

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

**VYUŽITÍ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ K NEPŘÍMÉMU
NAPÁJENÍ ŽELEZNIČNÍHO VOZIDLA**

Bc. Petr Dašek

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. Petr DAŠEK**
Osobní číslo: **D09771**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura-Elektrotechnická zařízení**
Název tématu: **Využití fotovoltaických článků k nepřímému napájení železničního vozidla**
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 nepřímým solárním zdrojem elektrické energie
4. Parametry soudobých a perspektivních zásobníků elektrické energie
5. Uspořádání trakčního pohonu železničního vozidla s nepřímým solárním zdrojem elektrické energie
6. Projekční studie železničního vozidla s nepřímým solárním zdrojem elektrické energie

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

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

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

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

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **1. března 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

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Použité literární prameny a informace, které jsem využil ke své práci, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že na moji práci se 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 dále 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. května 2011

Bc. Petr Dašek

Poděkování

Chci poděkovat Ing. Jiřímu Pohlovi z firmy Siemens s.r.o. za jeho pomoc, cenné vědomosti a za čas strávený při konzultacích.

Chci také poděkovat vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jaroslavu Novákovi CSc. za jeho ochotu a odbornou pomoc při řešení problémů v diplomové práci.

Dále chci poděkovat všem, kteří mi pomohli svými cennými radami nebo tím, že mi vyšli vstříc.

V neposlední řadě chci poděkovat rodině a spolužákům, kteří mě v průběhu celého studia na vysoké škole podporovali.

Název

Využití fotovoltaických článků k nepřímému napájení železničního vozidla

Title

The use of photovoltaic cells as an indirect power supply of railway vehicles

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá použitím fotovoltaických panelů k napájení železničního vozidla. Železniční vozidlo je vybaveno zásobníkem elektrické energie. V práci je řešena energetická náročnost jízdy železničního vozidla, návrh schéma trakčního pohonu, volba vhodného zásobníku elektrické energie. Práce posuzuje použití v reálném prostředí.

Annotation

My thesis work deals with the use of photovoltaic panels to power a railway vehicle. The railway vehicle is equipped with accumulator. There is solving the energy intensity of driving a railway vehicle, project scheme of the traction drive, appropriate choice of electrical energy accumulator. The work reviewed the application in the real environment.

Klíčová slova

fotovoltaické panely, energetická náročnost, železniční vozidlo

Keywords

Photovoltaic panels, energy intensity, railway vehicle

Obsah

Úvod.....	9
1. Princip a aplikační pole vozidel s nepřímým solárním zdrojem elektrické energie.....	10
1.1. Princip vozidel s nepřímým solárním zdrojem elektrické energie.....	10
1.2. Aplikační pole vozidel s nepřímým solárním zdrojem elektrické energie.....	11
1.2.1. Velikost intenzity dopadající energie.....	12
1.2.2. Vhodné parametry tratě.....	15
1.2.3. Vyhodnocení nároků na jízdu.....	15
1.3. Možnosti využití.....	16
2. Parametry soudobých a perspektivních fotovoltaických článků a základní vlastnosti na zem dopadající sluneční energie z hlediska aplikace na drážní vozidlo.....	18
2.1. Podstata fotovoltaické přeměny elektromagnetického vlnění na elektrickou energii..	18
2.1.1. Polovodič typu N.....	20
2.1.2. Polovodič typu P.....	21
2.1.3. Přejechod PN.....	22
2.1.4. Princip fotovoltaického jevu.....	23
2.2. Výroba fotovoltaických článků.....	27
2.3. Montáž do panelů.....	30
2.4. Tenkovrstvá technologie.....	31
2.4.1. Montáž do panelů.....	31
2.5. 3. generace vývoje fotovoltaických panelů.....	31
2.6. Výrobci.....	32
2.6.1. Konkrétní výrobky.....	32
2.7. Budoucí vývoj PV článků.....	36
2.8. Vnitřní zapojení PV panelů.....	36
2.9. Vnější zapojení PV panelů.....	37
2.9.1. Každý PV panel je připojen přes vlastní měnič.....	37
2.9.2. Sériové zapojení.....	38
2.9.3. Paralelní spojení bez diod.....	40
2.9.4. Paralelní spojení s diodami.....	41
2.9.5. Sérioparalelní kombinace PV panelů bez diod.....	43
2.9.6. Sérioparalelní kombinace PV panelů s diodami.....	43
2.9.7. Sériová zapojení přes měniče do jednoho meziobvodu.....	44
2.10. Porovnání jednotlivých zapojení.....	45
3. Parametry soudobých a perspektivních zásobníků elektrické energie.....	47
3.1. Použitelná zařízení.....	47
3.2. Olověné baterie.....	47
3.3. NiCd akumulátory.....	48
3.4. NiMH akumulátory.....	49
3.5. Li-Ion akumulátory.....	50
3.5.1. Nabíjení Li-Ion akumulátorů.....	51
3.5.2. Další typy Lithiových akumulátorů - LiFePO ₄	52
3.5.3. Další typy Lithiových akumulátorů Li-Sulfare - lithium sírová baterie.....	52
3.5.4. Další typy Lithiových akumulátorů - Li-Polymer.....	52
3.6. Superkapacitor.....	53
3.6.1. Vlastnosti superkapacitoru.....	54
3.7. Porovnání vlastností jednotlivých technologií.....	55

