vyžadují vysoké napájecí napětí a z toho důvodu bývají články spojovány sériově do formy solárních panelů, viz následující obrázek.



Obr. 1.18 Spojování fotovoltaických článků do panelů [19]

Přední kontakty článku jsou připojeny k zadním kontaktům sousedního článku pájením. Sériové spojení 32 až 40 solárních článků dodává dostatečné napětí například k nabíjení 12 V akumulátoru. Vyšší napětí bývají dodávána do sítě pomocí střídačů k tomu určených.

Solární články jsou velmi křehké, mohou se snadno zničit, a proto musí být chráněny před poškozením i korozí v důsledku vlhkosti. Proto se solární články zalévají speciální umělou hmotou tvořící vrstvu mezi sklem panelu a plastovou folií na zadní straně panelu (někteří výrobci ji nahrazují sklem), obr. 1.19.

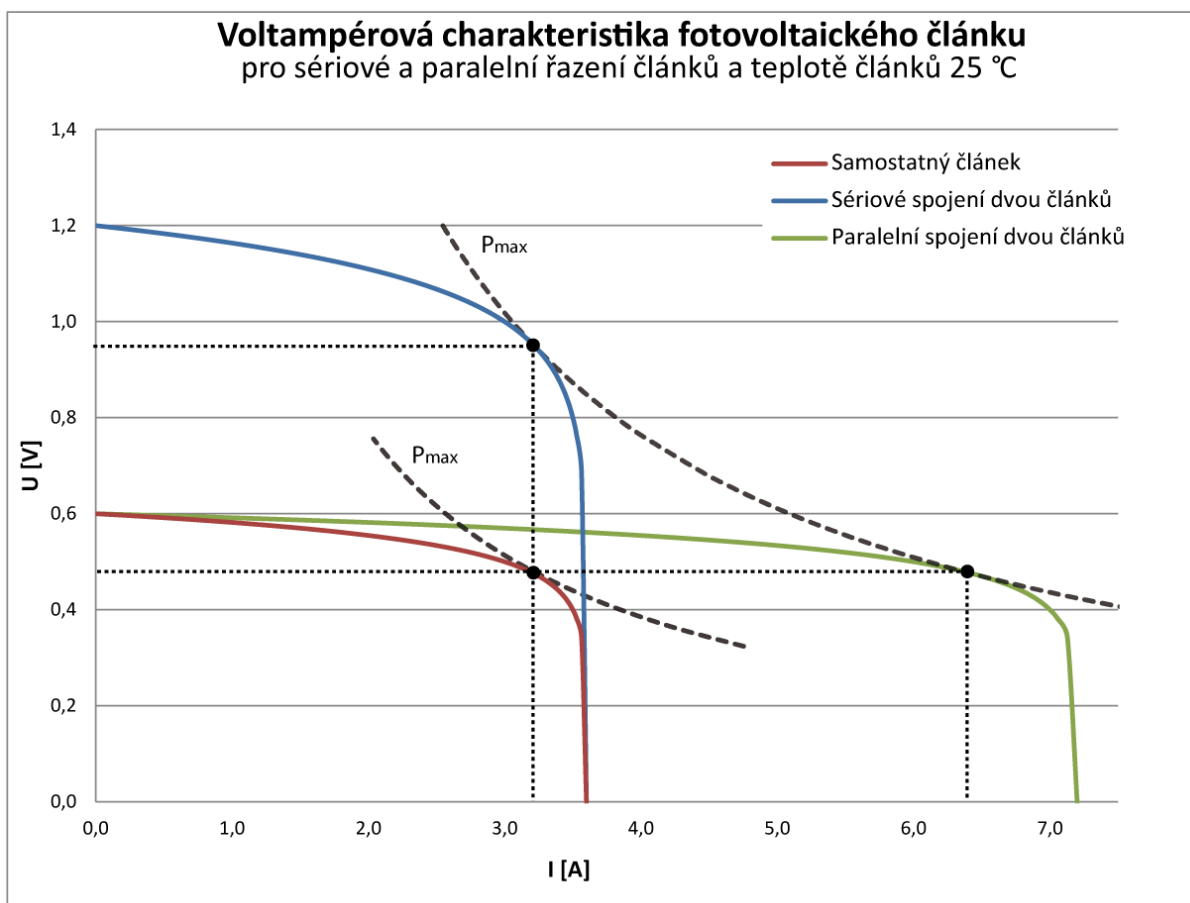


Obr. 1.19 Struktura fotovoltaického panelu s články z krystalického křemíku [17]

Sklo dobrých optických vlastností na přední straně panelu zajišťuje mechanickou stabilitu panelu a spolupodílí se na ochraně fotovoltaických článků před poškozením. Plastový

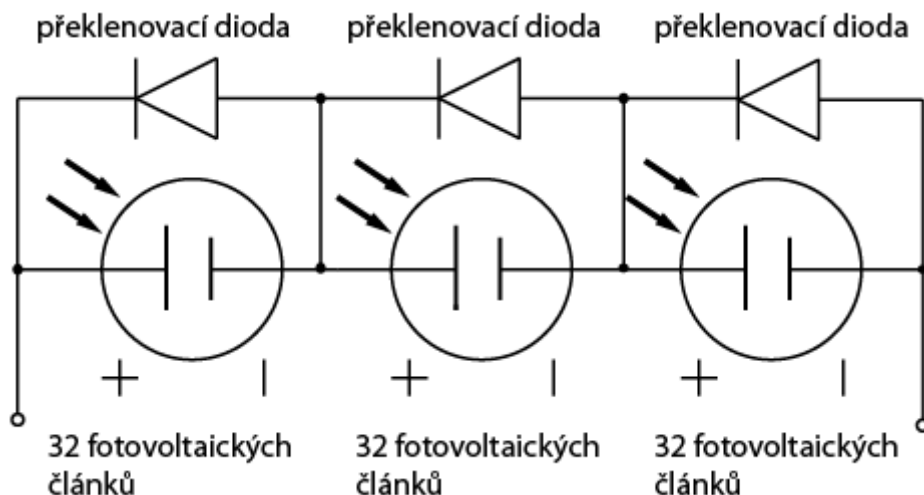
materiál, ve kterém jsou uloženy fotovoltaické články se skládá ze dvou tenkých vrstev vyrobených z ethylen – vinyl – acetátu (EVA). Při výrobě panelů se EVA vrstvy zahřejí na 100 °C a přichytí se tak k článkům a sklu (jedná se o proces nazývaný laminace), čímž chrání články před povětrnostními vlivy, zejména vlhkostí, která může zapříčinit korozi článků. Solární články jsou propojeny s modulem připojovacího boxu.

Při sériovém řazení fotovoltaických článků (stejně jako panelů) roste napětí výsledného zapojení, při paralelním zapojení článků/panelů roste výstupní proud celku. Výkon dodávaný stejným počtem sériově či paralelně zapojených článků/panelů je stejný, viz následující obrázek.



Graf. 1.7 Sériové a paralelní zapojení fotovoltaických článků

Pokud je zapojeno více solárních článků do série, může při zastínění jednotlivých buněk dojít k poškození zastíněné buňky či laminovacího materiálu, což by mohlo vést k prasknutí fotovoltaického panelu. Aby se tomuto předešlo, využívají se ve fotovoltaických panelech překlenovací polovodičové diody připojené antiparalelně k fotovoltaickým článkům, čímž kompenzují zastínění článků. V praxi se běžně u panelů z krystalického křemíku nezapojuje překlenovací dioda přes každý článek, ale přes celou skupinu článků. Překlenovací diody současně snižují vliv částečného zastínění fotovoltaického panelu, avšak výstupní výkon panelu při zastínění klesá. Za normálního provozu přes překlenovací diody neteče proud, a tedy na nich nevznikají ztráty. Následující obrázek znázorňuje sériové zapojení fotovoltaických článků uvnitř fotovoltaického panelu. Překlenovací diody jsou zapojeny antiparalelně přes každých 32 fotovoltaických článků, celkem je v tomto případě článků 96 (viz obr. 1.20).



Obr. 1.20 Elektrické zapojení fotovoltaického panelu Sunpower

1.5.7 Tenkovrstvé solární články

Vzhledem k tomu, že k výrobě krystalických fotovoltaických článků je třeba velké množství polovodičového materiálu, jsou odlišnými výrobními metodami produkovány tenkovrstvé články. Tenkovrstvé články dosahují tloušťky v řádu tisícín milimetru oproti krystalickým solárním článkům o tloušťce v řádu desetín milimetru. Namísto krystalického křemíku jsou použity jiné materiály jako amorfni křemík (a-Si), telurid kadmia (CdTe) či diselenid mědi a india (CIS).

Základem tenkovrstvých solárních článků je substrát obvykle vyrobený ze skla. Pro dosažení flexibilních vlastností článku se pro výrobu substrátu namísto skla používá plast. Tenká vrstva transparentního vodivého oxidu TCO (Transparent Conductive Oxide) je nanášena na substrát, kde je poté pomocí mikro-frézky nebo laseru rozdělena na jednotlivé pásy. Ty pak představují samotné články fotovoltaického panelu. Stejně jako u krystalických článků, jsou tyto články spojovány do série pro zvýšení výstupního napětí panelu. Vizually lze snadno rozlišit tenkovrstvé panely od krystalických právě díky dlouhým pásům TCO.

Technikou sítotisku je poté nanášen materiál kontaktu (například hliník) na zadní stranu článku. Vrstva polymeru na zadní straně tenkovrstvého fotovoltaického panelu slouží k ochraně článků před vlhkostí.

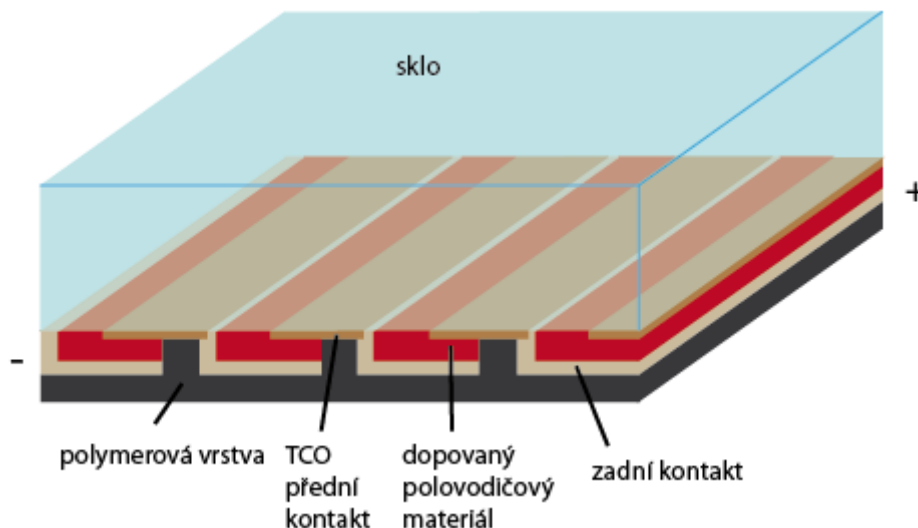


Obr. 1.21 Zleva: CIS solární články, články z amorfniho křemíku, CdTe solární články [11]

Účinnost komerčně dostupných tenkovrstvých solárních panelů je v současnosti podstatně nižší (dle materiálu mezi 9 – 15 %) než krystalických fotovoltaických panelů a pro dosažení stejného elektrického výkonu je zapotřebí větší plochy osazené tenkovrstvými články. V případě nízké intenzity záření však tenkovrstvé články vykazují vyšší účinnost než krystalické články. Pořizovací náklady na fotovoltaický panel (z krystalického křemíku či

tenkovrstvý) stejných vnějších rozměrů jsou poměrně vyrovnané.

V dlouhodobém horizontu by však mohly náklady na výrobu tenkovrstvých článků klesnout pod hranici krystalických panelů, neboť je při jejich výrobě nižší spotřeba materiálu (zejména polovodičového materiálu). To by při současném zvýšení účinnosti mohlo přinést tenkovrstvým článkům většinový podíl na poli fotovoltaických článků, patřící nyní krystalickým křemíkovým solárním článkům.



Obr. 1.22 Příčný řez tenkovrstvým fotovoltaickým článkem

1.5.8 Perspektivní technologie výroby solárních článků

Díky konkurenci v sektoru solárních článků dochází neustále ke snižování cen článků a vývoji nových technologií výroby fotovoltaických článků s vyšší hodnotou účinnosti článků, vyšší ohebností, vyšší transparentností či nižší teplotní závislostí výstupního výkonu článku.

Oboustranné fotovoltaické články

Oboustranné (bifaciální) fotovoltaické panely složené z bifaciálních článků z krystalického křemíku vykazují větší zisky z dopadajícího slunečního záření, než panely jednostranné. Technologie výroby je podobná, jako u panelů jednostranných, avšak velikost zadních kontaktů článků byla minimalizována (již nejsou celoplošné) a celou zadní stranu tvoří průhledný laminát. Tím je umožněna přeměna záření dopadající na zadní stranu fotovoltaického panelu s účinností nemnoho nižší, než přední strany panelu. Bifaciální panely na bázi c-Si propouští záření s energií fotonů menší než je šíře zakázaného pásma (záření s vlnovou délkou větší než 1100 nm). Vzhledem k tomu, že toho záření tvoří více než 20 % energie dopadajícího slunečního záření, je úměrně méně energie přeměněno panely na teplo. Oboustranné panely pak pracují, v porovnání s jednostrannými panely, při nižší teplotě, což má za následek nárůst účinnosti přeměny sluneční energie v elektrickou energii. Cena je v současné době téměř na úrovni klasických jednostranných článků a tedy se očekává hojně rozšíření těchto článků.

Vícevrstvé solární články

U klasických jednovrstvých fotovoltaických článků dojde k pouze k částečnému zachycení fotonů záření s vyšší energií, než je šíře zakázaného pásma. A naopak fotony s nižší energií, než je šířka zakázaného pásma, projdou nezachyceny. Princip funkce vícevrstvých solárních článků spočívá ve schopnosti každé z vrstev absorbovat jen určitou část vlnového spektra dopadajícího slunečního záření. Pro toto pásmo vlnových délek má vrstva vysokou účinnost, čímž se maximalizuje využití spektra slunečního záření a účinnost solárního článku.

Tímto způsobem se dá teoreticky při správném naladění šířek jednotlivých pásem využít celé vlnové pásmo solárního záření.

Vícevrstvé solární články se vyrábí nejčastěji z prvků III. a V. skupiny periodické tabulky prvků (například InP, GaAs, GaSb).

Rozměry vícevrstevných článků jsou podstatně menší, než u krystalických křemíkových článků, proto se používají optické koncentrátoři slunečního záření násobící energii slunečního záření (v případě článku CTJ výrobce Emcore se může jednat až o 1 500 násobně koncentrované záření, účinnost takových článků se blíží k 39%). Spolu s koncentrátory slunečního záření jsou obvykle využívány i sledovače Slunce, které slouží k dosažení ideálního úhlu dopadu slunečního záření na plochu koncentrátorů. Výsledná cena vícevrstevných solárních panelů je podstatně vyšší než u jednovrstevných křemíkových článků.

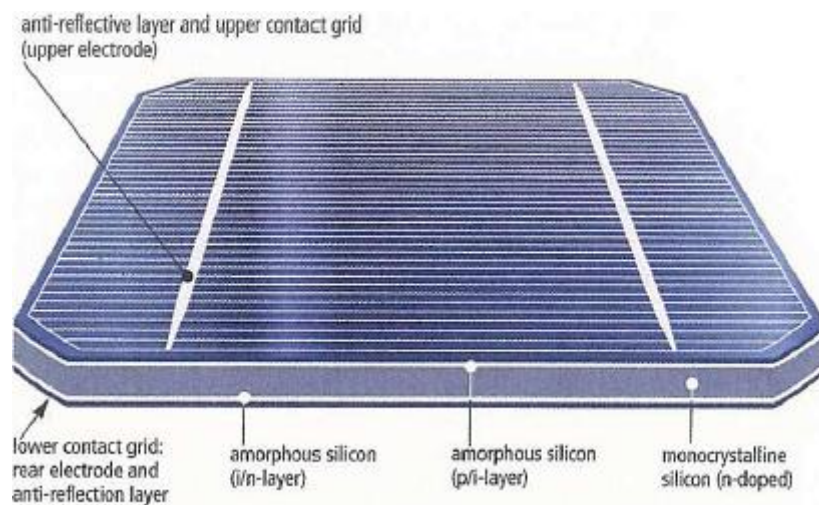
Tab. 1.2 Parametry vícevrstevného solárního článku CTJ pro různé koncentrace záření (tabulka zpracována na základě údajů společnosti Emcore)

Koncentrace záření		1X	503X	1182X
η_{ci}	%	31,4	39,0	36,3
P_{mpp}	W/cm ²	0,0314	19,3	42,9
U_{mpp}	V	2,33	2,84	2,68
I_{mpp}	A	0,0134	6,8	16,04
U_{oc}	V	2,605	3,193	3,251
I_{sc}	A	0,0139	6,96	16,37

Hybridní HIT články

Fotovoltaické články HIT jsou kombinací článků z krystalického křemíku a tenkovrstevných článků. Zkratka HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) odkazuje na strukturu těchto hybridních článků, kde tvoří krystalický a amorfni křemík PN přechod. Touto technologií vyrobené komerčně dostupné fotovoltaické články dosahují v současné době účinnosti až 19 %.

Destička monokrystalického křemíku tvořící jádro HIT článků je z obou stran pokryta tenkou vrstvou amorfniho křemíku (a-Si). Mezi nimi je extrémně tenká nedopovaná vrstva (typu I) amorfniho křemíku, která spojuje destičku krystalického křemíku s vrstvami amorfniho křemíku. Na přední straně článku se nachází vrstva amorfniho křemíku (typu P) a spolu s destičkou krystalického křemíku (typu N) tvoří PN přechod. Zatímco v konvenčních křemíkových fotovoltaických člancích se využívá za účelem vytvoření PN přechodu stejný polovodičový materiál, který je však rozdílně dotován, u HIT článků se používají ke stejnému účelu dva strukturálně rozdílné polovodiče (odtud pojem „heterojunction“ v názvu článků). Amorfni vrstva P/I a krystalický křemík (typu N) tvoří vazbu PIN. Zadní vrstvu články tvoří silně dotovaný amorfni křemík (typu N), který brání rekombinaci volných nosičů na zadní elektrodě.

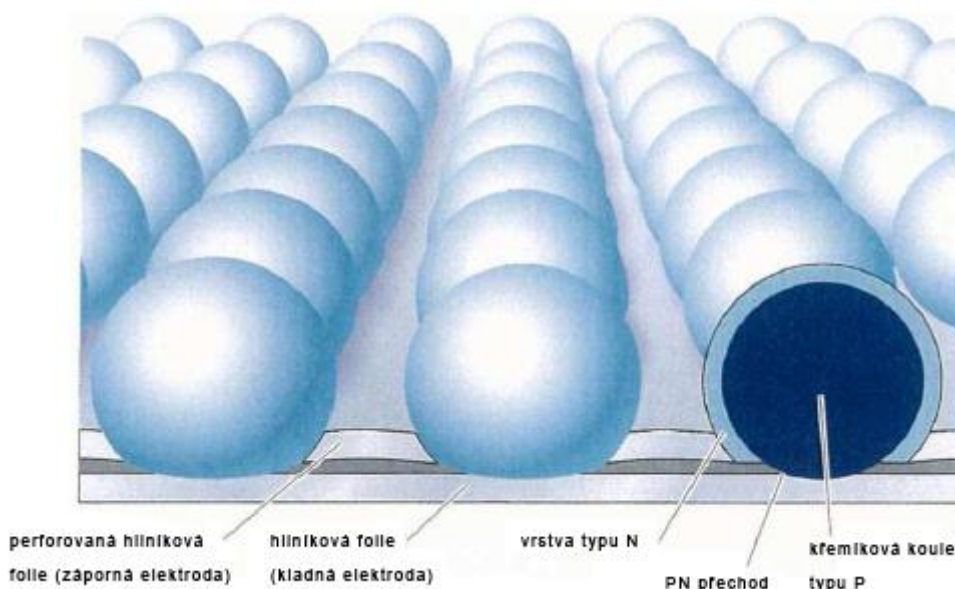


Obr. 1.23 Struktura hybridního HIT článku [11]

Ve srovnání s fotovoltaickými panely z krystalického křemíku dosahují HIT články lepší účinnosti při vyšších teplotách a využívají širšího spektra slunečního záření. Zvýšení teploty o každý stupeň Celsia znamená pokles elektrického výkonu článku jen o 0,33 %, ve srovnání s 0,4 % u článku z krystalického křemíku, což se projevuje uspořeným výkonem zvláště při vysokých teplotách. Teplota, které jsou křemíkové destičky při výrobě vystaveny, je pouze 200 °C, díky čemuž je možné používat destičky křemíku o malé tloušťce. Tím HIT solární články šetří energii a materiál při výrobě článků.

Panely na bázi monokrystalických křemíkových kuliček

Sférické křemíkové fotovoltaické články byly vyvinuty již počátkem devadesátých let, ale s komerční výrobou přišla až roku 2004 kanadská firma Spheral Solar Power. Jednotlivé kuličky křemíku o průměru 0,6 mm mají pod povrchem sférický přechod PN (uvnitř kuličky je typ P a povrch kuličky, který může být antireflexně upraven, je tvořen typem N), jak zobrazuje obrázek 1.24.



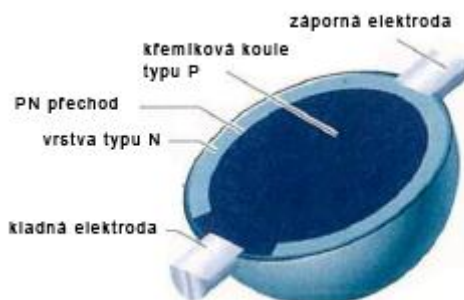
Obr. 1.24 Struktura sférického článku firmy Spheral Solar Power [11]

Fotovoltaický článek se skládá ze dvou hliníkových folií, které jsou izolovány tenkou plastovou vrstvou. V horní folii jsou díry o průměru menším, než je průměr kuliček. Horní hliníková folie spojuje N povrchy kuliček a zároveň je mechanicky upevňuje. Spodní část povrchu kuličky je vyleptána, čímž je obnaženo jádro kuličky typu P, které je elektricky spojeno s dolní hliníkovou folií. Díky jejich kulovitému PN přechodu mohou solární články na bázi kuliček optimálně zachytit i šikmo dopadající záření a lépe tak zužitkovat difúzní záření, než ploché či tenkovrstvé panely. Tato technologie výroby sférických článků umožňuje produkci flexibilních a transparentních solárních panelů vhodných k mobilnímu použití, k aplikacím na střechy vozidel či na rovnou i vlnitou střešní krytinu budov. Výhodou je relativně jednoduchý výrobní postup a nízká spotřeba křemíku (až sedmkrát nižší, než u krystalických křemíkových článků).



Obr. 1.25 Prototypy flexibilních sférických fotovoltaických modulů [11]

Sférické křemíkové články vyvíjí i japonská firma Kyosemi. Zde jsou použity kuličky o průměru 1 – 1,2 mm, na něž doléhají dvě hliníkové či stříbrné elektrody. Jedna z elektrod (negativní) je umístěna v povrchu kuličky typu N a druhá elektroda (pozitivní) sahá do jádra kuličky typu P, jak znázorňuje obrázek 1.26.



Obr. 1.26 Struktura sférického článku firmy Kyosemi [11]

Jednotlivé kuličky jsou spojeny měděným vodičem do série či paralelně. Kuličky zalité transparentní syntetickou pryskyřicí tvoří modul, jehož spodní strana vyrobená z bílé syntetické pryskyřice odráží zpět sluneční záření dopadající na prostor mezi kuličkami.

Předností těchto článků je jejich částečná transparentnost (20 – 80 %) avšak poměrně nízký výstupní výkon na jednotku plochy. Z toho důvodu jsou jako zdroj energie pro zamýšlené solárně napájené železniční vozidlo nevhodné.

1.5.9 Srovnání vybraných typů fotovoltaických článků

Vybrané fotovoltaické panely vyráběné odlišnými technologiemi uvádí následující tabulka. Jedná se o modely představující vrchol nabídky daných výrobců, které jsou určeny pro komerční sféru, byť ceny mnohdy výrobci neuvádí.

Tab. 1.3 Porovnání parametrů vybraných fotovoltaických panelů na základě zkoušek při STC (tabulka zpracována na základě údajů společností Sunpower, Yingli Solar, Emcore, Sanyo a First Solar)

	Výrobce		Sunpower	Yingli Solar	Emcore	Sanyo	First Solar
	Označení		E19 / 320	YL 235 P-29b	CTJ Concent. 1x	HIT-H250	FS-385
	Technologie		Monokrystalický křemík	Polykrystalický křemík	Vícepřechodový článek	Hybridní články	Tenkvrstvé články
	P_{mpp}	W	320	235	0,0314	250	85
	P/m^2_{panelu}	W/m ²	196,32	143,86	46,59	180	118,06
	$\eta_{článku}$	%	N	N	31,4	20,8	N
	η_{panelu}	%	19,6	14,39	4,658	18	11,81
	U_{mpp}	V	54,7	29,5	2,33	34,9	48,5
	I_{mpp}	A	5,86	7,97	0,0134	7,18	1,76
	U_{oc}	V	64,8	37	2,605	43,1	61
	I_{sc}	A	6,24	8,54	0,01385	7,74	1,98
	U_{max_s}	V	600	1000	N	1000	1000
	I_{mocr}	A	15	N	N	15	N
	NOCT **	°C	45 +/- 2	46 +/- 2	N	44	45
Teplotní koeficienty	P_{mpp}	%/°C	-0,38	-0,45	-0,06	-0,3	-0,25
	U_{oc}	mV/°C	-176,6	-109,15	-4	-108	-164,7
	I_{sc}	mA/°C	3,5	4,78	7,2	2,32	0,792
Mechanická data	S_{panelu}	m ²	1,63	1,63	0,00	1,39	0,72
	$\eta_{článků}$	-	96	60	1	64	154
	Rozměry článku	cm	N	15,6x15,6	1x1	d = 16,6	N
	Cena	EUR/W	N	1,44	N	2,348	N

Legenda:

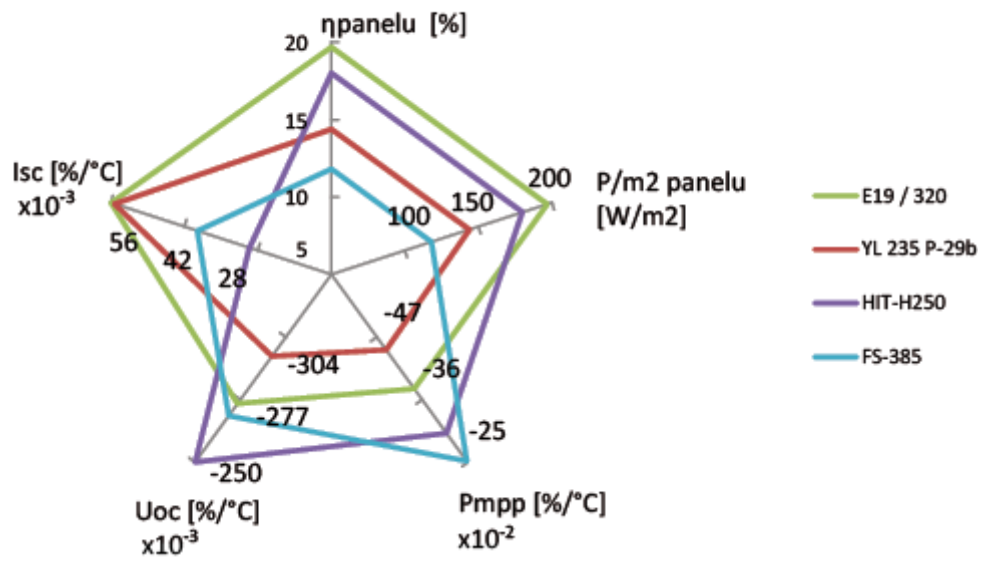
N - údaj výrobce neuvádí

* - platí pro použití koncentrátoru slunečního záření o 800 násobné koncentraci

** - Nominal Operating Cell Temperature

Na základě klíčových parametrů daných fotovoltaických panelů bylo vytvořeno grafické porovnání těchto panelů (vyjma více přechodového článku Emcore, který je svými netypickými parametry těžko srovnatelný s ostatními panely). Z grafu je patrná vysoká teplotní závislost parametrů fotovoltaických článků na bázi krystalického křemíku (monokrystalické a polykrystalické články) a naopak velmi dobré vlastnosti v tomto směru jsou zřejmé u tenkvrstevných článků.

Porovnání parametrů vybraných FV panelů



Graf. 1.8 Grafické porovnání parametrů vybraných fotovoltaických panelů

2 Energetická náročnost vlakové dopravy a její minimalizace

Z ekologického hlediska je otázka energetické náročnosti dopravy významná z důvodu omezených zásob neobnovitelných zdrojů energie. Železniční doprava využívá jak diesellový pohon, tak pohon elektrický (na rozdíl od letecké a ve většině případů i silniční dopravy). Výroba elektrické energie pro elektrickou trakci je v ČR založena převážně na hnědém uhlí (téměř 50 % produkce), dále na jaderné energii (třetina vyrobené elektřiny). Z environmentálního hlediska je významná i vodní a solární energie, ale jejich podíl není velký. Podstatný rozdíl je mezi měrnou energetickou náročností individuální osobní silniční dopravy a dopravou hromadnou (železniční či silniční). Začleňování železniční dopravy do kombinovaného způsobu dopravy je z pohledu životního prostředí efektivní zejména v případě vysoké hustoty dopravy. Z tohoto hlediska může být ekonomicky i ekologicky výhodnější provozování upřednostnění železniční dopravy před leteckou a to zejména na středně dlouhých vzdálenostech s dostatečnou hustotou provozu.

Kritériem energetických náročností jak železniční, tak i silniční dopravy bývá volena trakční síla na obvodu hnacích kol, které je úměrná spotřeba energie - trakční práce. Trakční práci lze definovat jako:

$$A_t = \int F_o \, dl = F_o \cdot L \quad [J] \quad (2.1)$$

kde:

F_o = tažná síla na obvodu kol [N]

L = délky dráhy, kterou vozidlo urazilo [m].

Trakční práce při jízdě vozidla rovnoměrnou rychlostí po rovné přímé trati:

$$A_t = F_o \cdot L = p_o \cdot m \cdot g \cdot L \quad [J] \quad (2.2)$$

kde:

p_o = měrný vozidlový odpor [N/kN],

m = hmotnost vozidla [t],

g = gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$].

Trakční výkon je možné (na základě znalosti tažné síly na obvodu kol a rychlosti vozidla) určit jako:

$$P_t = \frac{F_o \cdot v}{3,6} \quad [kW] \quad (2.3)$$

kde:

F_o = tažná síla na obvodu kol [kN],

v = rychlost vozidla [km/h].

Velkou výhodou železniční dopravy je oproti silniční dopravě nízký odpor valení. U železnice se hodnota odporu valení obvykle pohybuje pro širokopatní kolejnice okolo 1 % a pro žlábkové kolejnice je jeho velikost zhruba 2 %. To jsou podstatně nižší hodnoty než u silniční dopravy, kde se hodnota odporu valení pohybuje od 8 N/kN, pro asfaltový povrch, až po 20 N/kN, pro kamenné dlažební kostky. Dalším pozitivem železnice je schopnost vytvářet vlak, kdy skupina vozů řazených za sebou překonává aerodynamický odpor společně, na rozdíl od silniční dopravy, kde každý vůz musí překonávat aerodynamický odpor samostatně. Odpor valení, odpor z tření v ložiskách a aerodynamický odpor tvoří společně tzv. vozidlový

odpor, který je popsán dále.

Energetická náročnost železniční dopravy je (při stejné hmotnosti přepravovaného zboží) oproti silniční dopravě výrazně nižší, a to zejména díky příznivějším hodnotám vozidlového a traťového odporu, kterými se tato kapitola zabývá.

2.1 Analýza jízdních odporů a početní určení trakčních vlastností železničních vozidel

V předchozí kapitole byla vypočítána energie slunečního záření dopadajícího na osluněnou plochu pro vybrané lokality. Přestože je v brazilském Alto Horizonte relativně velká energie dopadajícího záření, pro dobrou dynamiku jízdy vozidla je třeba krom výkonu záření (a tedy i dodávaného elektrického výkonu fotovoltaických panelů) brát v potaz síly působící proti pohybu vozidla po koleji - takzvané jízdní odpory, které jsou popsány v této kapitole. Jízdní odpory je žádoucí minimalizovat obzvláště v případě solárními články poháněného vozidla, které disponuje jen velmi omezeným trakčním výkonem. Díky němu je rychlost vozidla velmi limitována, což vozidlo předurčuje k dopravě čistě nákladního charakteru, kde je dosahovaná nižší rychlost vozidla akceptovatelná. Zmenšení velikosti jízdních odporů je možné jak technicky, tak volbou vhodné oblasti k provozu tratě.

2.2 Charakteristika jízdních odporů

Jízdní odpory se dělí na odpory:

- vozidlové,
- traťové.

2.2.1 Vozidlové odpory

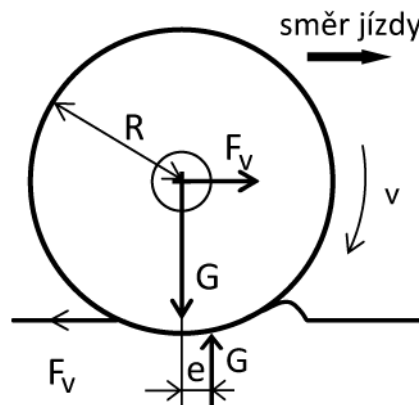
Jedná se o odpory závislé na konstrukci a stavbě vozidla. Vznik vozidlových odporů je zapříčiněn třením v místě styku kola s kolejnicí, třením v ložiskách kol a působením odporu prostředí na vozidlo. Vozidlové odpory je možné dělit:

- odpor valení - valivé tření mezi kolem a kolejnicí,
- odpor z tření v ložiskách - tření v ložiskách dvojkolí,
- aerodynamický odpor - odpor vzduchu.

Dále se mezi vozidlové odpory řadí tzv. přídatný odpor, vznikající kmitáním vypružení vozidla vlivem nerovností tratě.

Odpor valení

Kolo i kolejnice jsou z pružného materiálu (v případě kola je materiál tvrdší, než u kolejnice), který se, vlivem tíhy působící na obojí, deformuje. Zjednodušený model vypadá tak, že kolo je dokonale tuhé a k deformaci dochází jen u kolejnice. Ta se vlivem síly působící na kolo deformuje a kolo pak před sebou při jízdě tlačí „vlnu“ vznikající na kolejnici (obr. 2.1).



Obr. 2.1 Podstata vzniku odporu valení

Odpor valení závisí na materiálu obručí kol, na materiálu kolejnic, na tíhové síle působící na kolo, technickém stavu trati a naopak je nezávislý na rychlosti vozidla. Velikost odporu valení lze definovat jako:

$$F_v = G \cdot \frac{e}{R} \quad [N] \quad (2.4)$$

kde:

G = tíhová síla vozidla [N],

e = excentricita [m],

R = poloměr kola vozidla [m].

Měrný odpor valení je definován jako podíl síly F_v a tíhy vozidla:

$$p_v = \frac{F_v}{m \cdot g} = \frac{G \cdot \frac{e}{R}}{m \cdot g} = \frac{e}{R} \quad [N/kN] \quad (2.5)$$

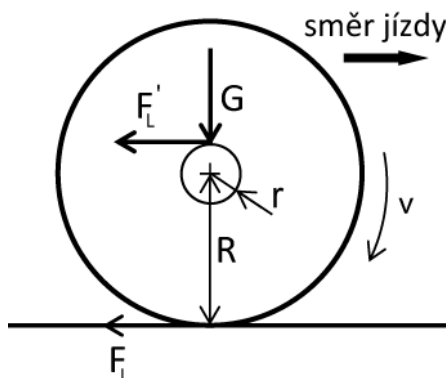
kde:

m = hmotnost vozidla [kg],

g = gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$].

Odpor z tření v ložiskách

Odpor z tření v ložiskách závisí na konstrukci a materiálu ložiska, kvalitě maziva a druhu oleje, teplotě ložiska, otáčivé rychlosti ložiska, na zatížení ložiska, jeho opotřebení a dalších faktorech. Na obrázku 2.2 je schéma působení síly na jedno kolo vozidla.



Obr. 2.2 Podstata vzniku odporu z tření v ložiskách

Z rovnováhy momentů ke středu kola lze definovat velikost síly potřebné k překonání odporu ložiska kola jako:

$$F_L = F_L' \cdot \frac{r}{R} = \frac{r}{R} \cdot f_L \cdot G \quad [\text{N}] \quad (2.6)$$

kde:

f_L = součinitel tření v čepu,

r = poloměr čepu.

Měrný odpor z tření v ložiskách je možné vyjádřit:

$$p_L = \frac{F_L}{m \cdot g} = \frac{r}{R} \cdot f_L \quad [\text{N/kN}] \quad (2.7)$$

Ložiska kluzná vykazují vyšší odpor z tření než valivá ložiska a to zejména při rozjezdu. Valivá ložiska jsou energeticky úspěšnější, odpor z tření je sedmkrát nižší než u ložisek kluzných a zároveň jsou nenáročné na údržbu. Z těchto důvodů jsou v současnosti nejvyužívanější.

Aerodynamický odpor

Aerodynamický odpor je vyvolán působením vzduchu na vozidlo. Důležitou roli hraje zejména ve vyšších rychlostech, neboť roste s kvadrátem rychlosti vozidla. Odpor vzduchu je však výrazný i při nižších rychlostech (60 – 80 km/h) a to obzvláště u krátkých lehkých vozidel, neboť je nepřímo úměrný hmotnosti vozidla. Aerodynamický odpor je úměrný čelní ploše vozidla a dynamickému tlaku vzduchu:

$$F_{ae} = p_{dyn} \cdot C_x \cdot S = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_x \cdot S \quad [\text{N}] \quad (2.8)$$

kde:

p_{dyn} = dynamický tlak vzduchu,

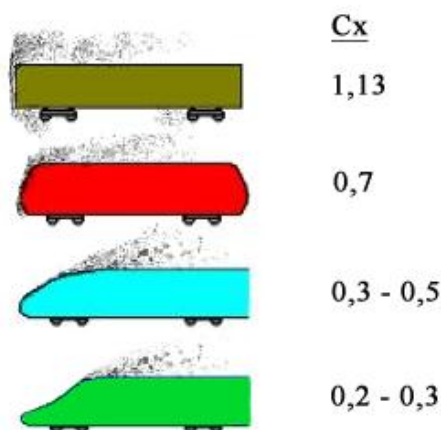
C_x = součinitel tvaru vozidla [-],

S = plocha čela vozidla [m^2],

ρ = měrná hmotnost vzduchu (cca. $1,2 \text{ kg/m}^3$),

v = okamžitá rychlost vozidla [m/s].

Ze vztahu je patrné, že pro snížení aerodynamického odporu je třeba navrhovat tvar vozidel tak, aby se minimalizovala hodnota součinitele C_x a vozidla tak kladla vzduchu co možná nejmenší odpor, jak ilustruje obr. 2.3. Kromě vhodného tvaru předního a zadního čela vlakové soupravy aerodynamiku vlaku také příznivě ovlivňují mezi vozové přechody, hladký povrch bočnic a střechy a zakrytí mechanických částí na spodku vozu.



Obr. 2.3 Příklady vlivu tvaru skříně na hodnotu součinitele tvaru čela [21]

Polynom vozidlového odporu

Určení vozidlového odporu jako algebraického součtu odporu valení, odporu tření v ložiskách, aerodynamického odporu i odporu z tunelu by bylo značně pracné a vyžadovalo by praktické ověření. Z toho důvodu se při určování vozidlového odporu se využívají empirické vztahy zjištěné měření. Jako nejvýhodnější matematický model vozidlového odporu se v praxi ukázal polynom druhého stupně, jehož obecný tvar je:

$$F_o = A + B \cdot v + C \cdot v^2 \quad [kN] - \text{vozidlový odpor}, \quad (2.9)$$

$$p_o = a + b \cdot v + c \cdot v^2 \quad [N/kN] - \text{měrný vozidlový odpor pro otevřenou trať}, \quad (2.10)$$

$$p_{oT} = a + b \cdot v + k_T \cdot c \cdot v^2 \quad [N/kN] - \text{měrný vozidlový odpor pro tunel}, \quad (2.11)$$

kde:

a = absolutní člen polynomu, tvořený odporem z valení a odporem z tření v ložiskách. Jeho velikost se pohybuje okolo 1 ‰ pro širokopatní kolejnice, pro žlábkové kolejnice je hodnota cca. 2 ‰.

b = lineární člen polynomu, jedná se o tzv. přídavný odpor vznikající jízdou vozidla po nerovné trati, čímž dochází, díky vypružení vozu, ke kmitání vozidla a zvýšené spotřebě energie. Lineární složka polynomu je velikostně poměrně malá a je možné ji zanedbat.

c = kvadratický člen polynomu, představuje jej aerodynamický odpor rostoucí s kvadrátem okamžité rychlosti vozidla. Fyzikálně nezávisí kvadratický člen, na rozdíl od absolutního a lineárního členu, na hmotnosti vozidla – tzv. paradox kvadratického členu.

k_T = tunelový faktor, jeho hodnota je pro široké tunely rovna 2, pro úzké tunely je v rozmezí 3 – 4,

v = okamžitá rychlost vozidla [km/h] [14, 15, 22].

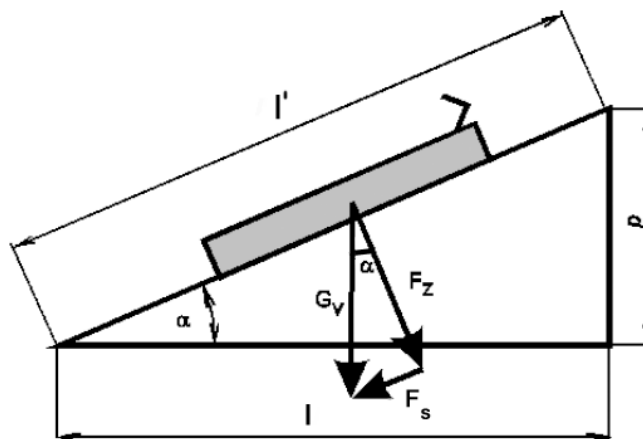
2.2.2 Traťové odpory

Traťové odpory, značené p_T , jsou odpory proti pohybu vozidla dané stavbou tratě a jejím stavem. Působí na vozidlo při jízdě do stoupání, jízdě obloukem a tunelem. Na velikost traťových odporů působí též hmotnost a délka vlakové soupravy. Mezi traťové odpory patří:

- odpor ze sklonu,
- odpor z oblouku.

Odpor ze sklonu

Pohybuje-li se vozidlo na trati svírající s vodorovnou rovinou úhel α , pak se tíha G_v rozkládá na dvě složky: sílu F_z , kolmou na rovinu koleje a sílu F_s , jenž je rovnoběžná s osou koleje dle obr. 2.4. Pokud vlak překonává převýšení, působí F_s proti směru jízdy, v případě jízdy po spádu působí ve směru pohybu.



Obr. 2.4 Jízda do stoupání [14]

Sílu F_s je možné vyjádřit:

$$F_s = G_v \cdot \sin \alpha = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [\text{N}], \quad (2.12)$$

přičemž odpor ze sklonu p_s je dán poměrem této síly k tíze vozidla:

$$p_s = \frac{F_s}{m \cdot g} = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha}{m \cdot g} = \sin \alpha = \frac{p}{l'} \cong \text{tg } \alpha = \frac{p}{l} = s \quad [\text{‰}], \quad (2.13)$$

kde:

G_v = tíha vozidla [N],

m = hmotnost vozidla [kg],

g = gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

s = sklon tratě [‰].

Odpor z oblouku

Při průjezdu vozidla obloukem dochází - v důsledku nestejných délek kolejnic, pevného rozvoru dvojkolí, odstředivé a dostředivé síly v oblouku - ke zvýšení třecí síly mezi koly a kolejnicí, která se projevuje jako zvýšený odpor, tzv. odpor z oblouku p_r . Odpor z oblouku je pro vozební výpočty vyjadřován empiricky dle vztahů:

- vztah pro hlavní tratě s rozchodem 1435 mm, $R > 150$ m:

$$p_r = \frac{650}{R - 50} \quad [\text{‰}], \quad (2.14)$$

- vztah pro vedlejší tratě s rozchodem 1435 mm:

$$p_r = \frac{500}{R - 30} \quad [\text{‰}], \quad (2.15)$$

kde:

R = poloměr oblouku [m].

Redukovaný sklon

Pro usnadnění výpočtů se traťový profil tzv. zjednodušuje a redukuje. Odpor z oblouku a odpor ze stoupání jsou zahrnuty do tzv. redukovaného sklonu tak, že se započítává přídatný sklon z oblouku ke skutečnému sklonu tratě dle vztahu 2.13 a jsou při tom dodržována stanovená pravidla slučování.

$$s_{rj} = \frac{\sum_k s_k \cdot l_k + \sum_m s_{obl_m} \cdot l_{obl_m}}{\sum_k l_k} \quad [\%], \quad (2.16)$$

kde:

s_{rj} = redukovaný sklon tratě [%],

s, s_{obl} = sklon sklonového úseku, oblouku [%],

l, l_{obl} = délka sklonového úseku, oblouku [m],

k = k-tý oblouk ve zjednodušovaném úseku,

m = m-tý oblouk ve zjednodušovaném úseku.

2.2.3 Tažná síla na obvodu kol

Určení tažné síly na obvodu kol vychází z dynamické rovnováhy sil:

$$F_o = G_L \cdot p_L + G_D \cdot p_D + (G_L + G_D) \cdot p_T + (G_L + G_D) \cdot \frac{(1 + \rho) \cdot a}{g} \quad [N] \quad (2.17)$$

kde:

G_L = tíha hnacích vozidel [kN],

G_D = tíha tažených vozidel [kN],

p_L = součinitel vozidlového odporu hnacích vozidel [N/kN],

p_D = součinitel vozidlového odporu tažených vozidel [N/kN],

p_T = součinitel odporu trati [N/kN],

ρ = součinitel rotujících hmot [-],

a = zrychlení vozidel [$m \cdot s^{-2}$],

g = gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$].

2.3 Trakční výpočty

2.3.1 Elektrický výkon fotovoltaického zdroje

Elektrický výkon fotovoltaických zdroje umístěného na střeše vozidla se vyjádří jako:

$$P_d = E \cdot S \cdot \eta_{fp} \cdot k_o \quad [W] \quad (2.18)$$

kde:

E = intenzita celkového záření dopadajícího na osluněnou plochu [$W \cdot m^{-2}$],

S = plocha fotovoltaických článků na střeše vozidla [m^2],

η_{fp} = účinnost fotovoltaického panelu [-], při výpočtech uvažována hodnota 19,6 %,

k_o = koeficient optických vlastností fotovoltaického panelu [-]. Je uvažováno pravidelné

čištění fotovoltaických panelů za účelem maximalizace zisku energie ze Slunce.

Elektrický výkon dodávaný v daném okamžiku fotovoltaickými panely na střeše vozidla tedy závisí na aktuální intenzitě slunečního záření, úhlu dopadu tohoto záření na osluněnou plochu (γ), na ploše fotovoltaických panelů na střeše vozu a na účinnosti a čistotě panelů. Účinnost vhodných komerčně dostupných fotovoltaických panelů při současném stavu techniky dosahuje až 19,6 % (monokrystalické panely Sunpower E19 / 320). Tato hodnota bude v dalších výpočtech uvažována.

Úhel dopadu slunečního záření

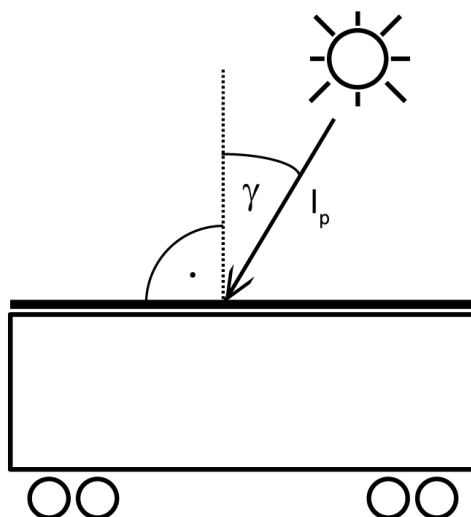
S úhlem dopadu slunečního záření - odklonem slunečních paprsků od normály osluněné plochy - se mění velikost intenzity přímého slunečního záření dopadajícího na osluněnou plochu dle závislosti:

$$E_p = E_{pn} \cos \gamma \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.19)$$

kde:

E_{pn} = intenzita přímého záření dopadajícího na zemský povrch na plochu kolmou ke směru paprsků [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

γ = úhel dopadu slunečního záření na osluněnou plochu [$^\circ$].



Obr. 2.5 Úhel dopadu slunečního záření na osluněnou plochu

Pro získání optimálního úhlu dopadu záření je proto vhodné solární panely během dne natáčet. K tomuto účelu slouží tzv. sledovače Slunce, které automaticky v průběhu dne upravují polohu fotovoltaických panelů. Jiným možným přístupem je trvalé natočení fotovoltaických panelů na jih - pro severní polokouli (na sever - pro jižní polokouli). Díky náklonu zemské osy obdrží osluněná plocha orientovaná tímto směrem vyšší energii dopadajícího záření než v případě umístění fotovoltaických panelů do např. vodorovné polohy.

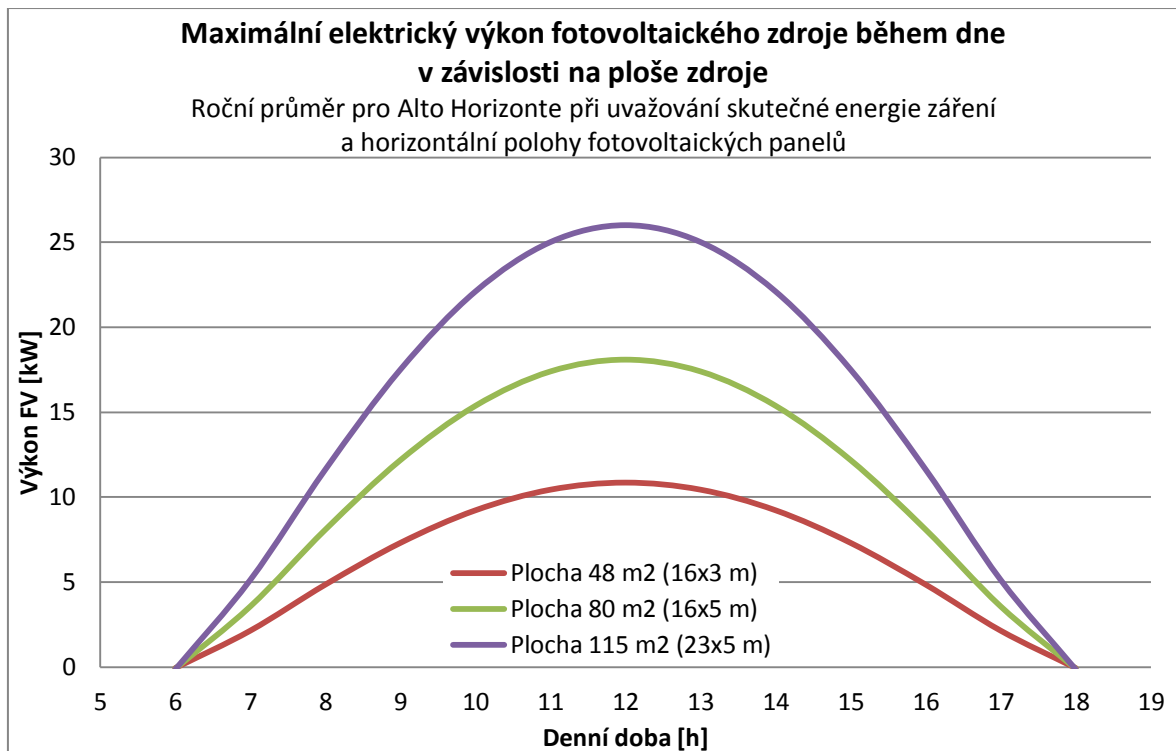
Vzhledem ke skutečnosti, že oba z výše uvedených způsobů instalace fotovoltaických panelů by přinesly značné zvýšení aerodynamického odporu solárního vozidla, bylo zvoleno uložení panelů na střechu železničního vozu v horizontální poloze.

Plocha fotovoltaických panelů

Fotovoltaický zdroj by měl z hlediska velikosti transformované energie zaujímat co největší plochu. Toho lze v případě železničního vozidla docílit:

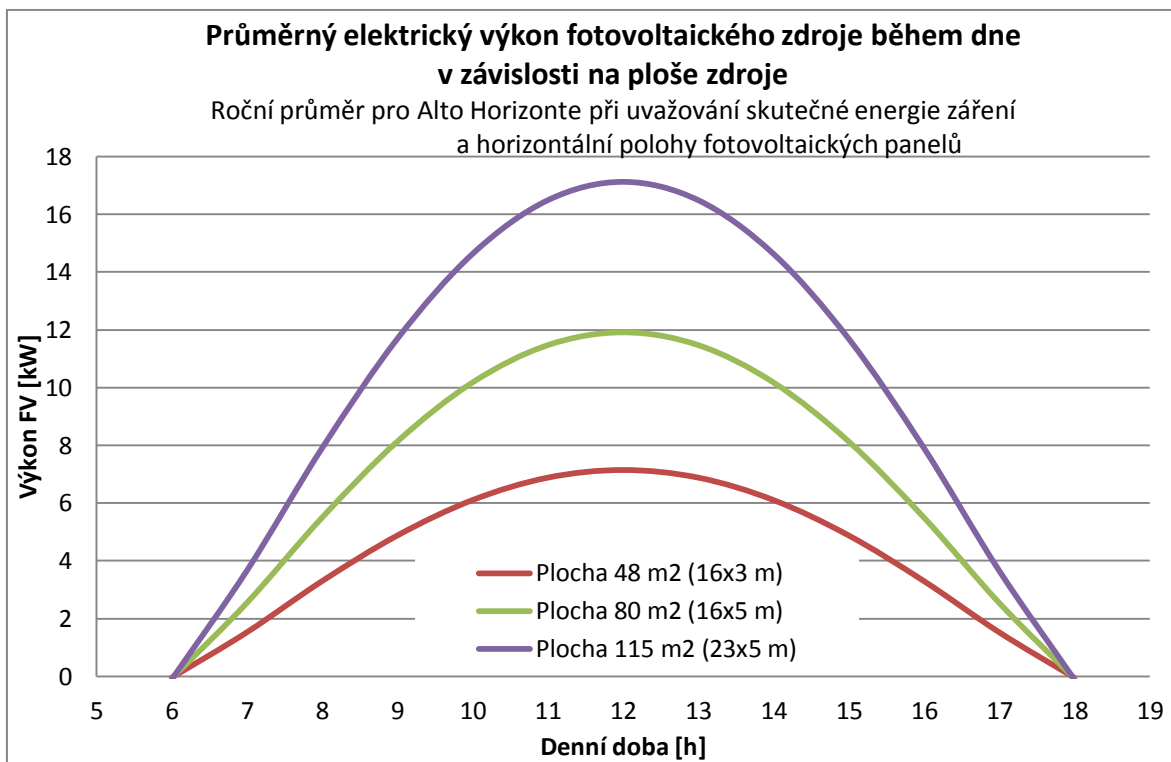
- panely přesahujícími boční hrany vozu (šířka například 5 metrů namísto standardních 3 metrů, pokud to dovoluje průjezdný profil),
- připojením lehkých plošinových vozů s FV panely, sloužících jako energetické tendry,
- použitím vozů o větší délce (například 23 metrů namísto délky 16 metrů), byť by to znamenalo využití menšího gradientu hmotnosti (vhodné pro převoz materiálu s nižší měrnou hmotností).

Fotovoltaickými panely přímo napájený železniční vůz má největší okamžitý trakční výkon v situaci, kdy je bezoblačná obloha. Následující graf zobrazuje průběh maximálního elektrického výkonu fotovoltaických panelů během dne (při uvažování bezoblačné oblohy) v závislosti na ploše solárních panelů umístěných na střeše vozidla.



Graf. 2.1 Okamžitý elektrický výkon fotovoltaického zdroje při uvažování teoretické energie záření

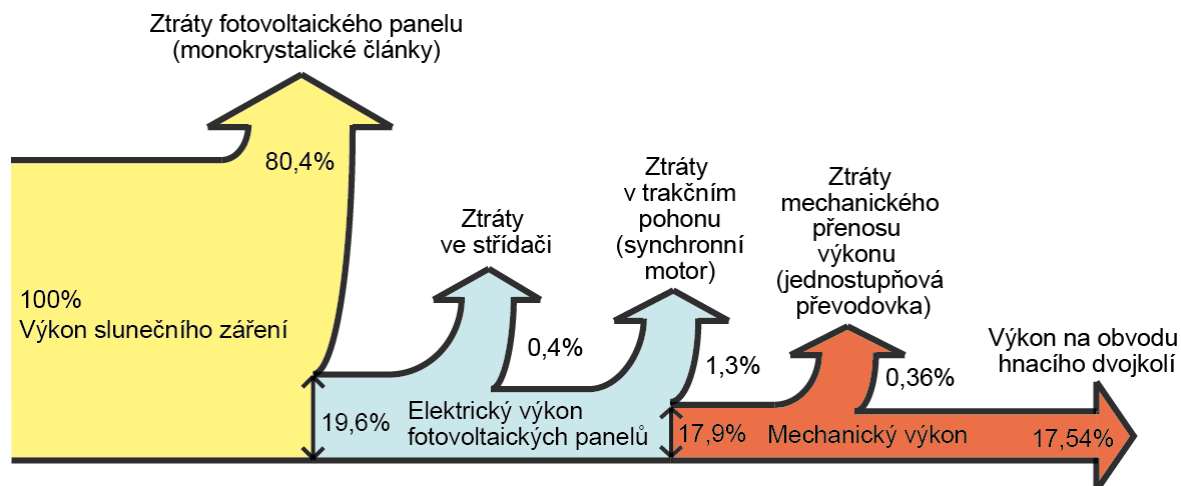
Pokud by byla uvažována typická poměrná doba slunečního svitu $\bar{\tau} = \frac{\tau_{skut}}{\tau_{teor}}$ pro danou oblast, vypadal by průměrný elektrický výkon fotovoltaického zdroje v závislosti na ploše solárních panelů následovně (graf 2.2). Jedná se však o hodnoty průměrné, vzniklé uvažováním střídání oblačných a bezoblačných fází oblohy. Okamžitý výkon solárních panelů a tím i trakční výkon ve skutečnosti závisí na okamžité intenzitě slunečního záření, nikoliv na její průměrné hodnotě.



Graf. 2.2 Průměrný elektrický výkon fotovoltaického zdroje při uvažování skutečné energie záření

2.3.2 Trakční výkon a jízdní odpor vozidla

Trakční výkon na obvodu kol solárního vozidla závisí na elektrickém výkonu fotovoltaického zdroje a na účinnostech jednotlivých prvků přenosu výkonu, jako je napěťový střídač, trakční motor a převodovka (viz následující obrázek).



Obr. 2.6. Ztráty výkonu na slunečním záření poháněném vozidle

Trakční výkon na obvodu kol lze vyjádřit:

$$P_o = E \cdot S \cdot k_o \cdot \eta_{fp} \cdot \eta_{st} \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{př} = P_d \cdot \eta_{st} \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{př} \quad (2.20)$$

kde:

E = intenzita celkového dopadajícího záření [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

S = plocha fotovoltaických článků na střeše vozidla [m^2],

k_o = koeficient optických vlastností fotovoltaických panelů [-],

η_{fp} = účinnost fotovoltaického panelu (uvažována 19,6 %),

η_{st} = účinnost polovodičového střídače (uvažována 98 %),

η_{mot} = účinnost trakčního motoru (uvažována 93 %),

η_{pr} = účinnost mechanického přenosu výkonu na hnací kolo (uvažována 98 %).

Pro porovnání trakčního výkonu na obvodu kol a výkonu nezbytného pro jízdu solárního vlaku je třeba číselně definovat jízdní odpory.

Při výpočtu vozidlového odporu byl uvažován absolutní člen polynomu vozidlového odporu (a) o velikosti 1 ‰ (při uvažování hladkých kol, nezdrsněných litinovými špalíky, a při použití valivých ložisek), lineární člen polynomu byl zanedbán $b = 0$.

Hodnota kvadratického členu polynomu je značně závislá na velikosti součinitele tvaru C_x . Pokud by byl kvadratický člen vyjádřen jen pro samostatný vůz, součinitel C_x by byl roven 1. Z hlediska aerodynamických vlastností je však výhodnější spojovat vozy do soupravy, kdy jsou ostatní vozy za prvním vozem v zákrytu a mají tedy nižší součinitel tvaru C_x a tím i aerodynamický odpor. Hodnota součinitele tvaru vozidla je pro první nákladní vůz v soupravě rovna 0,7, pro mezi vozové přechody je $C_x = 0,2$ a pro poslední vůz v soupravě je C_x roven 0,3. Výsledná hodnota součinitele C_x pro jeden vůz z uvažované soupravy 20 nákladních vozů je tedy rovna 0,24.

Z důvodu nízkého aerodynamického odporu bude pro další výpočty primárně uvažován vůz z modelové vlakové soupravy sestávající se z 20 identických železničních vozů.

Výsledný tvar polynomu vozidlového odporu při uvažování zmíněných hodnot jednotlivých členů polynomu lze zapsat pro jeden vůz ze soupravy:

$$p_o = 1 + 0,000148 \cdot v^2 \quad [N/kN]. \quad (2.21)$$

kde:

v = okamžitá rychlost vozidla [km/h].

V tomto projektu byl kladen důraz na využití solárního vlaku v rovinných oblastech, na tratích pokud možno bez oblouků, a to z důvodu eliminace či alespoň minimalizace odporu z oblouku a stoupání, čímž byl traťový odpor značně snížen.

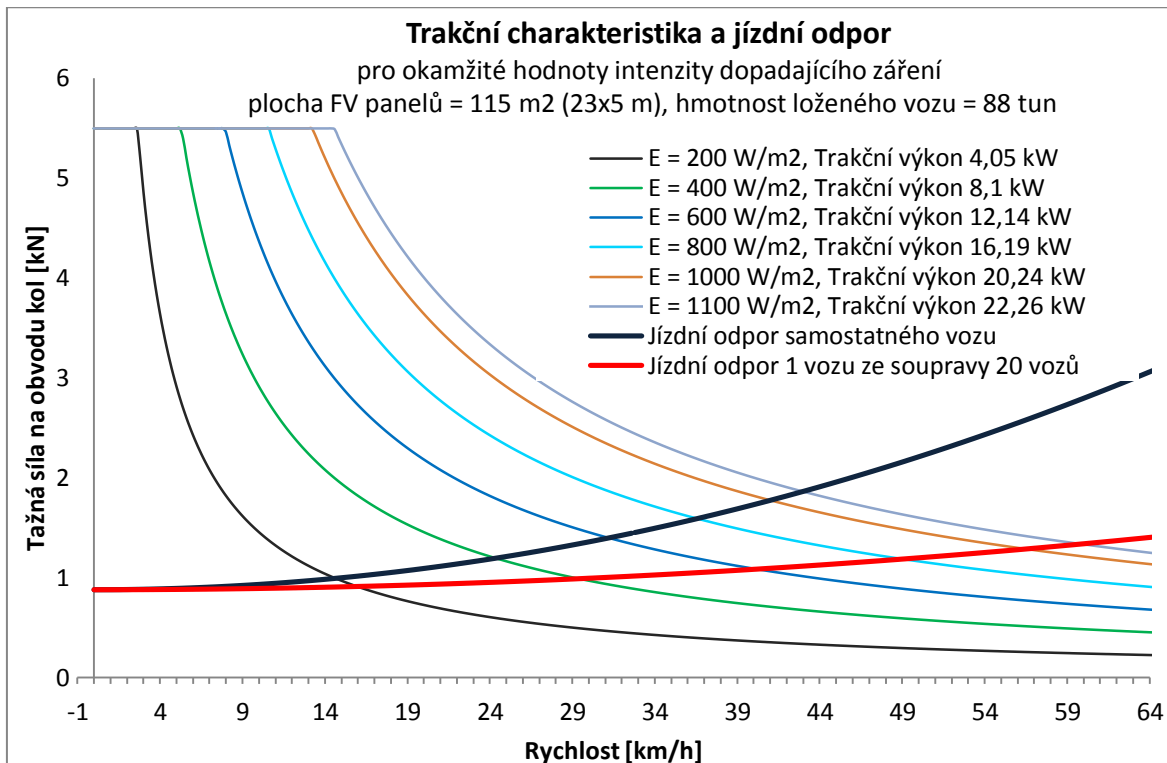
Při výpočtech byl proto uvažován malý či nulový sklon trati ($s = 2 \text{ ‰}$, 1 ‰ , a 0 ‰) a oblouk vyjádřený ve formě redukovaného sklonu tratě ($s_{rj} = 1,458$).

Vzhledem k tomu, že se výkon fotovoltaických panelů v průběhu dne mění, mění se i tažná síla na obvodu kol a tím i maximální rychlost vozidla. Grafy trakčních charakteristik a jízdních odporů uvedené níže udávají velikost rychlosti, kterou je železniční vozidlo schopno vyvinout při daném trakčním výkonu a jízdním odporu sestávajícím se pouze z vozidlového odporu a odporu zrychlení (vzhledem k zamýšlenému provozování vlaku na rovné přímé trati je traťový odpor uvažován o velikosti 0 ‰).

Maximální tažná síla je volena o velikosti 5,5 kN (pro uvažovaný pohon jedné nápravy by při vyšší tažné síle, prázdném vozidle a mokré koleji hrozila ztráta adheze). Velikost trakčního výkonu se mění s plochou fotovoltaického zdroje a intenzitou záření dopadajícího na osluněnou vodorovnou plochu v Alto Horizonte. Intenzita se v následujících výpočtech pohybuje od 200 W/m^2 (v případně jasné oblohy je této intenzity dosahováno cca hodinu po východu Slunce a hodinu před západem Slunce) do $1\,100 \text{ W/m}^2$ (intenzita dopadajícího záření při bezoblačné obloze mezi cca 11. a 13. hodinou).

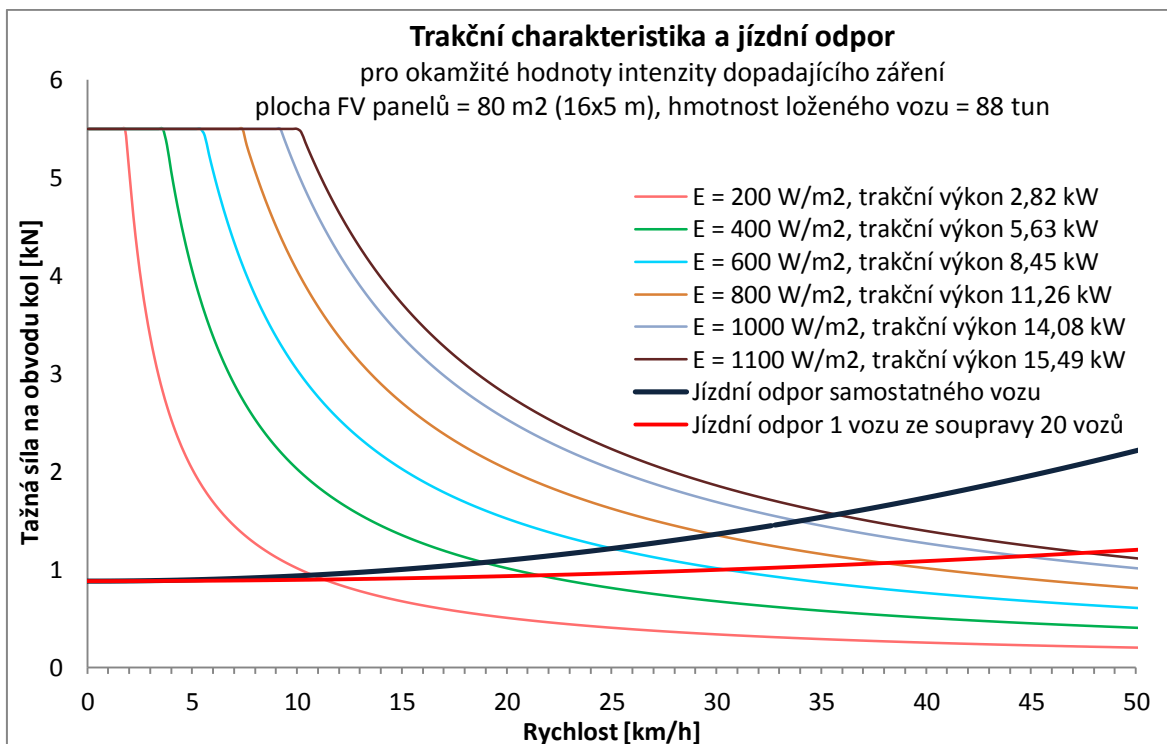
Následující trakční charakteristika znázorňuje jednotlivé průběhy tažné síly na obvodu kol v závislosti na intenzitě dopadajícího záření na plochu fotovoltaického zdroje 115 m^2

(odpovídá délce střechy vozu 23 m a šíři střechy 5 m). Dále jsou zde znázorněny průběhy jízdního odporu - jízdní odpor samostatného vozu a jízdní odpor jednoho vozu ze soustavy 20 vozů. Maximální rychlost vozu (v případě jednoho vozu ze soupravy 20 vozů) při intenzitě dopadajícího záření 1 100 W/m² činí 60 km/h. Maximální rychlost samostatného vozu je 43 km/h (při intenzitě záření 1 100 W/m²).



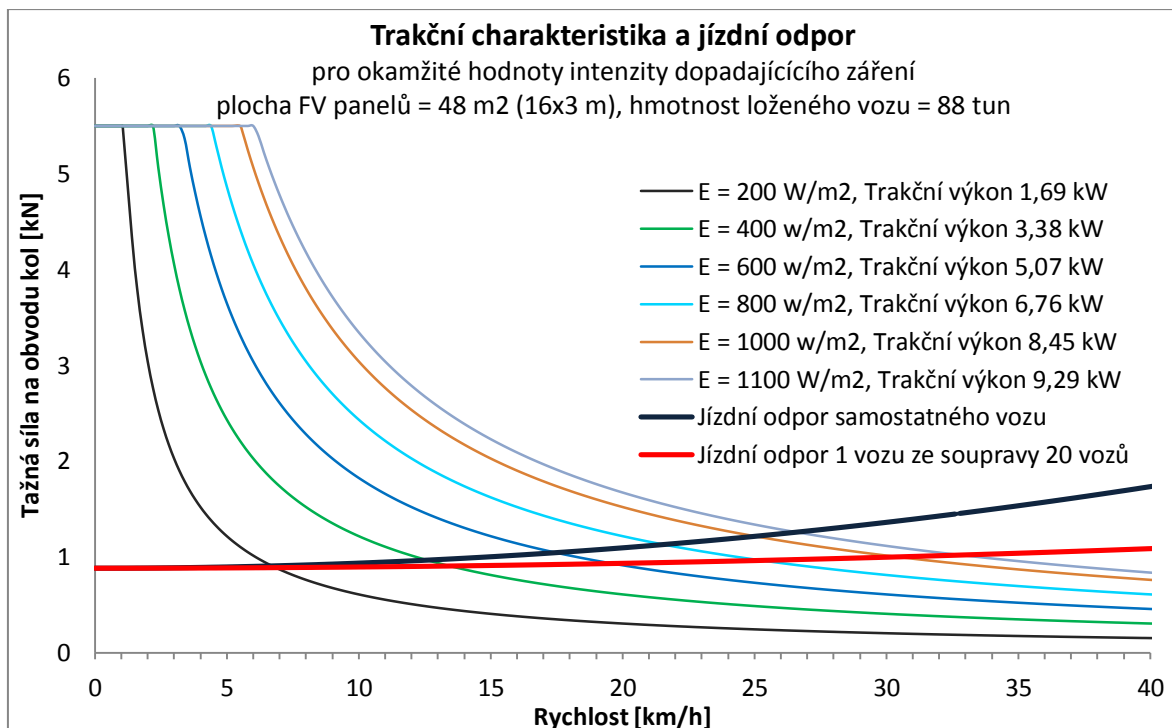
Graf. 2.3 Trakční charakteristika vozidla pro plochu fotovoltaického zdroje 115 m² a $F_{o \max} = 5,5$ kN

Graf 2.4 znázorňuje trakční charakteristiku a průběhy jízdních odporů pro plochu fotovoltaického zdroje na střeše vozidla o velikosti 80 m². Maximální rychlost železničního vozu ze soupravy 20 vozů (při intenzitě dopadajícího záření 1 100 W/m²) činí 48 km/h. Maximální rychlost samostatného vozu je 36 km/h (při intenzitě slunečního záření 1 100 W/m²).



Graf. 2.4 Trakční charakteristika vozidla pro plochu fotovoltaického zdroje 80 m² a $F_{o\ max} = 5,5\ kN$

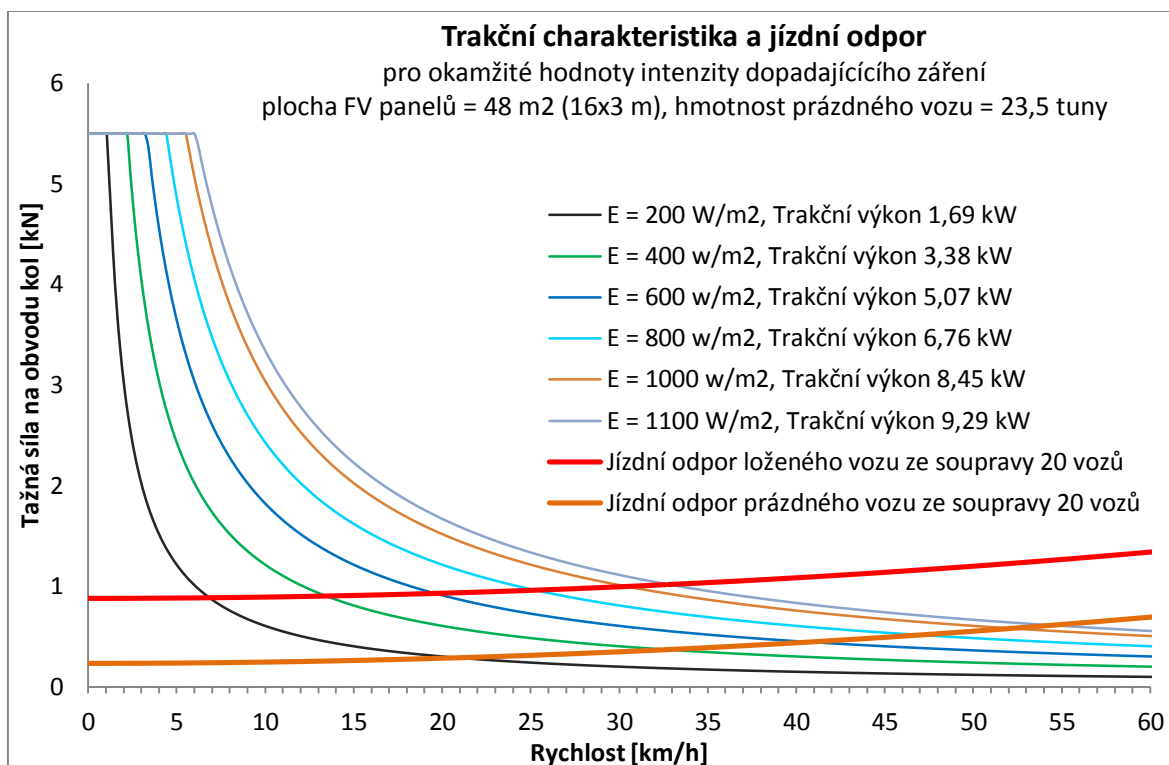
Následující graf znázorňuje trakční charakteristiku a průběhy jízdních odporů pro plochu fotovoltaického zdroje o velikosti 48 m², což odpovídá délce střechy vozu 16 m a šířce 3 m. Maximální rychlost jednoho solárního vozu ze soupravy 20 vozů je v tomto případě 32,6 km/h. Maximální rychlost samostatného vozu je 27 km/h. Obě hodnoty platí pro intenzitu osvětlení 1 100 W/m².



Graf. 2.5 Trakční charakteristika vozidla pro plochu fotovoltaického zdroje 48 m² a $F_{o\ max} = 5,5\ kN$

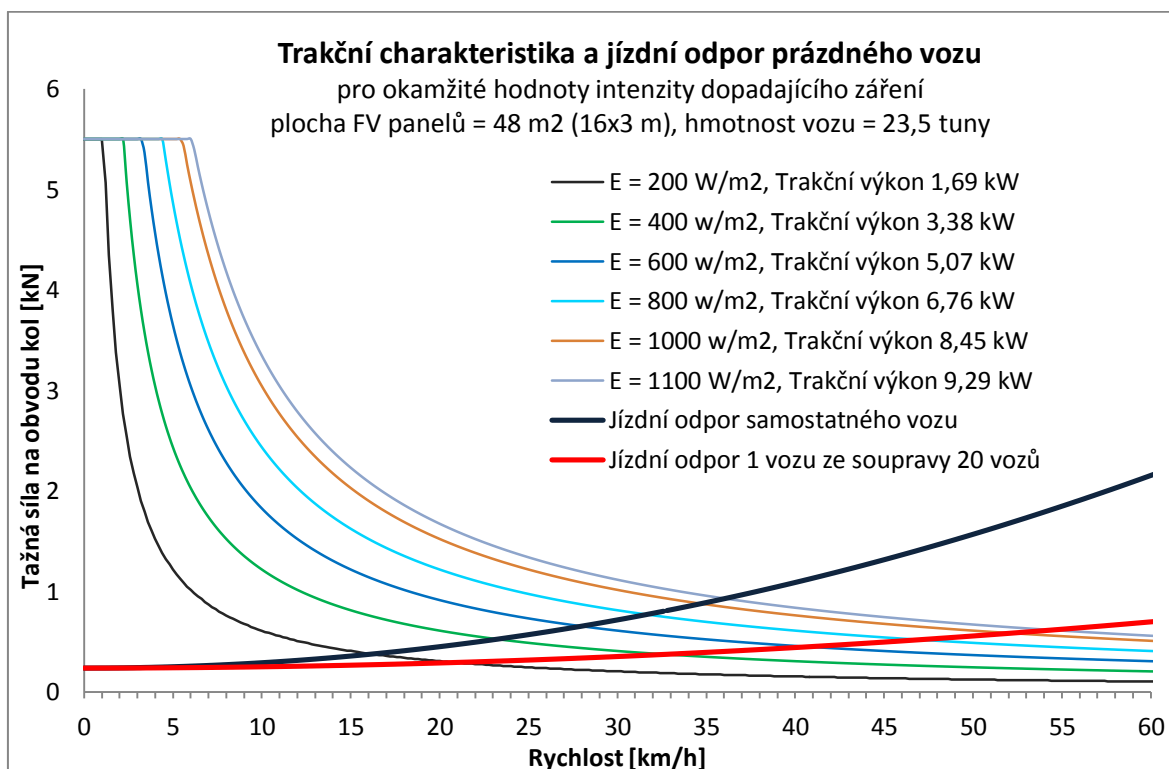
Vliv hmotnosti železničního vozu na jeho jízdní odpor a tím i na rychlost vozidla vyjadřuje graf 2.6. Prázdný vůz o hmotnosti 23,5 tuny se může pohybovat rychlostí 54 km/h -

při intenzitě záření $1\ 100\ \text{W/m}^2$ a ploše fotovoltaického zdroje $48\ \text{m}^2$.



Graf. 2.6 Trakční charakteristika vozidel s rozdílnou hmotností, pro $F_{o\ \max} = 5,5\ \text{kN}$

Na grafu 2.7 je znázorněný detail trakční charakteristiky solárního železničního vozidla zachycující závislost maximální rychlosti vozidla na jízdním odporu pro konkrétní hodnotu trakčního výkonu. Je z něj také patrný značný nárůst hodnoty jízdního odporu (zejména díky jeho aerodynamické složce) v závislosti na rostoucí rychlosti samostatného vozu a tedy i pokles teoretické maximální rychlosti vozu při daném výkonu.



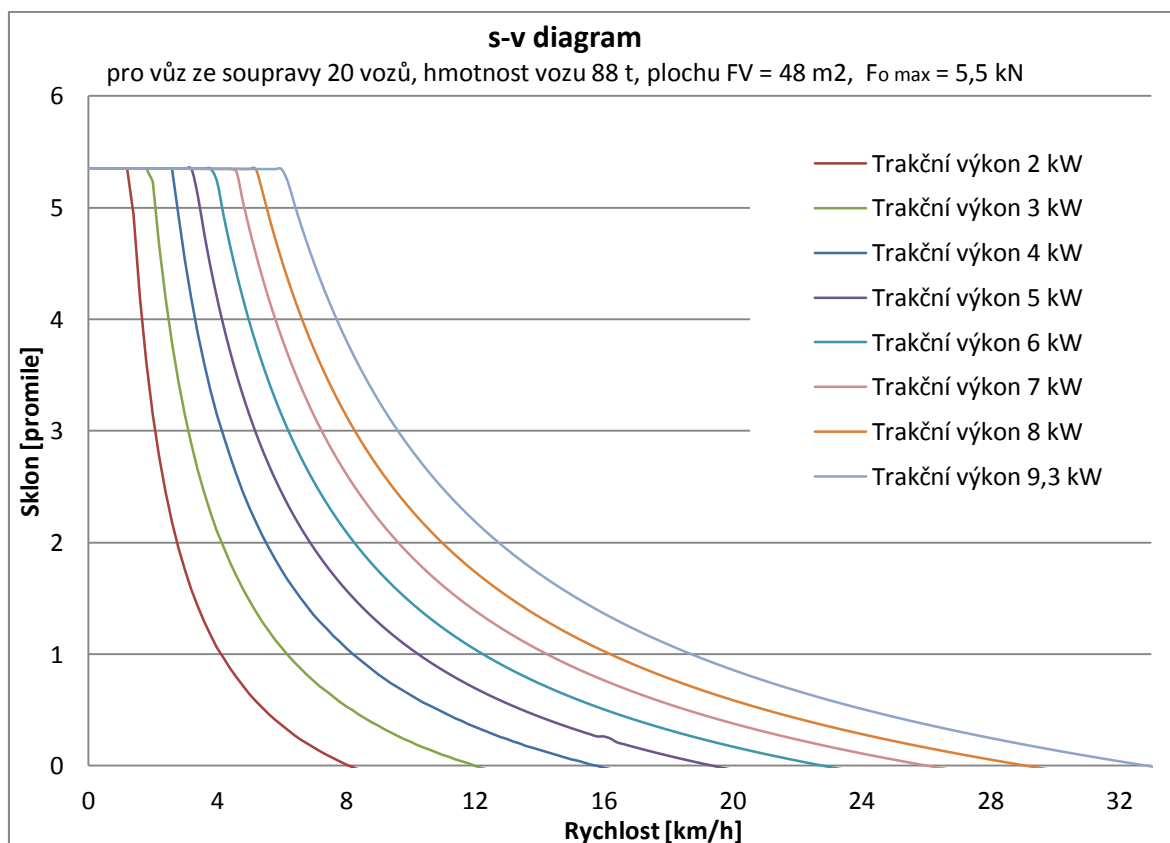
Graf. 2.7 Trakční charakteristika prázdného vozu pro rozdílné činitele C_x a $F_{o\ \max} = 5,5\ \text{kN}$

2.3.3 Diagram $s_0 - v$

Diagram $s_0 - v$ je funkční závislost setrvačného sklonu a rychlosti. Setrvačný sklon s_0 [%] je fiktivní sklon definující hodnotu sklonu, na kterém se při určité tažné síle a dopravní hmotnosti, ustálí rychlost vozidla. Pro setrvačný sklon platí:

$$s_0 = \frac{F_t}{m \cdot g} - p_0 = \frac{3,6 \cdot P_{tr}}{m \cdot g \cdot v} - (a + c \cdot v^2) \quad [\%] \quad (2.22)$$

Graf 2.8 znázorňuje $s_0 - v$ diagram pro trakční výkony odpovídající ploše fotovoltaického zdroje 48 m².



Graf. 2.8 $s_0 - v$ diagram loženého vozu v soupravě 20 vozů

Z přehledu jízdních odporů a jejich výpočtů vyplývají možnosti snížení velikosti některých jízdních odporů solárně poháněného nákladního železničního vozidla. Sklon trati hraje zásadní roli při posuzování dynamiky vozidla. Nutností je proto volba takové oblasti pro provozování vozidla, kde by bylo možné zanedbat traťové sklony. Vypočtené hodnoty dokázaly, že i aerodynamický odpor má nezanedbatelný vliv na dynamiku vozu a to i při poměrně nízkých rychlostech vozidla. Pro dosažení co nejnižších hodnot aerodynamického odporu je potřebné minimalizovat součinitel tvaru vozidla C_x a je tedy výhodné spojovat vozy do souprav, kdy jsou ostatní vozy za prvním vozem v zákrytu. Celkový odpor vzduchu připadající na jednotlivé vozy soupravy je tak nižší, než na samostatný vůz. Z vypočtených výsledků je také patrný značný vliv plochy solárních panelů na elektrický výkon fotovoltaického zdroje. Pro praktické využití solárního vozidla je výhodné volit dlouhé vozy a využívat panely přesahující boční hrany vozů, což však není možné z důvodu průjezdného profilu kdekoliv. Další možností je použití plošinových vozů jako energetických tendrů, sloužících ke zvýšení elektrického výkonu dodávaného fotovoltaickými panely na střechách nákladních vozů.

3 Princip a aplikační pole vozidel s přímým solárním zdrojem elektrické energie

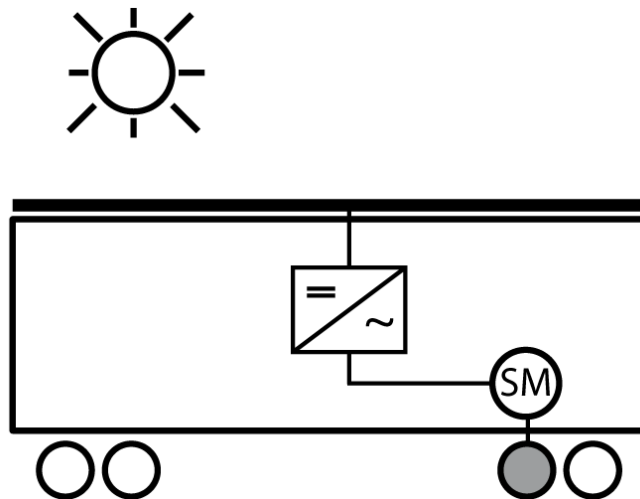
3.1 Výhody přímého solárního napájení železničního vozidla:

- nezávislost na energetické infrastruktuře (přímá přeměna slunečního záření na elektrickou energii),
- nízké provozní náklady (po navrácení vstupních investic do fotovoltaické technologie se vozidlo pohybuje s náklady na provoz blízcími se nulové hranici),
- jedná se o tzv. hnací vůz, který je schopen vyvíjet tažnou sílu na obvodu kol a současně jeho vnitřní uspořádání umožňuje přepravu osob nebo nákladu,
- trvalý provoz (za slunečního svitu),
- dlouhá životnost fotovoltaických panelů (minimálně 20 – 30 let) a absence mechanicky pohyblivých součástí panelů,
- vysoce ekologický provoz (nulové znečištění a zápach).

3.2 Nevýhody přímého solárního napájení železničního vozidla:

- nízký měrný trakční výkon (zapříčiněný zejména nízkou účinností dostupných fotovoltaických panelů),
- nízká rychlost jízdy a nízké zrychlení vozidla,
- závislost na okamžitém slunečním svitu (značně proměnný výkon fotovoltaického zdroje daný geografickou polohou, aktuálními meteorologickými podmínkami, denní a roční dobou),
- nezbytnost provozu v rovinném terénu bez převýšení a s minimem oblouků (z důvodu snížení velikosti jízdního odporu),
- nezbytnost provozu v nezastíněném terénu, ideálně bez tunelů (avšak tunel kratší délky lze díky účinkům setrvačných sil překonat),
- nízká odolnost panelů vůči mechanickému poškození, nízká účinnost panelů v případě jejich znečištění.

Následující obrázek znázorňuje zjednodušené schéma fotovoltaickými panely přímo napájeného železničního vozu.



Obr. 3.1 Uspořádání pohonu solárně napájeného vozidla

3.3 Perspektiva

Rychlý pokrok na poli fotovoltaických článků vede k vývoji nových technologií výroby fotovoltaických panelů a ke zdokonalování současných technologií. Vlivem toho dochází k poklesu jejich výrobních i pořizovacích nákladů a postupnému nárůstu účinnosti fotovoltaických panelů. Tato skutečnost může v budoucnu částečně odstranit základní nevýhody vozidel tohoto konceptu – nízký měrný trakční výkon a z něj plynoucí nízkou dynamiku jízdy vozidla. Současně pořizovací ceny panelů umožní rychlejší návratnost investice, čímž dopravní prostředek získá na atraktivnosti.

3.4 Oblast aplikace

Vzhledem k důsledkům plynoucím z nízké rychlosti je fotovoltaickými panely přímo napájené vozidlo vhodné k přepravě nákladu. Dosahovaná jízdní rychlost vozidla není pro přepravu cestujících dostatečná. Výběru vhodné lokality pro provoz solárního vozidla je třeba věnovat značnou pozornost. Vhodné je nasazení vozidla v tropickém pásu, kde je vysoká energie dopadajícího solárního záření (s téměř kolmým úhlem dopadu na oslněnou plochu). Energie má v těchto lokalitách co do velikosti podstatně nižší výkyvy během roku, než je tomu v oblastech např. mírného či subtropického pásma.

3.5 Možné způsoby zvýšení výkonu fotovoltaického zdroje

Od velikosti elektrického výkonu fotovoltaických panelů se odvíjí trakční výkon na obvodu kol a tím i dynamika vozidla. Je tedy žádoucí tento výkon maximalizovat. Kromě využití panelů o co nejvyšší účinnosti (v současnosti připadají v úvahu monokrystalické křemíkové články a HIT články) existují i další způsoby zvýšení výkonu zdroje. Jako vhodné se jeví zvýšení plochy fotovoltaických panelů, kterého může být dosaženo pomocí přesahů fotovoltaických panelů přes boční stěny vozu, využití vozu o větší délce skříně či využití přídatných plošinových vozů sloužících jako energetické tendry. Následující tři modelové příklady ilustrují možné způsoby využití plochy střechy solárního železničního vozu.

3.5.1 Standardní vůz

Je uvažován vůz o délce vozové skříně 16 m a šíři 3 m.

Pokud by fotovoltaické panely kopírovaly obrysy střechy vozidla, byla by velikost plochy panelů totožná s plochou skříně. Plocha fotovoltaických panelů na střeše vozidla (obr. 3.2) se

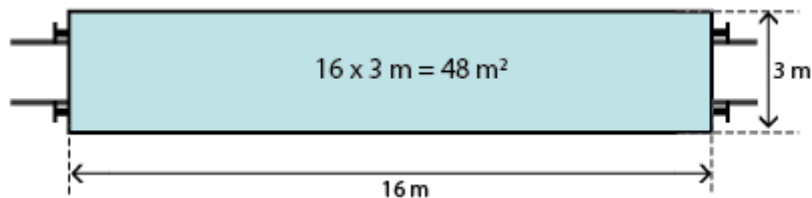
vyjádří:

$$S = L \cdot b = 16 \cdot 3 = 48 \text{ m}^2 \quad (3.1)$$

kde:

L = délka vozové skříně [m],

b = šířka vozové skříně [m].



Obr. 3.2 Plocha fotovoltaických panelů na střeše vozu 48 m²

Elektrická energie přeměněná fotovoltaickými panely za 24 hodin, pro modelový příklad průměrného skutečného záření dopadajícího na vodorovnou osluněnou plochu 48 m² v Alto Horizonte, lze definovat:

$$E_{pa} = Q_{s\ den} \cdot S \cdot \eta_{pa} \cdot k_o = 52\ 530 \text{ Wh} \approx 53 \text{ kWh} \quad (3.2)$$

kde:

$Q_{s\ den}$ = průměrná skutečná energie záření dopadající na vodorovnou osluněnou plochu za den pro lokalitu Alto Horizonte (5 586 Wh/m²),

S = plocha fotovoltaických článků na střeše vozidla [m²],

η_{pa} = účinnost fotovoltaického panelu [-],

k_o = koeficient optických vlastností fotovoltaických panelů [-], uvažována hodnota 0,98 (za předpokladu pravidelného čištění povrchu fotovoltaických panelů na střeše vozu).

Měrná hmotnost loženého vozidla na jednotku délky je v tomto případě:

$$\frac{m}{L} = \frac{88}{16} = 5,5 \text{ t/m} \quad (3.3)$$

Měrnou hmotnost prázdného vozu (o hmotnosti například 23,5 tuny) na jednotku délky vyjadřuje vztah:

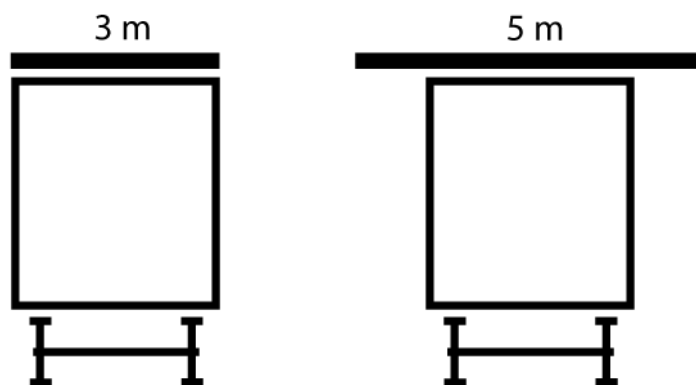
$$\frac{m}{L} = \frac{23,5}{16} = 1,47 \text{ t/m} \quad (3.4)$$

Na vlastní náklad tedy zbývá 4,03 tuny na metr délky vozidla.

3.5.2 Standardní vůz s rozšířenou plochou střechy

Je uvažován vůz o délce vozové skříně 16 m a šíři 3 m. Při přesahu fotovoltaických panelů 1 metr z každé strany vozu (obr. 3.3) lze získat plochu fotovoltaických panelů o velikosti:

$$S = L \cdot b = 16 \cdot 5 = 80 \text{ m}^2 \quad (3.5)$$

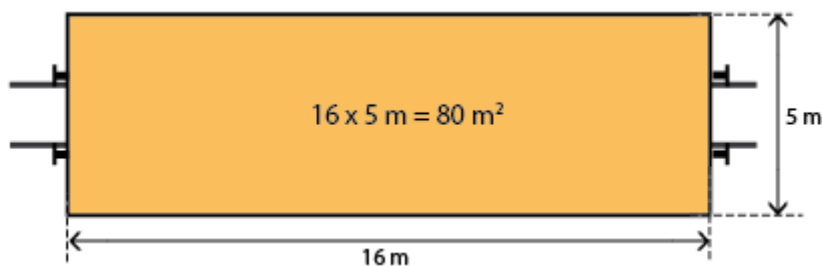


Obr. 3.3 Znárodnění možného rozšíření plochy fotovoltaických panelů na střeše vozu o šíři 3 metry

Elektrická energie fotovoltaického zdroje o ploše 80 m^2 (obr. 3.4) transformovaná za 24 hodin je rovna:

$$E_{pa} = Q_{S \text{ den}} \cdot S \cdot \eta_{pa} \cdot k_o = 87\,589 \text{ Wh} \approx 88 \text{ kWh} \quad (3.6)$$

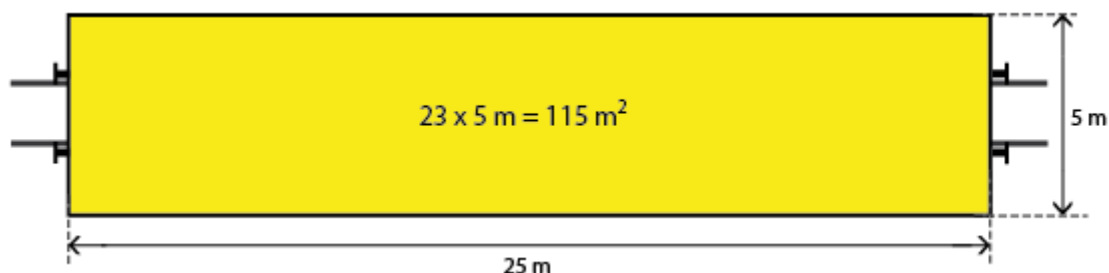
což činí 1,7 násobek energie fotovoltaických panelů o ploše 48 m^2 .



Obr. 3.4 Plocha fotovoltaických panelů na střeše vozu 80 m^2

3.5.3 Vůz o délce skříně 23 m s rozšířenou plochou střechy

Další možností zvýšení plochy fotovoltaických panelů je použití železničního vozu o větší délce vozové skříně. Pro získání maximální plochy fotovoltaických panelů může posloužit například vůz o délce 23 m a šíři 3 m (příčmě fotovoltaické panely přesahují obě boční stěny vozu o 1 metr). Velikosti plochy panelů bude v tom případě rovna 115 m^2 (obr. 3.5).



Obr. 3.5 Plocha fotovoltaických panelů na střeše vozu 115 m^2

Elektrická energie fotovoltaických panelů o ploše 115 m^2 transformovaná za 24 hodin je definována jako:

$$E_{pa} = Q_{S \text{ den}} \cdot S \cdot \eta_{pa} \cdot k_o = 123\,390 \text{ Wh} \approx 123 \text{ kWh} \quad (3.7)$$

Tato hodnota energie činí 2,4 násobek energie fotovoltaických panelů o ploše 48 m^2 .

Měrná hmotnost loženého vozidla na jednotku délky vozidla (pro hmotnost 88 tun a délku skříně 23 metrů) lze určit:

$$\frac{m}{L} = \frac{88}{23} = 3,83 \text{ t/m} \quad (3.8)$$

Měrná hmotnost prázdného vozidla (o hmotnosti 30 tun) na jednotku délky se vyjádří:

$$\frac{m}{L} = \frac{30}{23} = 1,3 \text{ t/m} \quad (3.9)$$

Na vlastní náklad tedy zbývá 2,53 tuny na metr délky vozidla, což je hodnota o 1/3 nižší než měrná hmotnost vozu o délce 16 metrů. Pro dopravce materiálů o vysoké měrné hmotnosti (např. nerostné suroviny) je tedy z tohoto hlediska výhodnější použít vůz kratší délky (16 m).

3.6 Výpočet dosažitelné rychlosti vlaku

Elektrický výkon solárního zdroje má vliv i na rychlost vozidla a vozidlem vykonanou vzdálenost za den. Při výpočtech dosažitelné rychlosti a dojezdu solárně poháněného vlaku o 20 vozech během dne byly uvažovány tyto výchozí podmínky:

- skutečná energie dopadajícího solárního záření je daná průměrným denním průběhem intenzity dopadajícího solárního záření pro vzorovou lokaci Alto Horizonte v Brazílii,
- plocha fotovoltaických panelů napájejících vozidlo: 48 m², 80 m², 115 m²,
- hmotnost loženého vozidla: 88 tun,
- cesta vozidla je bez přikázaných zastávek a zpomalení,
- rovná trať bez oblouků a převýšení,
- nezastíněná trať, bez tunelů,
- polynom vozidlového odporu (pro jeden vůz ze soupravy 20 vozů a při zanedbání lineárního členu polynomu) ve tvaru:

$$p_o = 1 + 0,000148 \cdot v^2 \quad [N / kN] \quad (3.10)$$

Aerodynamický odpor pro jeden vůz z uvažované soupravy 20 nákladních vozů:

$$P_{ae} = \frac{P_{ae}}{v_{km}^2 \cdot m \cdot g} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 \cdot C_x \cdot S}{v_{km}^2 \cdot m \cdot g} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot \left(\frac{1}{3,6}\right)^2 \cdot 0,24 \cdot 11,5}{88000 \cdot 9,81} = 0,000148 \text{ [N / kN / (km / h)]} \quad (3.11)$$

kde:

ρ = měrná hmotnost vzduchu [kg/m³],

v_{km} , v_m = rychlost vozidla v km/h, resp. v m/s,

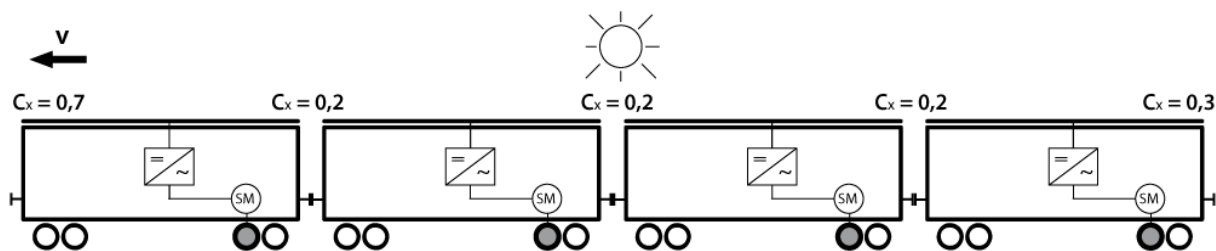
C_x = součinitel tvaru vozidla [-],

S = plocha čela vozidla [m²],

m = hmotnost vozidla [kg],

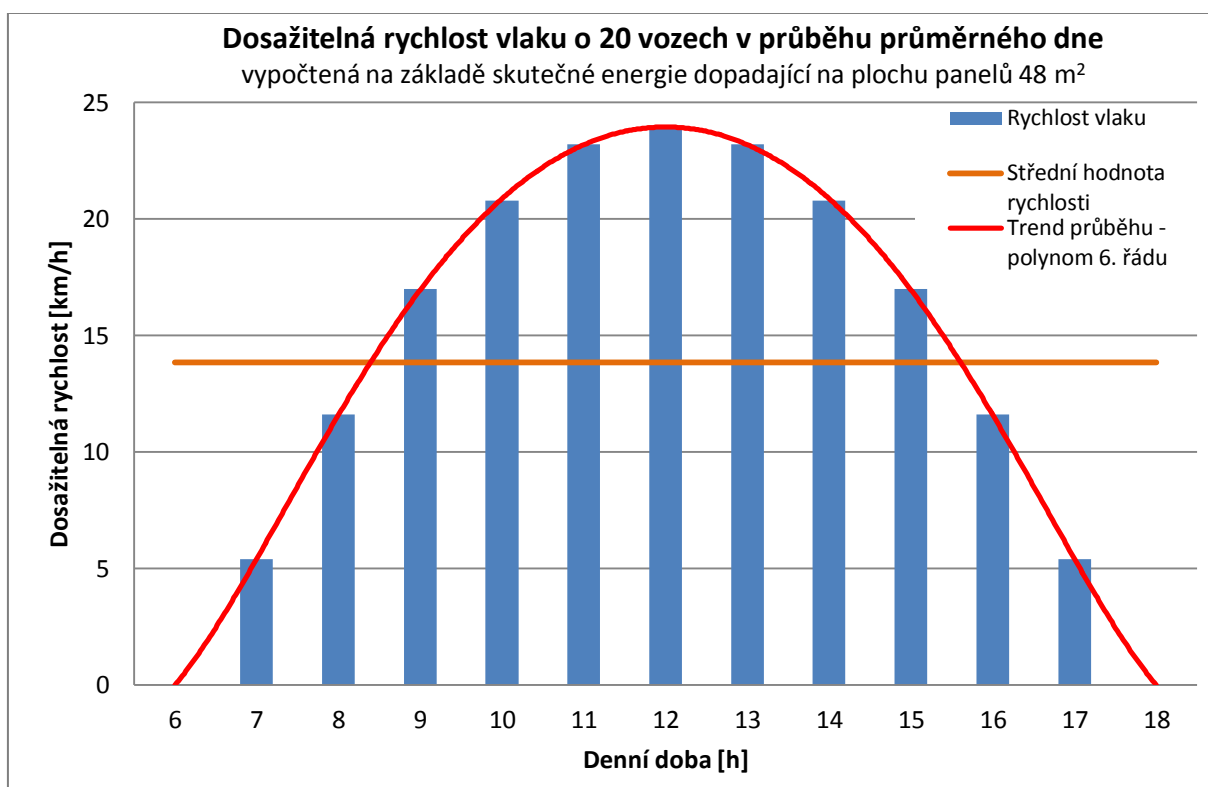
g = gravitační zrychlení [m/s²].

Velikost součinitele C_x pro soupravu čtyř nákladních vozů znázorňuje obr. 3.6.



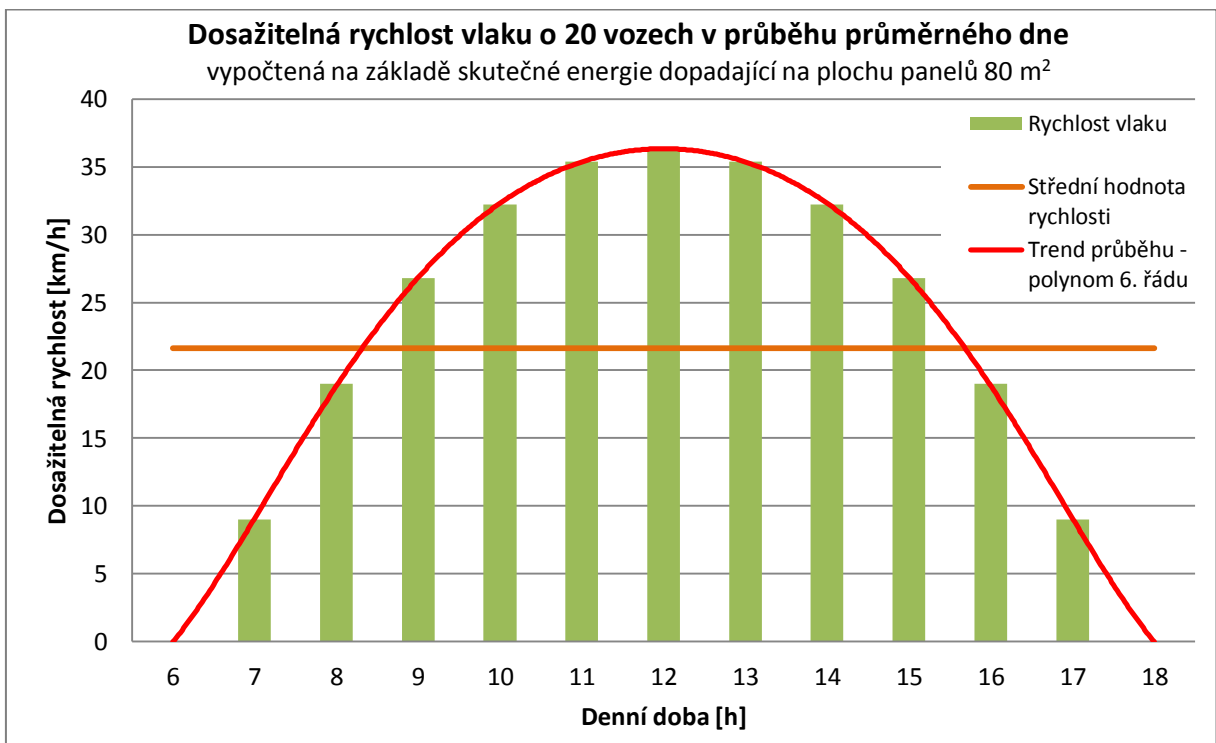
Obr. 3.6 Součinitel C_x pro soupravu nákladních vozů

Vypočtený průběh dosažitelné rychlosti vlaku o 20 vozech během průměrného dne pro plochu fotovoltaických panelů 48 m^2 (při uvažování skutečné dopadající energie na osluněnou plochu v oblasti Alto Horizonte) udává v jednohodinových intervalech následující graf. Maximální rychlost vozidla je v tomto případě $23,6 \text{ km/h}$.



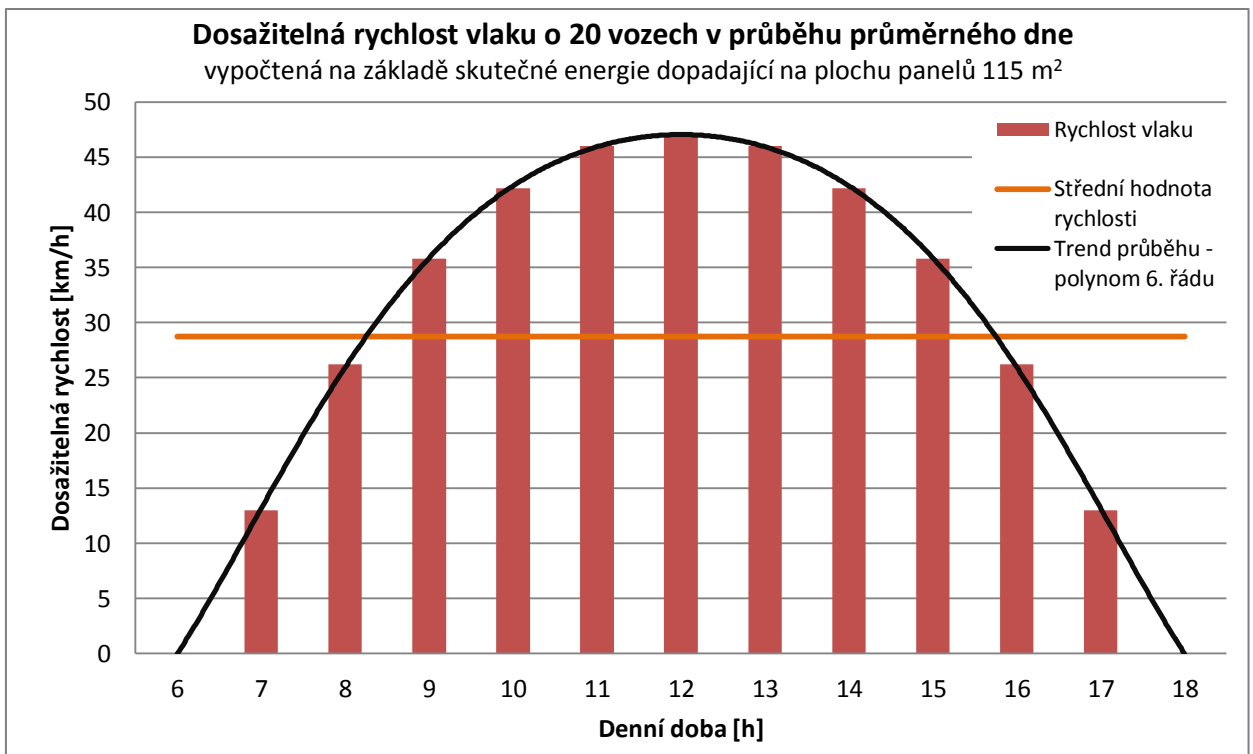
Graf. 3.1 Dosažitelná rychlost vlaku pro plochu fotovoltaických panelů 48 m^2

Průměrnou rychlost solárně poháněného vozidla vyjádřenou pro plochu fotovoltaických panelů 80 m^2 znázorňuje graf 3.2. Maximum rychlosti je 36 km/h , což je hodnota téměř o 50 % vyšší, než v případě panelů o ploše 48 m^2 .



Graf. 3.2 Dosažitelná rychlost vlaku pro plochu fotovoltaických panelů 80 m²

Na následujícím průběhu průměrné rychlosti v závislosti na denní době pro plochu fotovoltaického zdroje 115 m² je zřetelný značný nárůst elektrického výkonu zdroje a tím i rychlosti vozidla. Maximální hodnota rychlosti je 47 km/h.



Graf. 3.3 Dosažitelná rychlost vlaku pro plochu fotovoltaických panelů 115 m²

3.7 Výpočet vykonané dráhy vlaku

Solárně poháněným vozidlem vykonaná dráha za daný časový úsek se vyjádří dle vztahu:

$$s(t) = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \text{ [km]} \quad (3.12)$$

neboť geometrickým významem integrálu časové funkce je součet ploch mezi funkční křivkou a časovou osou.

Vzhledem k tomu, že intenzita dopadajícího slunečního záření byla vyjádřena jako diskrétní veličina, jejíž velikost je definována pro každých 60 minut, je i výsledná vypočtená rychlost vozidla diskrétního charakteru. Z toho důvodu je uvažován přírůstek dráhy vykonané danou rychlostí za přírůstek času jako:

$$\Delta s \approx v \Delta t \quad \text{[km]} \quad (3.13)$$

kde:

Δs = přírůstek dráhy [km],

Δt = přírůstek času [h].

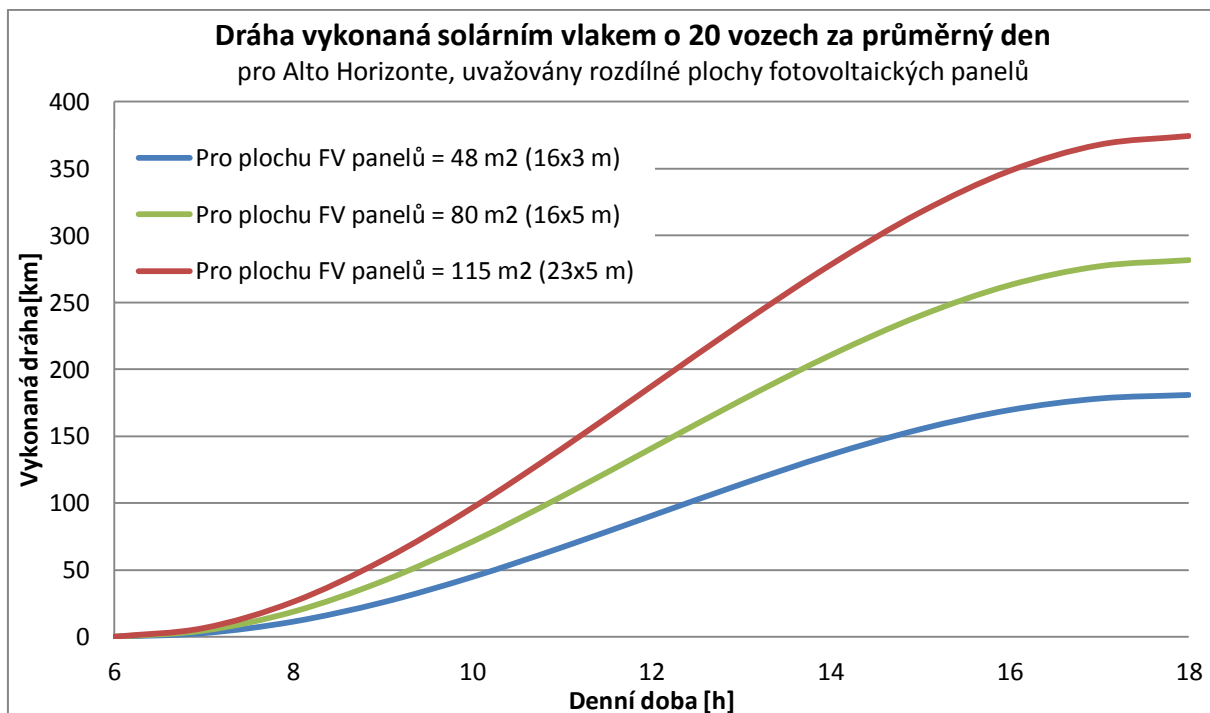
Celková dráha vykonaná za den při nerovnoměrném pohybu vozidla je dána sumací všech jednotlivých přírůstků dráhy:

$$s \approx \Delta s_1 + \Delta s_2 + \dots + \Delta s_n = \sum_{i=1}^n v_i \Delta t \quad \text{[km]} \quad (3.14)$$

Za těchto předpokladů dokáže fotovoltaickými panely přímo napájený vlak o 20 vozech (hmotnost loženého vozu 88 tun) v závislosti na ploše fotovoltaických panelů vykonat za průměrný den v brazilské lokalitě Alto Horizonte (při uvažování rovné nezastíněné trati bez převýšení a oblouků) následující dráhy:

- 177 km dlouhá trať (pro plochu fotovoltaických panelů na střeše vozidla 48 m²),
- 280 km dlouhá trať (pro plochu fotovoltaických panelů na střeše vozidla 80 m²),
- 375 km dlouhá trať (pro plochu fotovoltaických panelů na střeše vozidla 115 m²).

Vlakem vykonané dráhy během průměrného dne znázorňuje graf 3.4.



Graf. 3.4 Dojezd solárního vlaku za průměrný den

3.8 Teoretická bezztrátová přeměna fotovoltaických panelů

Pro posouzení potenciálních možností solárně napájeného vozidla je uvažována teoretická 100% účinnost fotovoltaické přeměny solární energie v energii elektrickou. Tato bezztrátová přeměna není při současném stavu techniky reálná, avšak trend zvyšování účinnosti nejmodernějších laboratorních fotovoltaických článků napovídá, že v budoucnu je možné počítat s dalším růstem účinnosti článků. V současné době maximální účinnosti dosahují vícevrstvé fotovoltaické články (přes 40% účinnost). Využití vícevrstevných článků k napájení solárního vlaku brání zejména jejich vysoká cena.

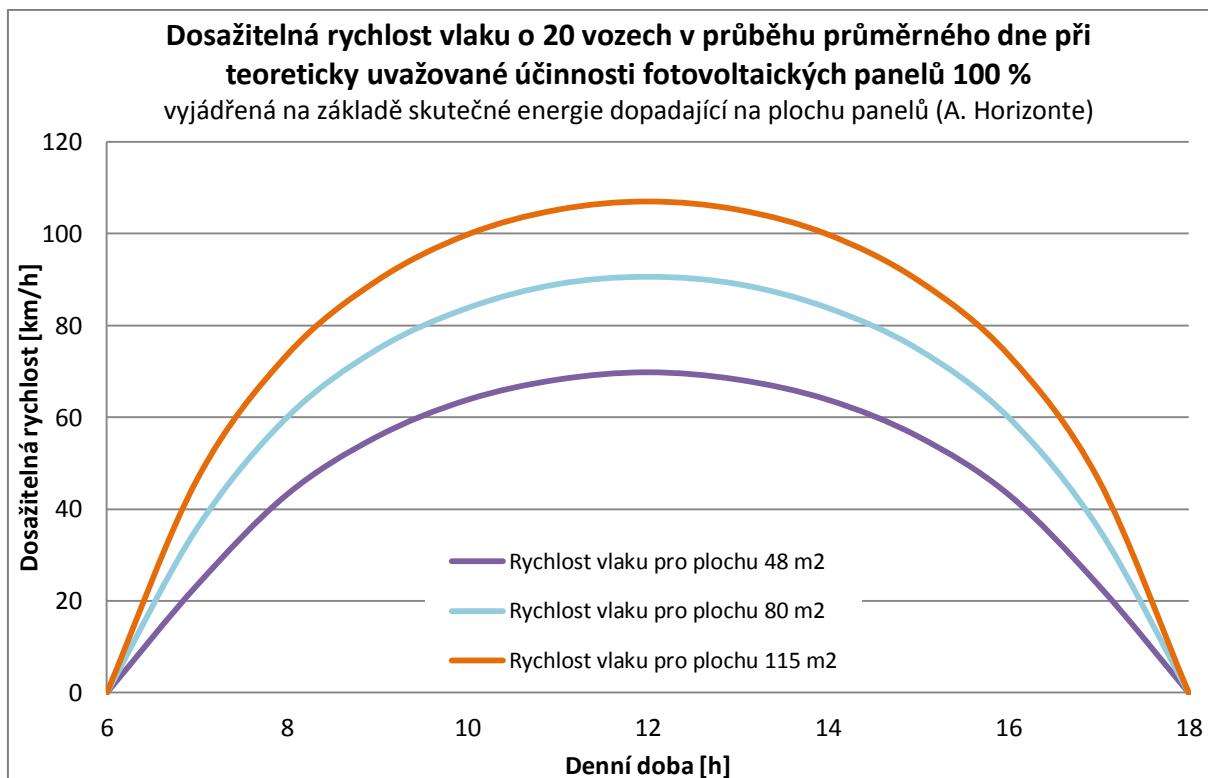
Elektrická energie transformovaná fotovoltaickými panely s účinností 100 % (např. pro plochu 48 m²) lze za daných podmínek vyjádřit jako:

$$E_{pa} = Q_{s\ den} \cdot S \cdot \eta_{pa} \cdot k_o = 268\ 128\ Wh \approx 268\ kWh \quad (3.15)$$

což je hodnota elektrické energie (i účinnosti) více než 5 násobně vyšší, než v případě použití fotovoltaických panelů o účinnosti 19,6 %.

3.8.1 Výpočet dosažitelné rychlosti

Průběh dosažitelné rychlosti pro vozidla o rozdílných plochách fotovoltaických panelů by v ideálním případě nulové ztrátivosti fotovoltaických panelů vypadal následovně - graf 3.5 (pro lokalitu Alto Horizonte, při uvažování trati bez oblouků a převýšení).



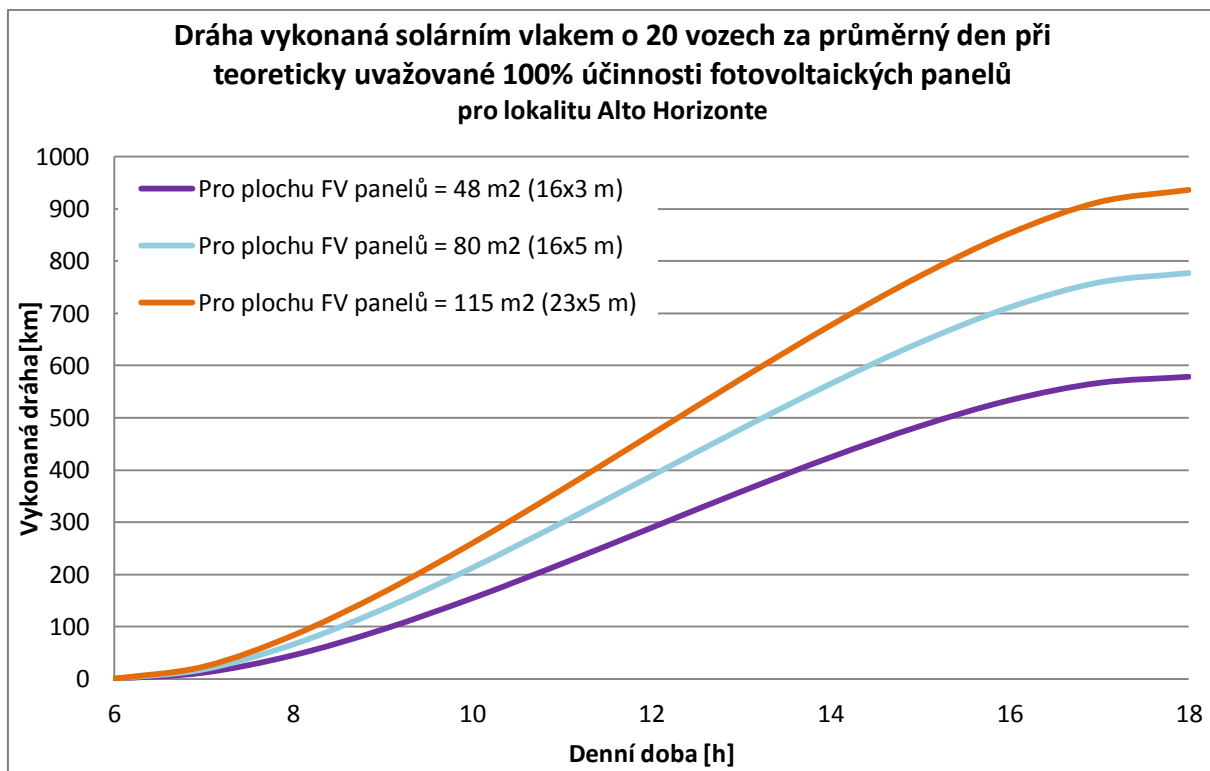
Graf. 3.5 Dosažitelná rychlost vlaku při účinnosti fotovoltaických panelů 100 %

3.8.2 Výpočet vykonané dráhy

Celková dráha vykonaná solárním vlakem za 24 hodin při nerovnoměrném pohybu vozidla je dána součtem všech jednotlivých přírůstků dráhy vykonané danou rychlostí za přírůstek času. Tato suma přírůstků dráhy při teoretickém využití fotovoltaických panelů o účinnosti 100 % dosahuje pro jednotlivé plochy panelů hodnot:

- 580 km (pro plochu fotovoltaických panelů na střeše vozidla 48 m²),
- 780 km (pro plochu fotovoltaických panelů na střeše vozidla 80 m²),
- 940 km (pro plochu fotovoltaických panelů na střeše vozidla 115 m²).

Dráhu vykonanou vlakem o 20 vozech s fotovoltaickými panely o účinnosti 100 % znázorňuje graf 3.6.



Graf. 3.6 Vlakem vykonaná dráha při 100% účinnosti fotovoltaických panelů

4 Distribuovaný trakční pohon

Existuje několik možných způsobů řešení fotovoltaickými články přímo napájených nákladních železničních vozidel, které se liší plochou a tedy celkovým elektrickým výkonem dodávaným fotovoltaickými panely, hodnotou činitele tvaru vozidla C_x a velikostí neužitečné hmotnosti vlaku.

4.1 Lokomotiva s fotovoltaickým zdrojem

V případě tohoto konceptu uspořádání trakčního pohonu disponuje fotovoltaickými panely a trakčním pohonem pouze lokomotiva. Vozy v soupravě slouží pouze k přepravě nákladu, a tedy k pohonu celku žádným způsobem nepřispívají (obr. 4.1).



Obr. 4.1 Souprava s lokomotivou s fotovoltaickými panely

Níže jsou uvedeny specifikace modelové lokomotivy a fotovoltaického zdroje.

4.1.1 Parametry lokomotivy

- Délka skříně lokomotivy 16,7 m
- Šíře lokomotivy 3 m
- Délka fotovoltaického zdroje na střeše vozidla, L_z 15 m
- Šíře fotovoltaického zdroje na střeše vozidla, b_z 3 m
- Plocha fotovoltaického zdroje

$$S_z = L_z \cdot b_z = 15 \cdot 3 = 45 \text{ m}^2 \quad (4.1)$$

- Účinnost fotovoltaických panelů, η_{fp} 19,6 %
- Výkon fotovoltaického zdroje vlaku (při intenzitě záření dopadajícího na osluněnou horizontální plochu $E = 1000 \text{ W/m}^2$)

$$P_{dvl} = E \cdot S_z \cdot \eta_{fp} \cdot k_o = 8820 \text{ W} \approx 8,8 \text{ kW} \quad (4.2)$$

kde:

k_o = koeficient optických vlastností fotovoltaických panelů [-],

Výkon generovaný fotovoltaickými panely je dle výše uvedeného vztahu nízké velikosti, což má za následek nízkou dynamiku vlakové soupravy a umožňuje připojení pouze několika vozů do soupravy.

Velikost součinitele tvaru vozidla C_x se v přepočtu pro jedno vozidlo ze soustavy vyjádří jako:

$$C_x = \frac{\sum C_{xi}}{n} = \frac{C_{x1} + C_{x2} + (n - 1) \cdot C_{x3} + C_{x4}}{n} =$$

$$= \frac{0,5 + 0,3 + (21 - 2) \cdot 0,2 + 0,3}{21} = 0,2\bar{3} \quad [-] \quad (4.3)$$

kde:

C_{x1} = součinitel tvaru pro přední čelo prvního vozidla v soupravě [-],

C_{x2} = součinitel tvaru pro přechod mezi lokomotivou a prvním vozem [-],

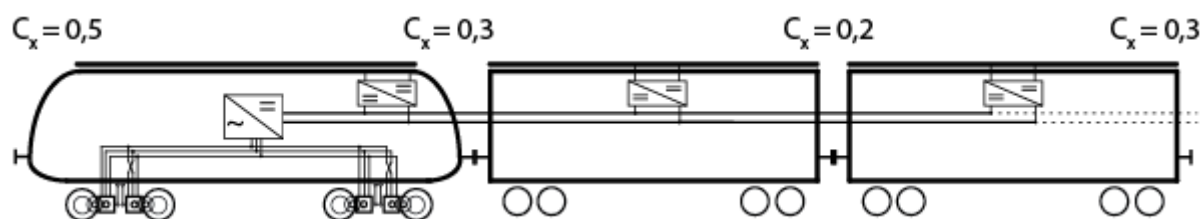
C_{x3} = součinitel tvaru pro mezi vozový přechod [-],

C_{x4} = součinitel tvaru pro zadní čelo posledního vozidla v soupravě [-],

n = počet železničních vozidel v soupravě [-].

4.2 Lokomotiva a netrakovní vozy s fotovoltaickým zdrojem

Jedná se o modelový příklad, kdy jsou na lokomotivě opět umístěny fotovoltaické panely a trakční pohon. Střechy vozů jsou pokryty fotovoltaickými panely, jejichž výkon je přes měniče pro paralelní spolupráci veden celým vlakem po stejnosměrné sběrnici do lokomotivního napěťového střídače.



Obr. 4.2 Lokomotiva a netrakovní vozy s fotovoltaickým zdrojem

4.2.1 Parametry lokomotivy

- Délka skříně lokomotivy 16,7 m
- Šíře lokomotivy 3 m
- Délka fotovoltaického zdroje na střeše lokomotivy, L_z 15 m
- Šíře fotovoltaického zdroje na střeše lokomotivy, b_z 3 m
- Plocha fotovoltaického zdroje na střeše lokomotivy

$$S_{z l} = L_z \cdot b_z = 15 \cdot 3 = 45 \text{ m}^2 \quad (4.4)$$

4.2.2 Parametry nákladního vozu

- Počet vozů, N_v 20
- Délka skříně vozu, L_v 16 m
- Šíře skříně vozu, b_v 3 m
- Plocha fotovoltaického zdroje na střeše vozu

$$S_{z v} = L_v \cdot b_v = 16 \cdot 3 = 48 \text{ m}^2 \quad (4.5)$$

- Účinnost fotovoltaických panelů, η_{fp} 19,6 %
- Výkon fotovoltaického zdroje na střeše všech vozidel soupravy (při intenzitě záření dopadajícího na osluněnou horizontální plochu $E = 1000 \text{ W/m}^2$)

$$P_{d\ vl} = E \cdot (S_{z\ l} + S_{z\ v} \cdot N_v) \cdot \eta_{fp} \cdot k_o = 196\ 980\ W \approx 197\ kW \quad (4.6)$$

kde:

k_o = koeficient optických vlastností fotovoltaických panelů [-].

- Výkon fotovoltaického zdroje (při intenzitě záření $E = 1000\ W/m^2$) připadající na jedno vozidlo

$$P_d = \frac{P_z}{N_l + N_v} = \frac{197}{21} = 9,38\ kW \quad (4.7)$$

- Měrný výkon soupravy 20 ložených vozů tažených lokomotivou

$$k = \frac{\sum P_z}{\sum m} = \frac{\sum P_z}{m_l + N_v \cdot m_v} = \frac{197\ 000}{80\ 000 + 20 \cdot 88\ 000} = 0,107\ W/kg \quad (4.8)$$

- Měrný výkon soupravy 20 ložených autonomních vozů (bez lokomotivy)

$$k = \frac{\sum P_z}{\sum m} = \frac{\sum P_z}{m_l + N_v \cdot m_v} = \frac{197\ 000}{20 \cdot 88\ 000} = 0,112\ W/kg \quad (4.9)$$

- Velikost součinitele tvaru čela je stejná jako v předchozím případě - $C_x = 0,2\bar{3}$ (za předpokladu zanedbání odporu vzduchu fotovoltaických panelů na střechách nákladních vozů).

Při porovnání vypočtených hodnot měrného výkonu soupravy s lokomotivou a bez lokomotivy je zřejmé, že lokomotiva snižuje hodnotu měrného výkonu soupravy, neboť nevezve užitečnou zátěž. Zároveň hmotnost lokomotivy zvyšuje jízdní odpor vlaku. Nevýhodou jsou i přídavné měniče ve vozech a průběžné stejnosměrné vedení (sběrnice) přes celý vlak.

Z těchto důvodů se jeví využití lokomotivy pro pohon přímo poháněného solárního nákladního vlaku jako nevýhodné.

4.3 Samostatně jedoucí vozy s fotovoltaickým zdrojem

Každý uvažovaný nákladní vůz disponuje fotovoltaickým zdrojem elektrické energie a trakčním pohonem (obr. 4.3), čímž je vůz plně autonomní.



Obr. 4.3 Autonomní nákladní vozy

4.3.1 Parametry nákladního vozu

- Délka skříně vozu, L_v 16 m
- Šíře skříně vozu, b_v 3 m
- Plocha fotovoltaického zdroje na střeše vozu

$$S_{z\ v} = L_v \cdot b_v = 16 \cdot 3 = 48\ m^2 \quad (4.10)$$

- Účinnost fotovoltaických panelů, η_{fp} 19,6 %
- Výkon fotovoltaického zdroje (při intenzitě záření $E = 1000 \text{ W/m}^2$) na střeše vozu

$$P_d = E \cdot S_{zv} \cdot \eta_{fp} \cdot k_o = 9\,408 \text{ W} = 9,4 \text{ kW} \quad (4.11)$$

- V případě samostatně jedoucích trakčních nákladních vozů musí každý z těchto vozů při jízdě překonávat odpor vzduchu o plné velikosti, přičemž hodnota součinitele C_x jednoho vozu je dána:

$$C_x = \frac{\sum C_{xi}}{n} = \frac{0,7 + 0,3}{1} = 1 \quad [-] \quad (4.12)$$

- Kvadratický člen měrného vozidlového odporu pro samostatný vůz:

$$c = \frac{p_{ae}}{m \cdot g \cdot v^2} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot \left(\frac{v}{3,6}\right)^2}{m \cdot g \cdot v^2} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S}{m \cdot g \cdot 3,6^2} =$$

$$= \frac{\frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 11,5}{88 \cdot 9,81 \cdot 3,6^2} = 0,000617 \quad [N/kN/(km/h)] \quad (4.13)$$

Kvadratický člen polynomu vozidlového odporu tvoří, zejména při vyšších rychlostech vozidla, hlavní složku vozidlového odporu, neboť jeho hodnota roste s druhou mocninou rychlosti. Velikost kvadratického členu je značně závislá na hodnotě součinitele C_x a je proto žádoucí velikost tohoto součinitele minimalizovat (viz kapitola 4.4).

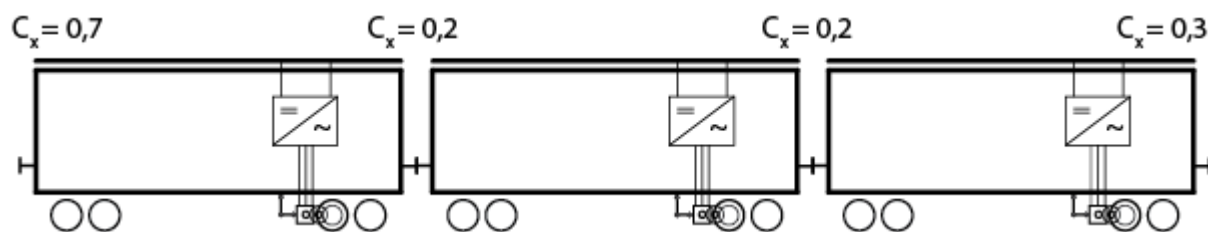
Pro rychlost 40 km/h se velikost měrného vozidlového odporu samostatně jedoucího solárního vozidla vyjádří:

$$p_o = a + c \cdot v^2 = 1 + 0,000617 \cdot 40^2 = 1,99 \text{ [N/kN]} \quad (4.14)$$

Hodnota elektrického výkonu fotovoltaického zdroje každého samostatného vozu je velikostně takřka stejná, jako v případě netrakčních vozů s fotovoltaickými zdroji tažených lokomotivou. Oproti nim má toto uspořádání výhodu v nižší hodnotě neužitečné hmotnosti a nevýhodu v podstatně vyšším koeficientu C_x a tím i vyšším vozidlovém odporu.

4.4 Ve skupině jedoucí vozy s fotovoltaickým zdrojem

Každý modelový vůz je vybaven fotovoltaickými panely i trakčním pohonem, přičemž jsou všechny vozy řazeny do soupravy (a tvoří tak vlak), viz obr. 4.4.



Obr. 4.4 Ve skupině jedoucí vozy s fotovoltaickým zdrojem

Vzhledem ke stejným rozměrům uvažovaných nákladních vozů, jako v předchozích případech, je i elektrický výkon fotovoltaického zdroje (při uvažované intenzitě záření dopadajícího na osluněnou horizontální plochu 1000 W/m^2) připadající na jeden vůz totožný - $P_{zv} = 9,4 \text{ kW}$.

Hodnota součinitele C_x pro jeden vůz ze soustavy například 20 vozů je definována

vztahem:

$$C_x = \frac{\sum C_{xi}}{n} = \frac{C_{x1} + (n - 1) \cdot C_{x2} + C_{x3}}{n} = \frac{0,7 + (20 - 1) \cdot 0,2 + 0,3}{20} = 0,24 \quad [-] \quad (4.15)$$

kde:

C_{x1} = součinitel tvaru pro přední čelo prvního vozidla v soupravě [-],

C_{x2} = součinitel tvaru pro mezi vozový přechod [-],

C_{x3} = součinitel tvaru pro zadní čelo posledního vozidla v soupravě [-].

Kvadratický člen měrného vozidlového odporu pro 1 vůz z modelové soupravy o celkovém počtu 20 vozů:

$$c = \frac{p_{ae}}{m \cdot g \cdot v^2} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot \left(\frac{v}{3,6}\right)^2}{m \cdot g \cdot v^2} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S}{m \cdot g \cdot 3,6^2} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 0,24 \cdot 11,5}{88 \cdot 9,81 \cdot 3,6^2} = 0,000148 \quad [\text{N/kN}/(\text{km/h})] \quad (4.16)$$

Pro rychlost 40 km/h se velikost měrného vozidlového odporu jednoho solárního vozidla ze soupravy 20 vozů vyjádří:

$$p_o = a + c \cdot v^2 = 1 + 0,000148 \cdot 40^2 = 1,24 \quad [\text{N/kN}] \quad (4.17)$$

V porovnání s velikostí vozidlového odporu samostatného solárního vozidla o rychlosti 40 km/h se jedná o hodnotu o 62 % nižší:

$$1,24 < 1,99 \quad (4.18)$$

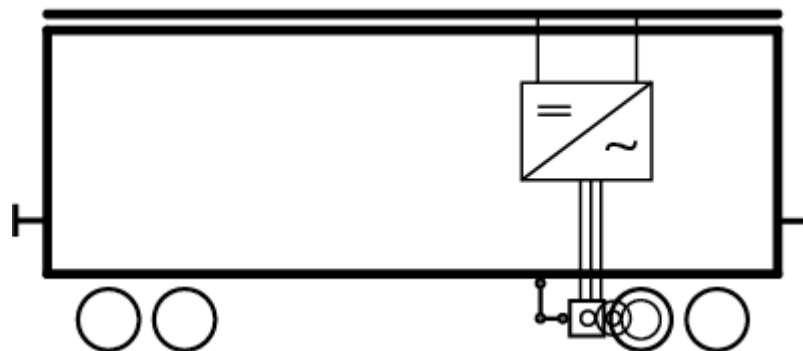
Z výše uvedeného je zřejmé, že vytvoření vlaku (při jízdě jsou ostatní vozy za prvním vozem v zákrytu) snižuje ve srovnání s jízdou samostatných vozů měrný vozidlový odpor železničního vozidla a tedy i spotřebu energie, z čehož plyne přednost vozů jedoucích ve skupině.

Další výhodou tohoto uspořádání solárně napájeného vlaku je absence lokomotivy, čímž se snižuje neúčinná zátěž vlaku, a tedy mohou všechna vozidla ve skupině přepravovat náklad.

Díky těmto kladům byl namísto tradičního uspořádání – netrakovní nákladní vozidla tažená lokomotivou – navržen prototyp solárně poháněného vlaku sestávající se z nákladních autonomních vozů jedoucích v soupravě.

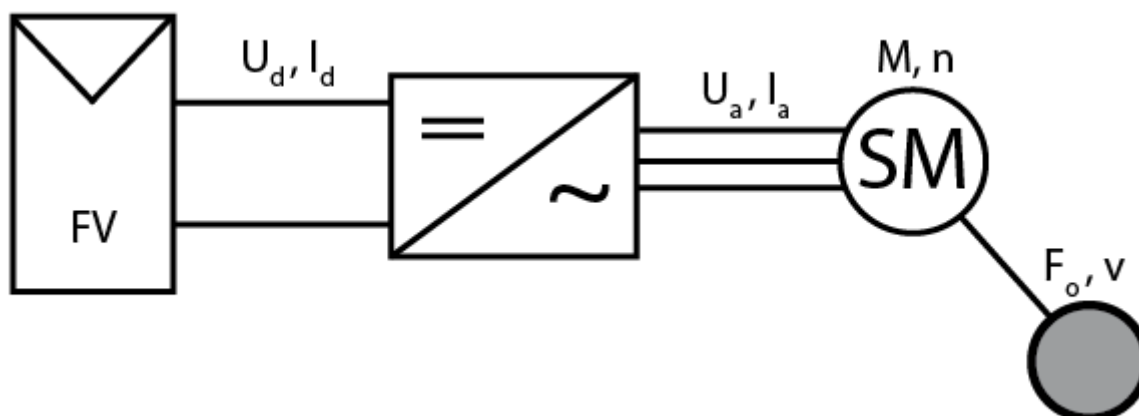
5 Uspořádání trakčního pohonu železničního vozidla s přímým solárním zdrojem elektrické energie

Fotovoltaickými panely přímo napájené železniční vozidlo disponuje vlastním fotovoltaickým zdrojem elektrické energie, napěťovým střídačem, synchronním motorem s permanentními magnety a trakční převodovkou (obr. 5.1).



Obr. 5.1 Rozmístění jednotlivých komponentů pohonu na solárním vozidle

Výstupem fotovoltaického zdroje na střeše vozu je stejnosměrné napětí a proud (U_d, I_d) vstupující do střídače, který tyto veličiny transformuje na třífázové střídavé napětí a proud (U_a, I_a) napájející synchronní motor s permanentními magnety. Trakční motor vyvíjí na hřídeli s otáčkami n moment síly M . Hřídel motoru za pomoci trakční převodovky pohání železniční dvojkolí danou tažnou silou na obvodu kola F_o . Nastíněnou závislost znázorňuje následující obrázek.



Obr. 5.2 Blokové schéma přenosu výkonu

Při přenosu výkonu fotovoltaického zdroje na dvojkolí vozidla dochází ke ztrátám, které se projevují na celkové účinnosti přenosu výkonu. Platí vztah:

$$\eta_p = \frac{\eta_{m\acute{e}n} \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{p\acute{r}}}{10^6} \quad [-] \quad (5.1)$$

kde:

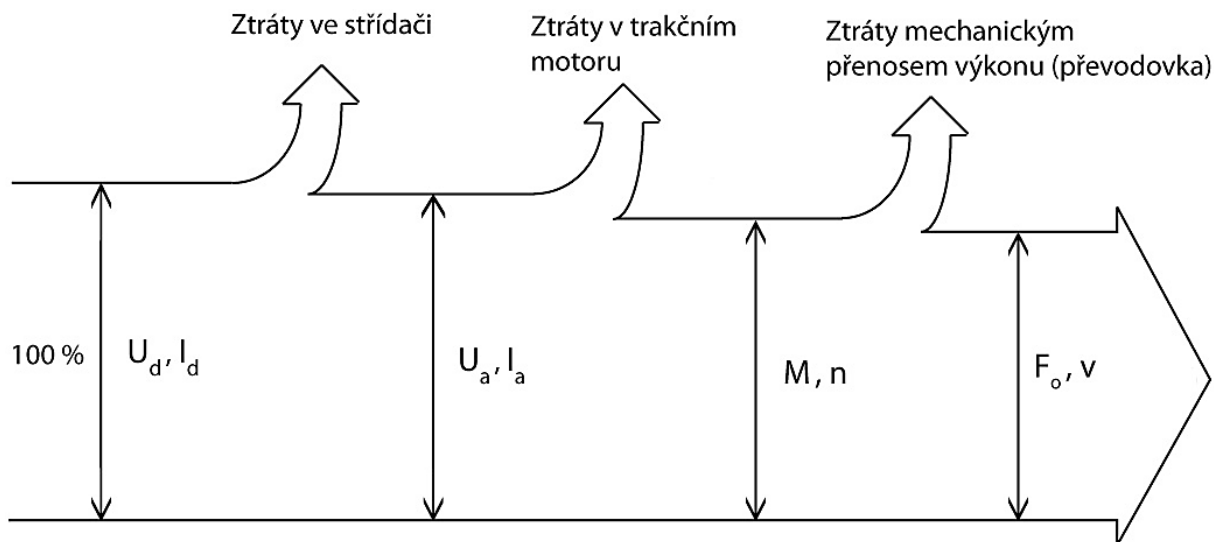
η_p = účinnost přenosu výkonu fotovoltaických panelů na železniční dvojkolí [%],

$\eta_{m\acute{e}n}$ = účinnost polovodičového střídače [%],

η_{mot} = účinnost trakčního motoru [%],

$\eta_{př}$ = účinnost mechanického přenosu výkonu na hnací kolo [%].

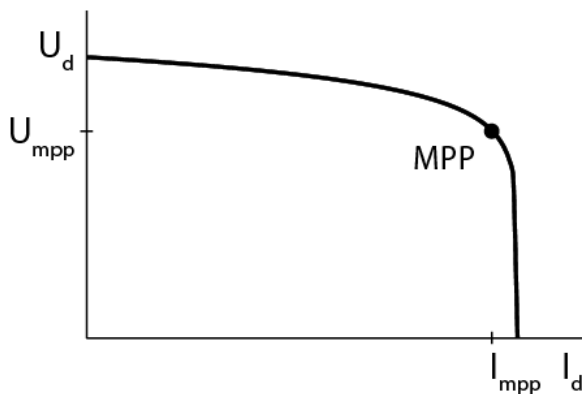
Tyto dílčí ztráty a transformace souřadnic jednotlivých soustav znázorňuje obr. 5.3.



Obr. 5.3 Ztráty při přenosu výkonu ze solárních panelů

5.1 Stejnoseměrné napětí a proud fotovoltaického zdroje – U_d , I_d

Fotovoltaické panely na střeše vozu transformují energii slunečního záření na energii elektrickou - stejnosměrné napětí a proud. Závislost tohoto proudu na napětí graficky vyjadřuje voltampérová charakteristika fotovoltaického zdroje, graf 5.1.



Graf. 5.1 Voltampérová charakteristika fotovoltaického zdroje

Bod MPP (Maximum Power Point) udává maximální výkon fotovoltaického zdroje odpovídající dané intenzitě slunečního osvětlení a teplotě článků.

Tomuto výkonu odpovídají napěťové a proudové souřadnice (I_{mpp} , U_{mpp}), obvykle uváděné spolu s výkonem MPP v katalogích. Pro maximální výkon platí vztah:

$$P_{max} = P_{mpp} = U_{mpp} \cdot I_{mpp} \quad [W] \quad (5.2)$$

Pro plné využití výkonu fotovoltaického článku je žádoucí, aby článek pracoval v bodě maximálního výkonu - tedy aby pracovní bod fotovoltaického článku kopíroval polohu bodu MPP. Jakékoliv vychýlení pracovního bodu z této polohy s sebou nese pokles výkonu na výstupu článku. Poloha pracovního bodu závisí na vlastnostech spotřebiče [17,24].

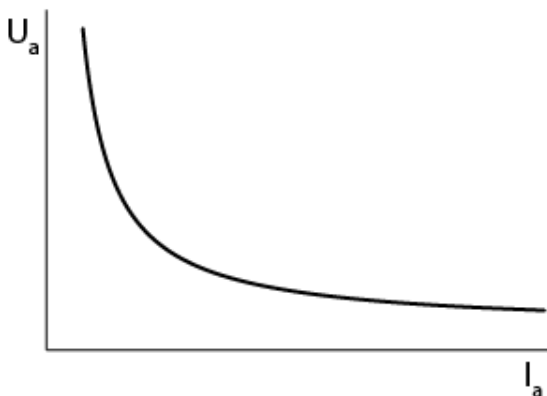
Pokud je na elektrický výstup fotovoltaických článků připojen statický střídač, je z hlediska maximalizace využitelného výkonu článku vhodné, aby střídač sledoval polohu bodu MPP a článek tak byl v optimálním pracovním bodě. U komerčních střídačů používaných v oblasti fotovoltaické výroby energie plní tuto funkci tzv. sledovače MPP.

5.2 Sdružené třífázové střídavé napětí a proud na výstupu střídače – U_a , I_a

Stejnoseměrné napětí a proud fotovoltaického zdroje jsou napěťovým střídačem transformovány na sdružené třífázové střídavé napětí a proud napájející trakční pohon vozidla – synchronní motor s permanentními magnety. Pracovní bod fotovoltaického článku definovaný souřadnicemi U_d , I_d je tedy střídačem transformován do souřadnic U_a , I_a . Při dané velikosti výkonu fotovoltaického zdroje, resp. střídače, závisí velikost výstupní proudu střídače na velikosti napětí střídače, dle vztahu:

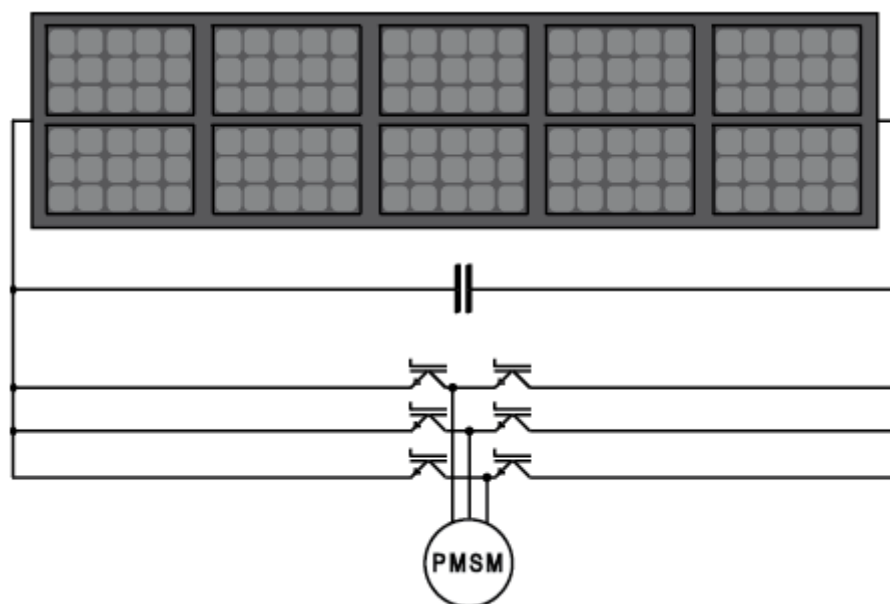
$$I = \frac{P}{U} \quad [A] \quad (5.3)$$

Průběh sdruženého napětí a proudu při daném výkonu je tedy hyperbolický, jak znázorňuje graf 5.2.



Graf. 5.2 Sdružené třífázové střídavé napětí a proud na výstupu střídače

Zjednodušené schéma elektrického zapojení fotovoltaického zdroje na střeše vozu, spínacích prvků střídače a trakčního motoru znázorňuje obrázek 5.4.

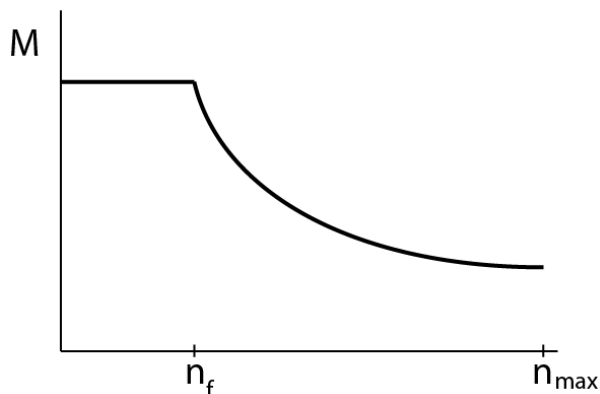


Obr. 5.4 Zjednodušené schéma zapojení elektrických prvků přenosu výkonu

5.3 Moment síly a otáčky trakčního motoru – M , n

Pro pohon solárně napájeného železničního vozidla byl zvolen synchronní motor s permanentními magnety z důvodu vysoké účinnosti (nemá ztráty v budícím vinutí rotoru), nízkých rozměrů i nízké hmotnosti.

Třífázový synchronní motor s permanentními magnety je v tomto případě napájen efektivní hodnotou první harmonické složky sdruženého napětí generovaného střídačem. Přiváděním trojfázového proudu do satorového vinutí synchronního motoru vzniká točivé magnetické pole, které s sebou unáší rotor sestávající se z permanentních magnetů. Po roztočení motoru jsou otáčky rotoru přesně synchronní s točivým magnetickým polem (tzv. synchronní otáčky). Trakční motor na své hřídeli vyvíjí moment síly M (označovaný také jako točivý či kroutící moment), jehož velikost závisí na otáčkách (n) hřídele motoru. Následující charakteristika (graf. 5.3) znázorňuje typický průběh momentu v závislosti na otáčkách synchronního motoru s permanentními magnety. Točivý moment je konstantní do otáček n_f , v rozsahu otáček s oslabeným odbuzením (nad hodnotu n_f) klesá točivý moment motoru nepřímo úměrně s otáčkami.



Graf. 5.3 Typický průběh moment síly synchronního motoru s permanentními magnety

5.4 Tažná síla na obvodu kol a rychlost vozidla – F_o , v

Moment síly jednoznačně charakterizuje otáčivý účinek síly působící na obvodu kola – tzv. tažná síla na obvodu kol (F_o). Vyjádří jako velikost momentu síly k velikosti poloměru kola:

$$F_o = \frac{M}{R} \quad [N \cdot m] \quad (5.4)$$

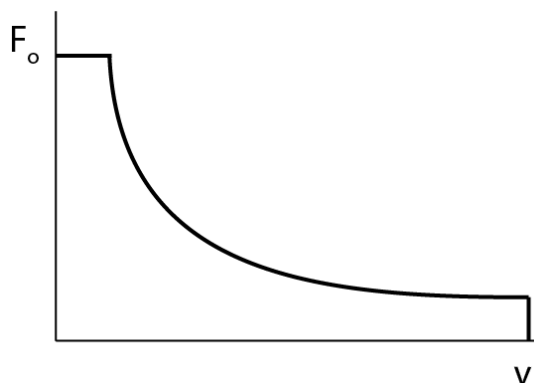
Použití převodovky umožňuje znásobit moment síly na obvodu kol, zároveň však snižuje celkovou účinnost přenosu výkonu na kolo. V případě použití převodovky s účinností η a převodovým poměrem (i) se síla na obvodu kol vyjádří jako:

$$F_o = \frac{M \cdot i \cdot \eta}{R} \quad [N] \quad (5.5)$$

Okamžitou rychlost vozidla lze při znalosti velikosti průměru železničního kola, převodovém poměru a otáček motoru definovat:

$$v = \frac{n \cdot 0,06 \cdot \pi \cdot D}{i} \quad [km/h] \quad (5.6)$$

Závislost momentu na otáčkách motoru je tedy možné jednoduše transformovat na závislost tažné síly na obvodu kol a rychlosti vozidla. Průběh tažné síly na obvodu kol v závislosti na rychlosti vozidla znázorňuje graf 5.4.



Graf 5.4 Průběh síly a rychlosti železničního vozidla

V této kapitole byl vysvětlen princip přímého napájení solárního vozidla a přenos výkonu z fotovoltaických panelů na železniční dvojkolí. Je zřejmé, že při každé z dílčích transformací energie dochází ke ztrátám, které snižují účinnost pohonu a velikost tažné síly na obvodu kola. Proto je žádoucí používat jednotlivé prvky přenosu výkonu s co možná nejvyšší účinností. Konkrétní parametry solárního vozidla a jeho jednotlivých komponentů včetně účinností prvků přenosu udává následující kapitola.

6 Projekční studie železničního vozidla s přímým solárním zdrojem elektrické energie

V této kapitole jsou blíže specifikovány parametry solárního vozidla, které bylo obecně definováno v předchozích kapitolách. Na tomto místě jsou uvedeny výpočty parametrů fotovoltaického zdroje, napěťového střídače a trakčního motoru vozidla. Dále kapitola obsahuje charakteristiky konkrétního solárního vozidla, jeho obvodové schéma a typový výkres solárního vozidla.

6.1 Návrh fotovoltaického zdroje na střeše vozidla

6.1.1 Rozměry solárního vozidla

- Délka vozu, L 16,04 m
- Šíře vozu, b 3,08 m

6.1.2 Rozměry fotovoltaického panelu Sunpower E19 / 320

- Délka panelu, L_p 1,046 m
- Šíře panelu, b_p 1,559 m
- Plocha panelu, S_p 1,63 m²

6.1.3 Rozměry fotovoltaického zdroje na střeše vozidla

- Počet panelů na délku vozu, N_L 15
- Počet panelů na šíři vozu, N_b 2
- Celkový počet panelů na střeše vozu

$$N_c = N_L \cdot N_b = 15 \cdot 2 = 30 \quad (6.1)$$

- Délka fotovoltaického zdroje (při uvažování nosníku na střeše vozu pro upevnění panelů)

$$L_z = N_L \cdot L_p = 15 \cdot 1,046 = 15,69 \text{ m} \quad (6.2)$$

- Šíře fotovoltaického zdroje

$$b_z = N_b \cdot b_p = 2 \cdot 1,559 = 3,12 \text{ m} \quad (6.3)$$

- Plocha fotovoltaického zdroje

$$S_z = L_z \cdot b_z = 15,69 \cdot 3,12 = 49 \text{ m}^2 \quad (6.4)$$

6.1.4 Sérioparalelní zapojení fotovoltaických panelů

Existuje množství způsobu zapojení fotovoltaických panelů a měničů. Panely mohou být spojeny čistě sériově, paralelně, sérioparalelně, do tzv. sub-polí, či způsobem master-slave, kdy se s rostoucí intenzitou osvětlení do obvodu automaticky zapojují jednotlivé střídače. Další možností je, že je každý fotovoltaický panel vybaven vlastním měničem. Jednotlivá zapojení panelů mají samozřejmě své výhody a nevýhody.

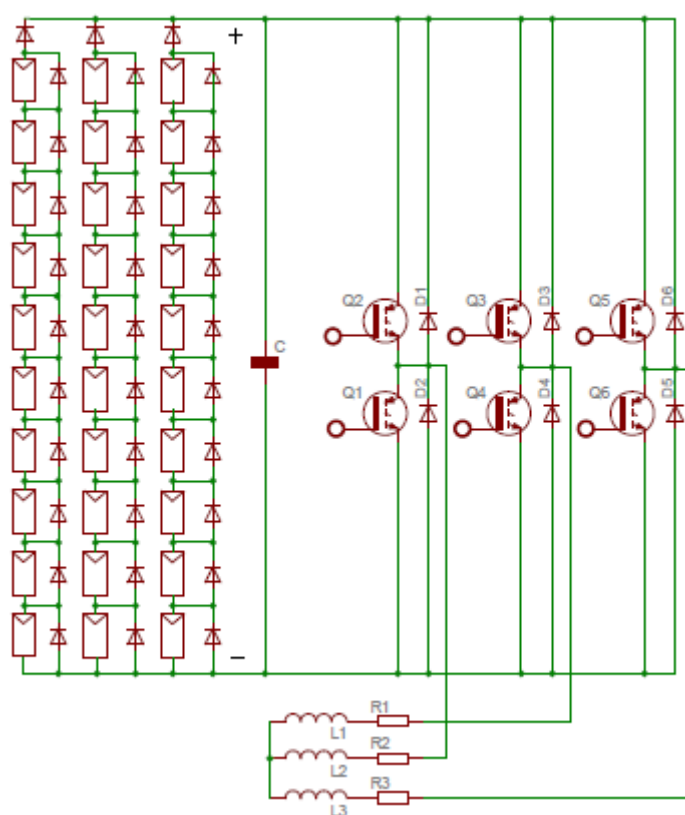
V této práci je navrženo sérioparalelní zapojení fotovoltaických panelů a to z důvodu absence stejnosměrného měniče v obvodu, což se pozitivně odráží na účinnosti celku.

Fotovoltaický zdroj se skládá ze 3 paralelně zapojených identických větví (řetězců). Jedna

větev je tvořena 10 panely zapojenými do série. V každé větvi je sériově zapojena blokovácí dioda a všechny panely jsou vybaveny antiparalelně zapojenými překlenovacími diodami.

U tohoto sérioparalelního způsobu zapojení je třeba dbát na to, aby v každé větvi byly zapojeny pouze panely se stejnou orientací a úhlem natočení. Přičemž všechny panely musí být nezastíněné pevnou překážkou - například sloupem. Panely by zároveň měly mít pro chod v sérii stejné výstupní parametry, měli by být stejného typu a stejného stáří (z důvodu omezení vzniku vyrovnávacích proudů mezi větvemi). V České Republice je takto provozován například fotovoltaický systém Křižanov o výkonu 1MW (vždy 14 panelů ve větvi, dvě tyto větve připojeny na jeden střídač).

Elektrické schéma zapojení fotovoltaických panelů, oddělovacích a překlenovacích diod, napěťového střídače (sestavujícího se z IGBT tranzistorů a zpětných diod), náhradních odporů a indukčností jednotlivých fází statoru synchronního motoru znázorňuje obr. 6.1



Obr. 6.1 Schéma napájení pohonu solárního vozu o ploše panelů 49 m²

6.1.5 Překlenovací a blokovácí diody, vliv stínění

V případě zastínění či poškození článků fotovoltaického panelu by mohl proud ostatních panelů v řetězci tento panel nenávratně zničit. Z toho důvodu se používají překlenovací diody, které zastíněné fotovoltaické články přemostí, čímž však klesne výstupní výkon solárního zdroje.

Také blokovácí dioda zapojená v každé větvi brání - v případě zastínění některého z panelů ve větvi - poškození panelů ve větvi. Při zastínění má větev nižší napětí než ostatní větve. Vyrovnávací proud mezi větvemi by mohl zastíněnou větev poškodit. Tomu zabrání blokovácí dioda, která při rozdílu napětí oddělí větev od ostatních větví. V takovém případě větev nedodává výkon do střídače.

Ztráty překlenovacích a blokovacích diod

Překlenovacími diodami teče elektrický proud pouze při zastínění panelu, a tedy je možné

(pro další výpočty) jejich ztráty zanedbat.

Blokovacími diodami teče elektrický proud trvale. V případě použití Schottkyho diody například typu MBR1635 činí ztráty při protékajícím proudu 6 A pouze 2,5 W (dle katalogu výrobce International Rectifier), což je v přepočtu pouze 0,08 % výkonu větve. Vzhledem k velikosti lze v dalších výpočtech tyto ztráty zanedbat.

Vliv stínění

U přímo poháněného solárního vozidla se výše popsané oddělení zastíněné větve blokovací diodou vyskytuje pouze v ojedinělých případech. Již z principu přímo poháněného solárního vozidla totiž vyplývá nezbytnost jeho provozu na nezastíněné trati. Případné výjimečné snížení výkonu fotovoltaického zdroje z důvodu zastínění (např. stromy, sloupy) není vzhledem k měnící se poloze vozu příliš významné. Mračna nejsou obecně v problematice fotovoltaických systémů považována za zdroj „stínu“. V literatuře je uvažován pouze jejich vliv na celkovou intenzitu dopadajícího záření, který je popsán v první kapitole.

V případě, že by na železniční trati byly z hlediska stínění nepříznivé podmínky (budovy, stromy aj.), bylo by výhodnější využít zapojení nižšího počtu panelů ve větvi. Každá taková větev by měla vlastní stejnosměrný měnič, jehož výstup by byl zapojený do stejnosměrné sběrnice připojené na vstup střídače. Tím by byly ztráty stíněním značně sníženy.

6.1.6 Parametry sérioparalelního zapojení fotovoltaických panelů na střeše vozidla

- Počet panelů zapojených do série ve větvi, N_s 10
- Počet větví zapojených paralelně, N_p 3
- Proud panelu E19 / 320, I_{mpp} 5,86 A
- Napětí panelu E19 / 320, U_{mpp} 54,7 V

- Jmenovité napětí fotovoltaického zdroje

$$U_d = N_s \cdot U_{mpp} = 10 \cdot 54,7 = 547 \text{ V} \quad (6.5)$$

- Jmenovitý proud fotovoltaického zdroje

$$I_d = N_p \cdot I_{mpp} = 3 \cdot 5,86 = 17,6 \text{ A} \quad (6.6)$$

- Jmenovitý výkon fotovoltaického zdroje

$$P_d = U_d \cdot I_d = 547 \cdot 17,6 = 9,6 \text{ kW} \quad (6.7)$$

6.2 Napěťový střídač

Uvažován napěťový střídač s 6 IGBT tranzistory 4. generace (typové značení IRG4PC40WPbF). Vstupní stejnosměrné napětí je uvažováno jmenovité o hodnotě 547 V, jmenovitý proud fotovoltaického zdroje je 17,6 A.

6.2.1 Parametry tranzistoru IRG4PC40WPbF

- $U_{CES} = 600 \text{ V}$,
- $U_{CE(sat)} = 2,05 \text{ V}$ při $U_{GE} = 15 \text{ V}$ a $I_C = 20 \text{ A}$

kde:

$U_{CE(sat)}$ = saturační napětí kolektor-emitor tranzistoru [V],

U_{GE} = prahové napětí řídicí elektrody [V],

I_C = proud kolektorem tranzistoru [A].

6.2.2 Dynamické ztráty IGBT tranzistoru

Celkové ztráty střídače se skládají ze ztrát vedením proudu polovodičovou součástí, z dynamických ztrát spínacích prvků a ztrát v řídicích a ochranných obvodech. V následujících výpočtech budou zjednodušeně uvažovány pouze ztráty vedením proudu tranzistory a ztráty spínáním tranzistorů. Ostatní druhy ztrát je možné vzhledem k jejich velikosti zanedbat.

Celkový výkon je definován jako:

$$P_{celk} = \frac{U_d}{2} \cdot I_c = 273,5 \cdot 20 = 5\,470\,W \quad (6.8)$$

Ztráty spínací P_{on} a vypínací P_{off} pro jeden tranzistor jsou zjednodušeně dány vztahem (hodnoty pro teplotu 150 °C):

$$\begin{aligned} P_{dyn} &= P_{on} + P_{off} = \frac{U_d}{2} \cdot I_c \cdot (t_{on} + t_{off}) \cdot f_s = \\ &= 273,5 \cdot 20 \cdot (2,3 \cdot 10^{-8} + 124 \cdot 10^{-8}) \cdot 3000 = 2,4\,W \end{aligned} \quad (6.9)$$

kde

f_s = spínací frekvence tranzistoru [Hz].

Měrné ztráty tranzistoru při uvažování pouze dynamických ztrát:

$$p_d = \frac{P_{dyn}}{P_{celk}} = \frac{2,4}{5\,470} = 0,00044 \approx 0,044\% \quad (6.10)$$

6.2.3 Propustný úbytek IGBT tranzistoru

Ztráty tranzistoru v sepnutém stavu:

$$P_s = U_{ce(sat)} \cdot I_c = 2,05 \cdot 20 = 41\,W \quad (6.11)$$

Měrné ztráty tranzistoru při uvažování pouze propustného úbytku:

$$p_{pu} = \frac{P_s}{P_{celk}} = \frac{U_{ce(sat)}}{\frac{U_d}{2}} = \frac{2,05}{273,5} = 0,0075 \approx 0,75\% \quad (6.12)$$

Celkové měrné ztráty střídače lze vyjádřit jako:

$$p = N_c \cdot p_d + N_v \cdot p_{pu} = 6 \cdot 0,044 + 2 \cdot 0,75 = 1,8\% \approx 2\% \quad (6.13)$$

kde:

N_c = celkový počet tranzistorů.

6.2.4 Výstupní napětí střídače

Maximální efektivní hodnota 1. harmonické složky sruženého výstupního napětí střídače bude při šířkově pulzně modulovaném řízení se složkou o trojnásobném kmitočtu dána vztahem:

$$U_a = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_d = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 547 = 388\,V \quad (6.14)$$

Následující schéma zobrazuje fotovoltaický zdroj stejnosměrného napětí, napěťový střídač

transformující vstupní stejnosměrné napětí na výstupní 3 fázové střídavé napětí a trakční motor s mechanickým přenosem výkonu na železniční dvojkolí.

6.3 Návrh pohonu železničního vozu

Při návrhu pohonu byl uvažován vůz o délce 16 m a šíři 3,08 m s fotovoltaickým zdrojem o délce 15,69 m, šíři 3,12 m a ploše 49 m². Vůz těchto rozměrů disponuje vyšší hodnotou měrné hmotnosti loženého vozidla (například oproti vozu o délce skříně 23 m) a zároveň širě fotovoltaického zdroje na střeše vozu nepřesahuje hodnotu obrysu pro vozidla.

6.3.1 Volba převodu

Vstupní hodnoty

- Maximální otáčky synchronního motoru, n_{max} 3 000 min⁻¹
- Maximální rychlost prázdného vozidla, v_{max} 60 km/h
- Maximální rychlost loženého vozidla, 40 km/h
- Průměr nového dvojkolí 920 mm
- Průměr dvojkolí při středním opotřebení, D 880 mm

Převodový poměr je definován jako:

$$i = \frac{0,06 \cdot \pi \cdot D \cdot n_{max}}{v_{max}} = \frac{0,06 \cdot \pi \cdot 0,88 \cdot 3\,000}{60} = 8,29 \quad [-] \quad (6.15)$$

Při návrhu převodovky musí být dodrženo pravidlo:

$$Z_p > Z_{p\,min} \quad (6.16)$$

kde:

$Z_{p\,min}$ = minimální počet zubů pastorku (13 – 15),

Z_p = počet zubů pastorku, voleno $Z_p = 15$.

Vzhledem k vysoké hodnotě vyjádřeného převodového poměru, pro který by bylo nutné použít příliš rozměrné převodové kolo, není vhodné využití prostého jednostupňového ozubeného převodu. Z toho důvodu je volena dvoustupňová trakční převodovka, pro jejíž převodový poměr platí vztah:

$$i = i_1 \cdot i_2 = \frac{Z_{v1}}{Z_p} \cdot \frac{Z_k}{Z_{v2}} \quad [-] \quad (6.17)$$

kde:

i_1, i_2 = dílčí převodové poměry [-],

Z_{v1}, Z_{v2} = počet zubů vložených ozubených kol [-],

Z_k = počet zubů velkého ozubeného kola [-].

Jednotlivé dílčí převodové poměry lze, po vyjádření z výše uvedeného vztahu, psát:

$$i_1 = \frac{Z_{v1}}{Z_p} = \frac{42}{15} = 2,8 \quad [-] \quad (6.18)$$

$$i_2 = \frac{i}{i_1} = \frac{8,29}{2,8} = 2,96 \approx \frac{44}{15} \quad [-] \quad (6.19)$$

Celková účinnost převodovky vychází z účinností dílčích převodů:

$$\eta_{př} = \eta_1 \cdot \eta_2 = 0,98 \cdot 0,98 = 0,96 \quad [-] \quad (6.20)$$

6.3.2 Výpočet tažné síly na obvodu kol

Vstupní hodnoty

- Maximální tažná síla na obvodu kol, $F_{o \max}$ 5,5 kN
- Jmenovitá tažná síla na obvodu kol, $F_{o \infty}$ 3,7 kN
- Trakční výkon na obvodu kol (při intenzitě dopadajícího záření $E = 1000 \text{ W/m}^2$)

$$P_o = P_d \cdot \eta_{st} \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{př} = 9,6 \cdot 0,98 \cdot 0,93 \cdot 0,96 = 8,4 \text{ kW} \quad (6.21)$$

kde:

η_{st} = účinnost polovodičového střídače [-]

η_{mot} = účinnost trakčního motoru [-],

$\eta_{př}$ = účinnost mechanického přenosu výkonu na hnací kolo [-].

Maximální tažná síla na obvodu kol byla vypočtena z následujícího vztahu při uvažování:

- loženého vozu o hmotnosti 88 tun s počátečním zrychlením $0,05 \text{ m/s}^2$:

$$\begin{aligned} F_{o \max} &= m \cdot g \cdot p_{o(v=0)} + (m + m_r) \cdot a = \\ &= 88 \cdot 9,81 \cdot 0,001 + (88 + 3) \cdot 0,05 = 5,5 \text{ kN} \end{aligned} \quad (6.22)$$

- prázdného vozu o hmotnosti vozu 27 tuny s počátečním zrychlením $0,17 \text{ m/s}^2$:

$$\begin{aligned} F_{o \max} &= m \cdot g \cdot p_{o(v=0)} + (m + m_r) \cdot a = \\ &= 27 \cdot 9,81 \cdot 0,001 + (27 + 3) \cdot 0,17 = 5,5 \text{ kN} \end{aligned} \quad (6.23)$$

Maximální tažná síla na obvodu kol je uvažována jako 1,5 násobek trvalé tažné síly, která je tedy:

$$F_{o \infty} = \frac{F_{o \max}}{p} = \frac{5,5}{1,5} = 3,7 \text{ kN} \quad (6.24)$$

Závislost mezi trakčním výkonem na obvodu kola, tažnou silou na obvodu kola a rychlostí vozidla je obecně definována vztahem:

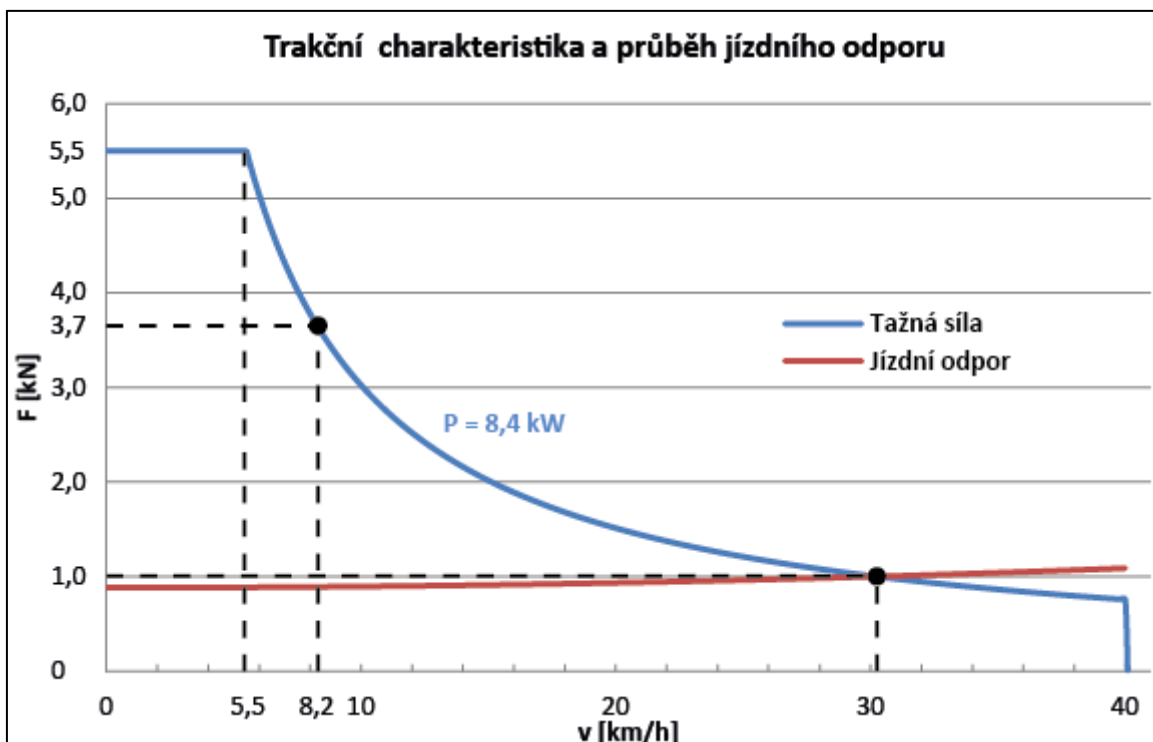
$$P_o = \frac{F_o \cdot v}{3,6} \quad (6.25)$$

Po vyjádření rychlosti vozidla z uvedeného vztahu a dosazení hodnot za P_o a $F_{o \max}$ lze psát:

$$v = \frac{P_o \cdot 3,6}{F_{o \max}} = \frac{8,4 \cdot 3,6}{5,5} = 5,5 \text{ km/h} \quad (6.26)$$

Obdobně je možné rychlost vozidla definovat pro jmenovitou tažnou sílu na obvodu kol:

$$v = \frac{P_o \cdot 3,6}{F_{o \infty}} = \frac{8,4 \cdot 3,6}{3,7} = 8,2 \text{ km/h} \quad (6.27)$$



Graf. 6.1 Průběh tažné síly na obvodu kol a jízdního odporu loženého vozidla (při intenzitě dopadajícího záření $E = 1000 \text{ W/m}^2$)

6.3.3 Volba počtu poháněných dvojkolí

Měrná adhezní tažná síla (adhezní náročnost) je při pohonu jednoho dvojkolí definována:

- pro ložený vůz o hmotnosti 88 tun:

$$f_{adh\ lo} = \frac{F_o\ max}{m_a \cdot g} = \frac{5,5}{\frac{88}{4} \cdot 9,81} = 0,025 \quad [kN/kN] \quad (6.28)$$

kde:

m_a = adhezní hmotnost [t]. Jedná se o hmotnost železničního vozidla, která tíhově působí na trakční dvojkolí vozidla.

- pro prázdný vůz o hmotnosti 27 tuny:

$$f_{adh\ pr} = \frac{F_o\ max}{m_a \cdot g} = \frac{5,5}{\frac{27}{4} \cdot 9,81} = 0,083 \quad [kN/kN] \quad (6.29)$$

Při volbě počtu poháněných náprav je zapotřebí dodržet obecnou podmínku:

$$f_{adh} < \mu \quad (6.30)$$

kde:

μ = součinitel adheze [-], pohybuje se při ideálních podmínkách nad hodnotou 0,4 a při nepříznivých podmínkách kolem 0,1 (například listí, námraza). Pro následující porovnání je volena hodnota 0,1.

Po dosazení hodnoty měrné adhezní tažné síly (pro prázdný vůz) do vztahu je patrné splnění podmínky a tedy postačuje pohon jednoho dvojkolí vozidla (pojezd 2'1A0'):

$$0,083 < 0,1 \quad (6.31)$$

6.3.4 Potřebný moment síly a výkon motoru

Jmenovitá (trvalá) trakční síla na obvodu kol je definována jako:

$$F_{o\infty} = \frac{N \cdot M_{\infty} \cdot i \cdot \eta}{\frac{D}{2}} \quad [N] \quad (6.32)$$

kde:

N = počet hnaných náprav [-],

M_{∞} = jmenovitý moment trakčního motoru [Nm].

Následující vztah je vyjádřením jmenovitého momentu síly motoru z předchozího vztahu:

$$M_{\infty} = \frac{F_{o\infty} \cdot \frac{D}{2}}{N \cdot i \cdot \eta} = \frac{3700 \cdot \frac{0,88}{2}}{1 \cdot 8,29 \cdot 0,96} = 205 \text{ Nm} \quad (6.33)$$

Maximální moment síly motoru lze definovat obdobně:

$$M_{max} = \frac{F_{o\max} \cdot \frac{D}{2}}{N \cdot i \cdot \eta} = \frac{5500 \cdot \frac{0,88}{2}}{1 \cdot 8,29 \cdot 0,96} = 304 \text{ Nm} \quad (6.34)$$

Jmenovité otáčky motoru se vyjádří jako:

$$n_{\infty} = \frac{v_{\infty} \cdot i}{0,06 \cdot \pi \cdot D} = \frac{8,2 \cdot 8,29}{0,06 \cdot \pi \cdot 0,88} = 410 \text{ min}^{-1} \quad (6.35)$$

Jmenovitý výkon motoru je definován výrazem:

$$P_{\infty} = \frac{M_{\infty} \cdot n_{\infty}}{\frac{30}{\pi}} = 8750 \text{ W} \approx 8,8 \text{ kW} \quad (6.36)$$

Respektive lze jmenovitý výkon motoru určit:

$$P_{\infty} = \frac{P_o}{\eta_{př}} = \frac{8400}{0,96} = 8750 \text{ W} \approx 8,8 \text{ kW} \quad (6.37)$$

Příkon motoru je dán poměrem jmenovitého výkonu a účinnosti motoru:

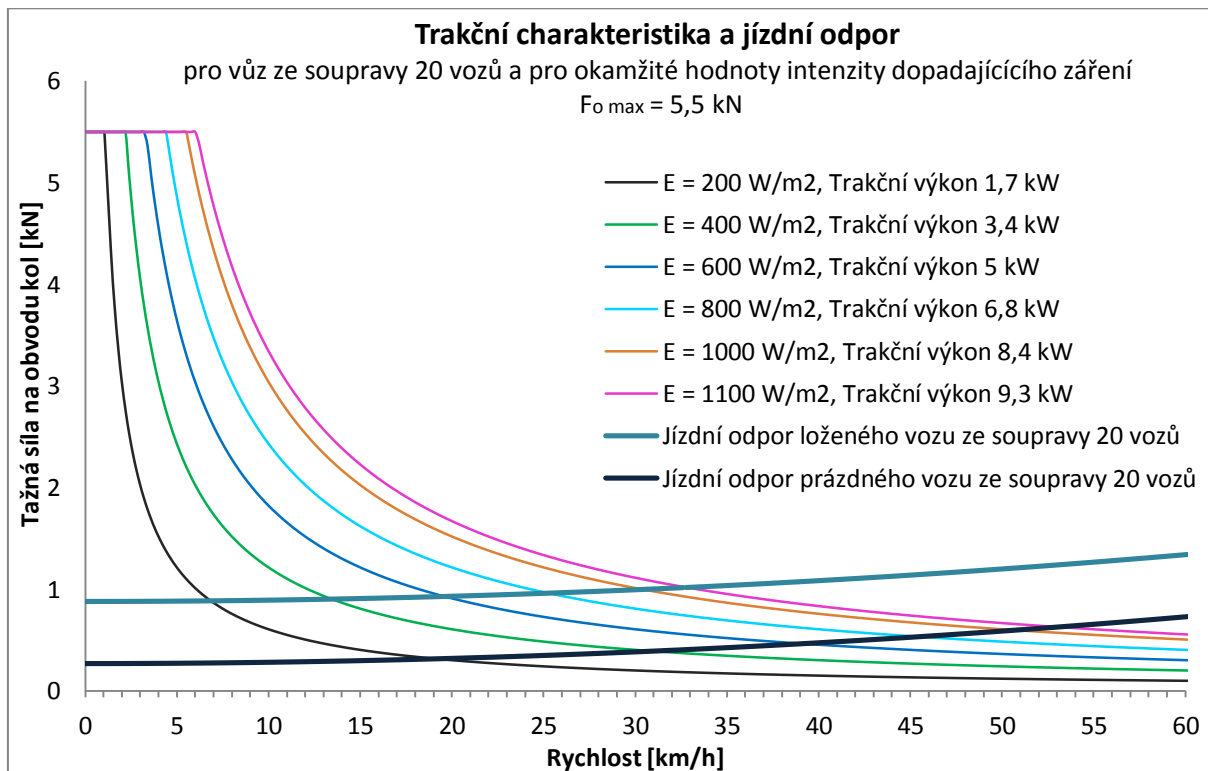
$$P_1 = \frac{P_{\infty}}{\eta_{poh}} = \frac{8750}{0,93} = 9408 \text{ W} \approx 9,4 \text{ kW} \quad (6.38)$$

6.4 Charakteristiky fotovoltaickými panely přímo napájeného vozidla

Na následujících diagramech jsou znázorněny charakteristiky modelového vlaku složeného z 20 totožných autonomních vozidel, každé je napájeno z fotovoltaických panelů o ploše 49 m². Hmotnost loženého vozidla je 88 tun, hmotnost prázdného vozidla je 27 tuny. Uvažovaný jízdní odpor se skládá pouze z vozidlového odporu, traťový odpor je uvažován o velikosti 0 ‰ (výjimkou je pouze případ s₀ - v diagramu).

6.4.1 Trakční charakteristika

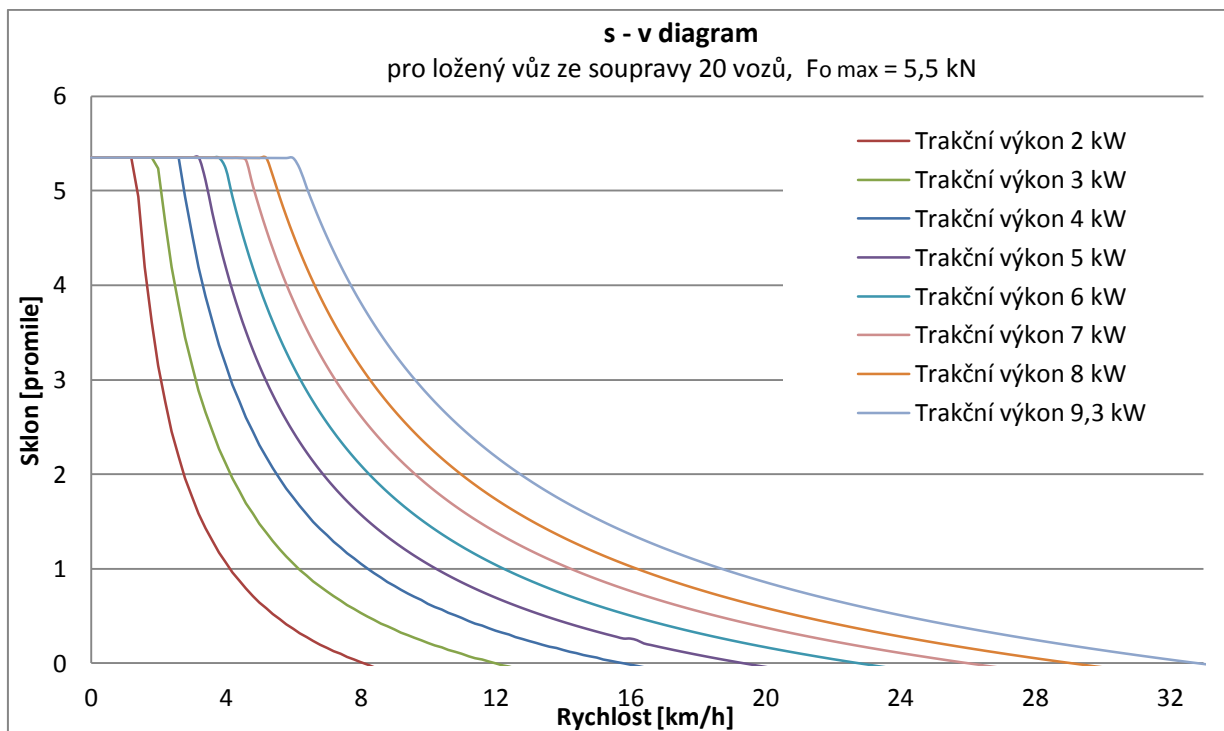
Průběh tažné síly v závislosti na rychlosti vozidla a na okamžité hodnotě dopadajícího slunečního záření je znázorněn spolu s průběhem jízdního odporu loženého a prázdného vozu na grafu 6.2. Rychlost loženého vozidla při intenzitě dopadajícího záření $1\ 100\ \text{W/m}^2$ (okamžitá hodnota) je 33 km/h. Rychlost prázdného vozidla činí za těchto podmínek 53 km/h.



Graf. 6.2 Trakční charakteristika vozidel s rozdílnou hmotností

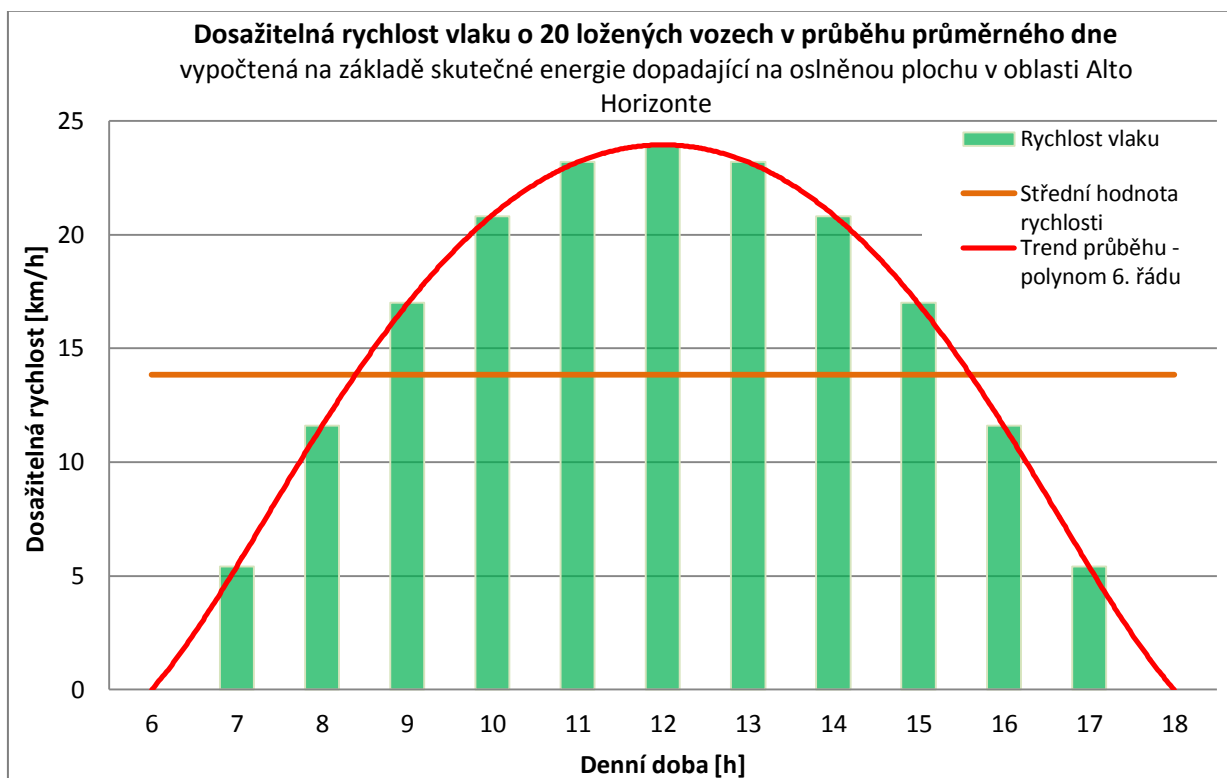
6.4.2 s_0 - v diagram

Graf 6.3 znázorňuje funkční závislost setrvačného sklonu a rychlosti vozidla při rozdílných velikostech trakčního výkonu. Setrvačný sklon je myšlený sklon definující velikost sklonu trati, při kterém se ustálí rychlost vozidla. Z průběhů je patrný značný vliv sklonu na dynamiku solárního vlaku.



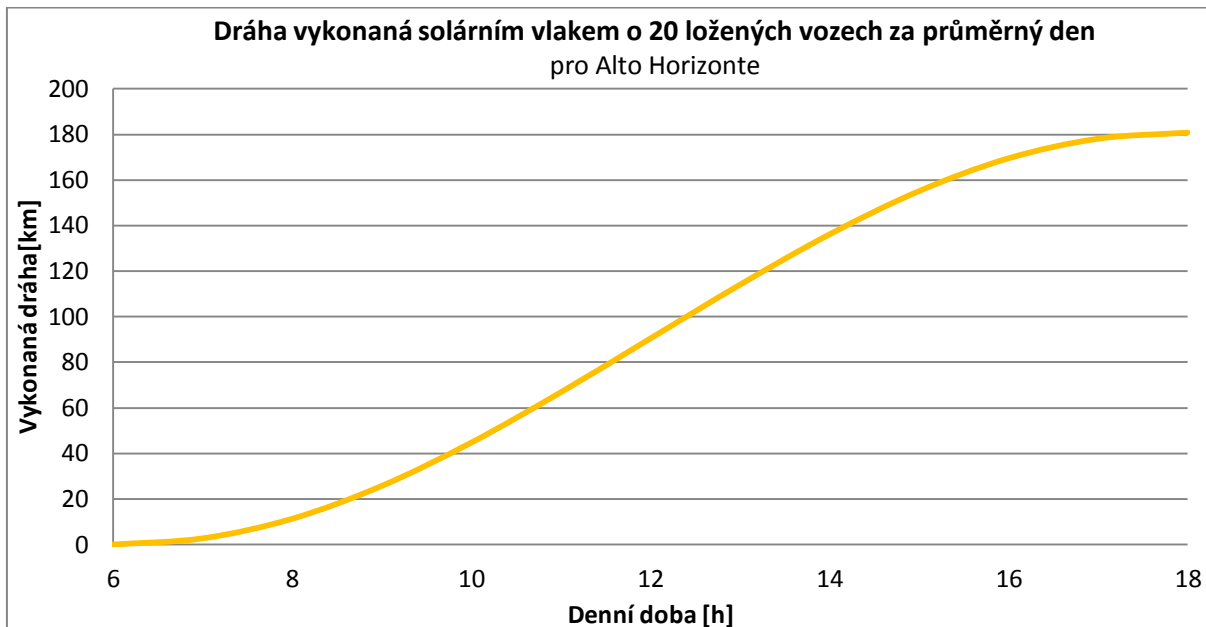
6.4.3 Dosažitelná rychlost vlaku během dne

V závislosti na změnách okamžité velikosti intenzity dopadajícího záření během dne se mění i dosažitelná rychlost vozidla přímo napájeného fotovoltaickými panely. Velikost dosažitelné rychlosti udává v jednohodinových intervalech graf 6.4.



6.4.4 Vykonaná dráha během dne

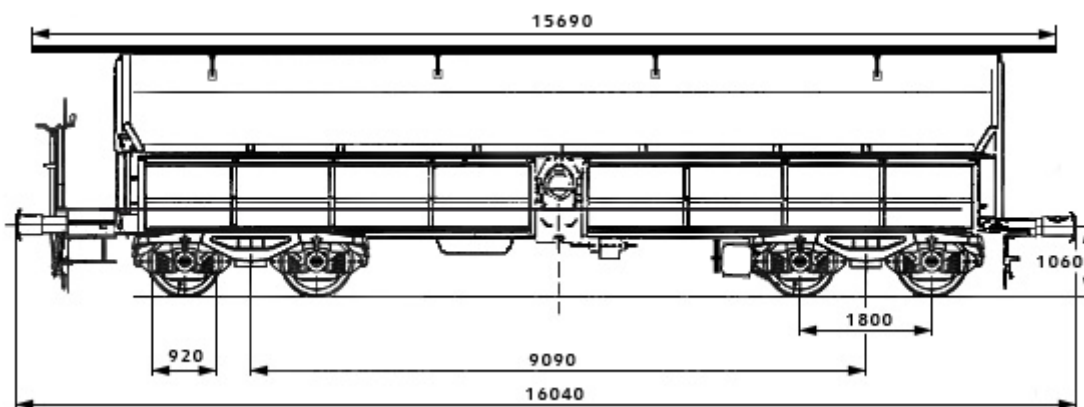
Průběh solárním vlakem vykonané vzdálenosti během průměrného dne znázorňuje následující charakteristika. Dojezd solárního vlaku za průměrný den o délce 12 hodin činí pro brazilskou lokaci Alto Horizonte 180 km.



Graf. 6.5 Dojezd solárního vlaku za průměrný den

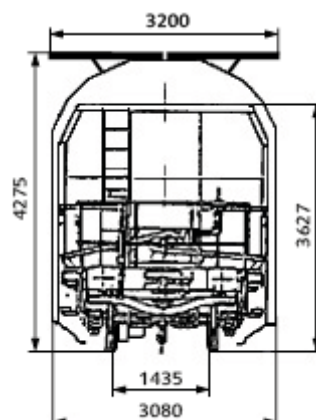
6.5 Typový výkres

Na následujícím obrázku je zobrazen typový výkres uvažovaného železničního vozidla přímo napájeného fotovoltaickými panely. Šíře nosníku fotovoltaického zdroje je navržena o velikosti 3200 mm, neboť je počítáno s mezerou mezi fotovoltaickými panely při středu střechy - z důvodu zabránění možného poškození fotovoltaických panelů při zavírání křídel střechy. Délka fotovoltaického zdroje je (z důvodu maximalizace plochy zdroje) jen o 350 mm kratší, než šíře vozu přes nárazníky. Vzhledem k tomu, že je provoz vozidla přímo napájeného fotovoltaickými panely podmíněn absencí oblouků na trati (z důvodu minimalizace traťových odporů), nehrozí při průjezdu obloukem dotyk zdrojů na jednotlivých vozech.



Obr. 6.2 Typový náčrt vozu s rozmístěním komponent napájení a pohonu – pohled z boku

Na následujícím náčrtu je patrný přesah nosníku fotovoltaického zdroje přes skříň vozu (z důvodu velikosti fotovoltaických panelů E19/320).



Obr. 6.3 Typový náčrt vozu s rozmístěním komponent napájení a pohonu

6.6 Tabulky parametrů

Následující tabulka udává přehled parametrů fotovoltaickými panely přímo napájeného solárního vozu.

Tab. 6.1 Přehled parametrů vozidla

Parametry vozidla		
Rozchod	1 435	mm
Uspořádání pojezdu	2'1Ao'	
Délka vozu přes nárazníky	16 040	mm
Šíře vozu	3 080	mm
Výška vozu	4 275	mm
Hmotnost prázdného vozu	27 000	kg
Hmotnost loženého vozu	88 000	kg
Ložný objem	75	m ³
Vzdálenost otočných bodů podvozku	9 090	mm
Rozvor podvozku	1 800	mm
Průměr nových dvojkolí	920	mm
Průměr dvojkolí při středním opotřebení	880	mm
Maximální rychlost loženého vozu	40	km/h
Maximální rychlost prázdného vozu	60	km/h
Rozjezdová tažná síla	5,5	kN
Jmenovitá tažná síla	3,7	kN
Jmenovitý trakční výkon	8,4	kW
Specifická hmotnost	10,5	kg/W

Tabulka uvedená níže je přehledem parametrů fotovoltaického zdroje umístěného na střeše solárního vozidla.

Tab. 6.2 Přehled parametrů fotovoltaického zdroje

Parametry fotovoltaického zdroje		
Délka fotovoltaického zdroje	15,69	m
Šíře fotovoltaického zdroje	3,12	m
Šíře nosníku fotovoltaického zdroje	3,2	m
Plocha fotovoltaického zdroje	49	m ²
Celkový počet fotovoltaických panelů na střeše vozu	30	-
Jmenovité napětí fotovoltaického zdroje	547	V
Jmenovitý proud fotovoltaického zdroje	17,6	A
Jmenovitý výkon fotovoltaického zdroje	9 627	W

Tabulka 3 uvádí základní parametry trakčního motoru vozidla, převodový poměr a účinnosti jednotlivých prvků přenosu výkonu.

Tab. 6.3 Přehled parametrů pohonu vozidla

Parametry pohonu		
Typ trakčního motoru	Synchronní	
Příkon motoru	9 408	W
Jmenovitý výkon motoru	8 750	W
Jmenovitý moment síly motoru	205	Nm
Maximální moment síly motoru	304	Nm
Regulace výkonu	IGBT tranzistory	
Převodový poměr převodovky	1 : 8,29	-
Účinnost fotovoltaických panelů	19,6	%
Účinnost napěťového střídače	98	%
Účinnost trakčního motoru	93	%
Účinnost dvoustupňové převodovky	96	%

Závěr

V rámci diplomové práce byl navržen koncept železničního vozidla přímo napájeného fotovoltaickými články. Vozidlo je zamýšleno jako plně autonomní nákladní trakční vůz disponující fotovoltaickým zdrojem elektrické energie, napěťovým střídačem, trakčním motorem a převodovkou. Díky tomuto nemusí být vůz tažen trakčním vozidlem – lokomotivou, která zvyšuje velikost neužitečné hmotnosti soupravy. Současně solárně napájené vozidlo ke svému provozu nepotřebuje ani elektrickou trakci, což při budování železniční infrastruktury umožňuje snížit investiční náklady.

Pro možné využití solárního železničního vozidla bylo třeba nalézt lokalitu s velkým ročním úhrnem dopadajícího slunečního záření, které by bylo zároveň co nejméně závislé na roční době, aby mohl solární vlak jezdit zhruba konstantní průměrnou rychlostí během roku. Dále by se měla tato oblast vyznačovat rovinným terénem z důvodu minimalizace traťových odporů, neboť při současném stavu techniky by i nízký sklon trati a přítomnost oblouků na trati znamenal podstatný pokles dynamických vlastností vozidla.

Zároveň bylo žádoucí, aby bylo v hledané lokalitě možné praktické uplatnění vozidla. Všechny tyto podmínky splňuje brazilská lokalita Alto Horizonte, ve které se nachází povrchový důl na zlato a hliník. Z toho důvodu byly následné výpočty energie dopadajícího záření a trakčních vlastností solárního železničního vozidla vztahovány k této modelové lokalitě. Zde by mohla solárně napájená vozidla například plnit funkci „pásového dopravníku“ a převážet na místo dalšího zpracování vytěženou rudu či jiné suroviny.

Při početním určování trakčních vlastností solárního vozidla byla porovnávána energie dodaná solárními články vozidla (zmenšená o úbytky na jednotlivých komponentech přenosu výkonu) s energií potřebnou k překonání jízdních odporů. Na základě provedených výpočtů lze konstatovat, že za použití v současné době dostupných technologií je možné dosáhnout takového zisku energie ze Slunce, aby bylo železniční vozidlo schopno překonat jízdní odpory a vyvinout tak pohyb o přijatelné rychlosti. Velikost této rychlosti je však poměrně omezená. Závisí na ploše pokryté fotovoltaickými panely, na jejich účinnosti a účinnosti všech prvků přenosu energie, na velikosti jízdních odporů, a zejména závisí na aktuální intenzitě dopadajícího slunečního záření. Pro maximalizaci rychlosti vozidla je (vzhledem k omezenému výkonu elektrického zdroje) žádoucí spojovat jednotlivé vozy do soupravy, čímž se snižuje měrný vozidlový odpor železničního vozidla a tedy i spotřeba energie.

Ve výpočtech bylo uvažováno několik vozidel lišících se plochou fotovoltaického zdroje, pro které byl následně určován elektrický výkon solárního zdroje a dynamika vozidla. Z nich bylo vybráno modelové vozidlo o délce 16 m přes nárazníky, s plochou fotovoltaického zdroje 49 m². Pro toto vozidlo byly definovány již konkrétní parametry jednotlivých komponentů přenosu výkonu.

Fotovoltaický zdroj vozidla se skládá z 30 monokrystalických fotovoltaických panelů o účinnosti 19,6 %, zapojených sérioparalelně do 3 větví. Jako trakční pohon slouží synchronní motor s permanentními magnety napájený napěťovým střídačem s IGBT tranzistory. Přenos momentu síly na dvojkolí je realizován dvoustupňovou trakční převodovkou.

Uvedené vozidlo dosahuje dle provedených výpočtů, při intenzitě dopadajícího záření 1 100 W/m², rychlosti 33 km/h (platí pro jeden ložený vůz ze soupravy 20 vozů). V případě prázdného vozu je (za jinak stejných podmínek) maximální rychlost vozu 53 km/h.

Obecně lze při návrhu solárního vlaku použít pro zvýšení velikosti dodávaného elektrického výkonu (a tím i maximální rychlosti) například lehké plošinové vozy jako energetický tendr nebo vozidla s větší plochou fotovoltaického zdroje na střeše. Té lze dosáhnout zvětšením šíře zdroje, kdy panely výrazně přesahují boční stěny vozu či použitím

vozů větší délky. Například při použití vozu s délkou 23 m a plochou fotovoltaického zdroje 115 m² bude maximální rychlost loženého vozidla 60 km/h (za stejných uvažovaných podmínek jako v případě vozu s plochou zdroje 49 m²).

Spolu s maximální rychlostí vozidla roste i dojezd vozidla. Zatímco u vozu s plochou zdroje 49 m² je vykonaná vzdálenost za průměrný den v Alto Horizonte necelých 180 km, u vozu s plochou zdroje o ploše 115 m² je to již téměř 380 km.

Účinnost přeměny sluneční energie na elektrickou se u solárních článků neustále zvyšuje vlivem stále dokonalejší technologie výroby. Díky tomu budou solární panely získávat více elektrické energie nejenom z přímého slunečního záření, ale i difúzního záření. To jediné napájí přímo poháněná solární vozidla v případě, kdy je vlivem oblačnosti přerušen dopad přímých slunečních paprsků na plochu fotovoltaických panelů. Značná závislost na aktuální oblačnosti je nevýhodou přímo poháněných solárních vozidel, neboť při nepříznivých podmínkách klesne rychlost vozidla na minimální či nulovou hodnotu. K tomuto nedojde u vozidel s nepřímým napájením, jejichž součástí je zásobník elektrické energie schopný vyrovnávat krátkodobé výpadky fotovoltaického zdroje.

Seznam použité literatury

- [1] MATUŠKA, T. *Sešit projektanta č. 1 – Solární tepelné soustavy*. STP Praha: 2009. ISBN: 978-80-02-02186-5
- [2] NETOPIL, Rostislav, et. al. *Fyzická geografie I*. Praha: SPN, 1984. 273 s.
- [3] AL-SALIHI, Ali. M.; KADHOM, Mylaa. M.; MOHAMMED, Ali. J. *Estimation of Global solar radiation on Horizontal Surface from Routine*. College of Science AL-Mustansiriyah University
- [4] KEMEL, Miroslav. *Klimatologie, meteorologie, hydrologie*. Vydavatelství ČVUT, 2000. 289 s.
- [5] MULLER, Miloslav. *Záření a energie v zemské atmosféře*. In MULLER, Miloslav. *Meteorologie a klimatologie* [online]. Praha: Akademie věd ČR, 2010 [cit. 2010-10-22].
- [6] CIHELKA, Jaromír. *Solární tepelná technika*. Malina Tomáš, 1994. 203 s. ISBN 80-900759-5-9.
- [7] SEN, Zekai. *Solar energy fundamentals and modeling techniques : atmosphere, environment, climate change and renewable energy*. London : Springer-Verlag, 2008. 281 s. ISBN 978-1-84800-134-3.
- [8] ZMRHAL, Vladimír. *PROJEKT - vzduchotechnika : 1. Popis výpočtu tepelné zátěže klimatizovaných prostor podle ČSN* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010 [cit. 2011-02-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.fsid.cvut.cz/~zmrhavl>>.
- [9] CIHELKA, Jaromír. *Vytápění a větrání*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, druhé vydání, 1975, 04–216–75.
- [10] *Pvcdrom.pveducation.org* [online]. 2010 [cit. 2011-02-09]. SUNLIGHT. Dostupné z WWW: <<http://pvcdrom.pveducation.org/SUNLIGHT/Images/AZIMUTH.gif>>.
- [11] German Solar Energy Society. *Planning and Installing Photovoltaic Systems*. London: Earthscan, 2008. 401 s.
- [12] LIBRA, Martin; POULEK, Vladislav. *Fotovoltaika: Teorie i praxe využití solární energie*. [s.l.] : ILSA, 2010. 165 s.
- [13] LIBRA, Martin; POULEK, Vladislav. *Solární energie*. Praha: ČZU, 2006. ISBN: 80-213-1488-5.
- [14] ŠIROKÝ, Jaromír. *Mechanika v dopravě I - kolejová vozidla* [online]. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, 2003 [cit. 2011-02-22]. Dostupné z WWW: <http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/Skr_MvD.pdf>.
- [15] HERZÁŇ, František; HABARDA, Dušan; MRKVIČKA, Jan. *Mechanika dopravy kolejových vozidel*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1989. 250 s.
- [16] ŠKAPA, Petr. *Porovnání železniční a silniční dopravy z hlediska znečišťování ovzduší a čerpání primárních zdrojů energie*. In *Vědeckotechnický sborník ČD*. [s.l.] : [s.n.], 1998. s. 89 - 100.
- [17] QUASCHNING, Volker. *Renewable Energy and Climate Change*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2010. 322 s. ISBN 978-0-470-74707-0.

- [18] TIWARI, Gopal Nath; DUBEY, Swapnil . *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*. [s.l.] : Royal Society of Chemistry, 2010. 326 s.
- [19] *GoGreenSolar* [online]. 2008 [cit. 2011-05-23]. Solar Arrays, Explained. Dostupné z WWW: <<http://blog.gogreensolar.com>>.
- [20] SORENSEN, Bent. *Renewable Energy : Physics, Engineering, Environmental Impacts, Economics & Planning*. [s.l.] : Academic Press, 2010. 954 s.
- [21] LATA, Michael. Jízda železničního kolejového vozidla. *Základy dopravní techniky – železniční doprava* [online]. Univerzita Pardubice, 2005 [cit. 2011-02-12]. Dostupné z WWW: <http://webak.upce.cz/~lata/ZDT_e-learning/ZDT_kap_0.htm>.
- [22] POHL, Jiří. *Trakční mechanika 1. - 4.* Prezentace. Siemens.
- [23] POHL, Jiří. *Využití solární energie pro pohon kolejových vozidel*. 2010. 20 s. Prezentace. Siemens.
- [24] LUQUE, Antonio; HEGEDUS, Steven. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. [s.l.] : John Wiley and Sons, 2003. 1138 s.
- [25] BOXWELL, Michael. *Solar Electricity Handbook - 2011 Edition*. [s.l.] : Greenstream Publishing, 2011. 192 s.
- [26] SOLANKI, Chetan Singh. *Solar Photovoltaics: Fundamentals Technologies And Applications*. [s.l.] : PHI Learning Pvt. Ltd., 2009. 478 s.
- [27] TIWARI, Gopal Nath; AGRAWAL, Basant . *Building Integrated Photovoltaic Thermal Systems : For Sustainable Developments*. [s.l.] : Royal Society of Chemistry, 2010. 318 s.
- [28] BANNERT, Petr . *Vliv teploty na vlastnosti fotovoltaičických článků* [online]. Varnsdorf : [s.n.], 2011 [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/FVS_008_cviceni/008_vliv_teploty_na_fv_c.pdf>.
- [29] BANNERT, Petr . *Parametry fotovoltaičických článků* [online]. Varnsdorf : [s.n.], 2011 [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/FVS_001_cviceni/>.
- [30] BANNERT, Petr . *Výkonová charakteristika fotovoltaičického článku* [online]. Varnsdorf : [s.n.], 2011 [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/FVS_003_cviceni/>.
- [31] OTÁHAL, Jiří. *Možnosti využití solární energie*. [s.l.], 2007. 58 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně..
- [32] DOBIÁŠ, PAVEL. *Fotovoltaika v městských aglomeracích*. Brno, 2008. 90 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [33] TICHÝ, Jaroslav. *Analýza dopadajícího slunečního záření a jízdních odporů pro využití fotovoltaičických článků k přímému napájení železničních vozidel*. Pardubice, 2011. 38 s. Ročníkový projekt II. Univerzita Pardubice.

Seznam tabulek

Tab. 1.1 Charakteristický den v měsíci.....	18
Tab. 1.2 Parametry vícevrstvého solárního článku CTJ	41
Tab. 1.3 Porovnání parametrů vybraných fotovoltaických panelů	44
Tab. 6.1 Přehled parametrů vozidla	93
Tab. 6.2 Přehled parametrů fotovoltaického zdroje.....	94
Tab. 6.3 Přehled parametrů pohonu vozidla.....	94

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Geometrické vztahy mezi Sluncem a Zemí [1]	12
Obr. 1.2 Znázornění rotace Země okolo Slunce pro severní polokouli	12
Obr. 1.3 Denní průběh intenzity záření při různé velikosti součinitele znečištění Z.....	13
Obr. 1.4 Spektrum slunečního záření.....	15
Obr. 1.5 Výška slunce nad obzorem a zenitová vzdálenost	16
Obr. 1.6 Azimut Slunce [10]	17
Obr. 1.7 Znázornění sluneční deklinace [1]	17
Obr. 1.8 Roční průběh sluneční deklinace	18
Obr. 1.9 Úhel dopadu slunečních paprsků, úhel sklonu oslněné plochy [8]	19
Obr. 1.10 Schéma dopadu záření na obecnou rovinu [6].....	19
Obr. 1.11 Závislost insolace na zenitové vzdálenosti [2].....	20
Obr. 1.12 Příklad denního průběhu intenzity osvětlení [6]	22
Obr. 1.13 Intenzita záření pro různé časové úseky	23
Obr. 1.14 Princip fotovoltaického článku [12].....	27
Obr. 1.15 Schematická značka fotovoltaického článku	28
Obr. 1.16 Spektrum slunečního záření dopadajícího na zemský povrch [13].....	29
Obr. 1.17 Voltampérová charakteristika s vyznačenými charakteristickými hodnotami	30
Obr. 1.18 Spojování fotovoltaických článků do panelů [19]	37
Obr. 1.19 Struktura fotovoltaického panelu s články z krystalického křemíku [17]	37
Obr. 1.20 Elektrické zapojení fotovoltaického panelu Sunpower	39
Obr. 1.21 Zleva: CIS solární články, články z amorfního křemíku, CdTe solární články [11]	39
Obr. 1.22 Příčný řez tenkovrstvým fotovoltaickým článkem	40
Obr. 1.23 Struktura hybridního HIT článku [11].....	42
Obr. 1.24 Struktura sférického článku firmy Spheral Solar Power [11].....	42
Obr. 1.25 Prototypy flexibilních sférických fotovoltaických modulů [11].....	43
Obr. 1.26 Struktura sférického článku firmy Kyosemi [11].....	43
Obr. 2.1 Podstata vzniku odporu valení	48
Obr. 2.2 Podstata vzniku odporu z tření v ložiskách	48
Obr. 2.3 Příklady vlivu tvaru skříně na hodnotu součinitele tvaru čela [21]	50
Obr. 2.4 Jízda do stoupání [14].....	51
Obr. 2.5 Úhel dopadu slunečního záření na oslněnou plochu	53
Obr. 2.6 Ztráty výkonu na slunečním záření poháněném vozidle	55
Obr. 3.1 Uspořádání pohonu solárně napájeného vozidla.....	62
Obr. 3.2 Plocha fotovoltaických panelů na střeše vozu 48 m ²	63
Obr. 3.3 Znázornění možného rozšíření plochy fotovoltaických panelů na střeše vozu	64
Obr. 3.4 Plocha fotovoltaických panelů na střeše vozu 80 m ²	64
Obr. 3.5 Plocha fotovoltaických panelů na střeše vozu 115 m ²	64
Obr. 3.6 Součinitel C _x pro soupravu nákladních vozů	66
Obr. 4.1 Souprava s lokomotivou s fotovoltaickými panely	72
Obr. 4.2 Lokomotiva a netrakovní vozy s fotovoltaickým zdrojem	73
Obr. 4.3 Autonomní nákladní vozy.....	74
Obr. 4.4 Ve skupině jedoucí vozy s fotovoltaickým zdrojem	75
Obr. 5.1 Rozmístění jednotlivých komponentů pohonu na solárním vozidle	77
Obr. 5.2 Blokové schéma přenosu výkonu.....	77
Obr. 5.3 Ztráty při přenosu výkonu ze solárních panelů.....	78
Obr. 5.4 Zjednodušené schéma zapojení elektrických prvků přenosu výkonu	80
Obr. 6.1 Schéma napájení pohonu solárního vozu o ploše panelů 49 m ²	83
Obr. 6.2 Typový náčrt vozu s rozmístěním komponent napájení a pohonu – pohled z boku	92

Obr. 6.3 Typový náčrt vozu s rozmístěním komponent napájení a pohonu 93

Seznam grafů

Graf. 1.1	Přímé, difúzní a celkové záření.....	24
Graf. 1.2	Teoretická energie záření pro jednotlivé lokality	25
Graf. 1.3	Skutečná energie záření pro jednotlivé lokality	26
Graf. 1.4	Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku.....	31
Graf. 1.5	Výkonová charakteristika křemíkového fotovoltaického článku	32
Graf. 1.6	Účinnost solárních článků v závislosti na jejich teplotě.....	35
Graf. 1.7	Sériové a paralelní zapojení fotovoltaických článků	38
Graf. 1.8	Grafické porovnání parametrů vybraných fotovoltaických panelů.....	45
Graf. 2.1	Okamžitý elektrický výkon fotovoltaického zdroje	54
Graf. 2.2	Průměrný elektrický výkon fotovoltaického zdroje	55
Graf. 2.3	Trakční charakteristika vozidla pro plochu fotovoltaického zdroje 115 m ²	57
Graf. 2.4	Trakční charakteristika vozidla pro plochu fotovoltaického zdroje 80 m ²	58
Graf. 2.5	Trakční charakteristika vozidla pro plochu fotovoltaického zdroje 48 m ²	58
Graf. 2.6	Trakční charakteristika vozidel s rozdílnou hmotností, pro $F_{o\ max} = 5,5\ kN$	59
Graf. 2.7	Trakční charakteristika prázdného vozu pro rozdílné činitele C_x	59
Graf. 2.8	$s_o - v$ diagram loženého vozu v soupravě 20 vozů	60
Graf. 3.1	Dosažitelná rychlost vlaku pro plochu fotovoltaických panelů 48 m ²	66
Graf. 3.2	Dosažitelná rychlost vlaku pro plochu fotovoltaických panelů 80 m ²	67
Graf. 3.3	Dosažitelná rychlost vlaku pro plochu fotovoltaických panelů 115 m ²	67
Graf. 3.4	Dojezd solárního vlaku za průměrný den	69
Graf. 3.5	Dosažitelná rychlost vlaku při účinnosti fotovoltaických panelů 100 %	70
Graf. 3.6	Vlakem vykonaná dráha při 100% účinnosti fotovoltaických panelů	71
Graf. 5.1	Voltampérová charakteristika fotovoltaického zdroje	78
Graf. 5.2	Sdružené třífázové střídavé napětí a proud na výstupu střídače	79
Graf. 5.3	Typický průběh moment síly synchronního motoru s permanentními magnety	80
Graf. 5.4	Průběh síly a rychlosti železničního vozidla	81
Graf. 6.1	Průběh tažné síly na obvodu kol a jízdního odporu loženého vozidla	88
Graf. 6.2	Trakční charakteristika vozidel s rozdílnou hmotností	90
Graf. 6.3	$s_o - v$ diagram loženého vozu v soupravě 20 vozů	91
Graf. 6.4	Dosažitelná rychlost vlaku pro plochu fotovoltaických panelů 49 m ²	91
Graf. 6.5	Dojezd solárního vlaku za průměrný den	92