3.8. Li-Ion akumulátor	56
4. Energetická náročnost vlakové dopravy a její minimalizace k reálnosti použít solární zdroje elektrické energie	59
4.1. Jízda železničního vozidla.....	59
4.2. Jízdní odpory	60
4.3. Vozidlové odpory	60
4.4. Traťové odpory.....	61
4.5. Minimalizace energetické náročnosti.....	62
4.5.1. Minimalizace energetické náročnosti – vozidlové odpory.....	62
4.5.2. Minimalizace energetické náročnosti – traťové odpory.....	64
4.6. Výpočet reálné spotřeby na trati.....	64
4.6.1. Energetická náročnost při cestovní rychlosti 50 km/h	64
5. Uspořádání trakčního pohonu železničního vozidla s nepřímým solárním zdrojem elektrické energie	71
5.1. Blokové schéma železničního vozidla	72
5.2. Toky energií mezi jednotlivými elektrickými částmi	75
5.2.1. Jízda – nepřímé napájení	75
5.2.2. Brzda s rekuperací	76
6. Projekční studie železničního vozidla s nepřímým solárním zdrojem elektrické energie	78
6.1. Parametry železničního vozidla DESIRO Classic DMU	78
Závěr.....	81
Použitá literatura	82
Seznam obrázků	84
Seznam tabulek	86

Úvod

V dnešní době je potřebou lidí cestovat. Důvod cestování je různý od každodenního cestování do zaměstnání, cestování za zábavou, kulturou a dalšími lidskými aktivitami.

Způsobů dopravy je několik, nejvyužívanější je v tomto ohledu doprava automobilová. Ta je však závislá na uhlovodíkových palivech neboli na ropě. Vývoj ceny ropy ale každoročně vzrůstá. Proto vyvstává otázka, zdali by se dala ropa nějak nahradit. Nejen z pohledu ceny ale i díky dalším výhodám je vhodné ji nahradit elektrickou energií. To je ale v automobilové dopravě zatím velký problém. Hlavně z důvodu parametrů dostupných akumulátorů elektrické energie. Pro dostatečný dojez je stále ještě potřeba akumulátorů velkých rozměrů a hmotností.

Problém s akumulátory ale není až takový v železniční dopravě. Zde je hmotnost a velikost železničních vozů v porovnání s velikostí a hmotností automobilů mnohem větší. Takže velké a těžké akumulátory zde nejsou překážkou v použití. Navíc menší valivý odpor a příznivější aerodynamika snižují spotřebu energie.

V této době je také velký rozvoj fotovoltaických panelů. Z toho vznikla myšlenka vybavit železniční vozidlo fotovoltaickými panely a z těchto panelů vozidlo napájet. Fotovoltaické vozidlo s přímým napájením však má na železniční poměry úzké pole působnosti. Proto je sledováno i nepřímé napájení, tedy fotovoltaické vozidlo bude vybaveno ještě zásobníkem energie. Jak již bylo výše zmíněno, není u železniční dopravy problém umístit ve vozidle akumulátory.

V této diplomové práci je tedy řešeno navržení železničního vozidla s fotovoltaickými panely a se zásobníkem energie.

Fotovoltaické panely budou umístěny na střeše vozidla. V železničním vozidle bude umístěn zásobník elektrické energie.

Práce se zabývá elektrickým zapojením fotovoltaických panelů, energetickou náročností jízdy, vhodností kde lze použít napájení železničního vozidla z fotovoltaických panelů, řešením zásobníku a uspořádáním trakčního pohonu železničního vozidla.

Energetická část práce je zaměřena pouze na trakční část železničního vozidla, kde je řešena energetická náročnost jízdy. Nejsou zde řešeny energetické nároky na pomocné pohony a na další elektrická vybavení železničního vozidla.

V závěru jsou zhodnoceny dosažené výsledky a úvaha o vhodnosti použití fotovoltaických panelů k napájení železničního vozidla.

Poznatky ohledně slunečního záření a množství dopadající sluneční energie na zemský povrch a jízdní odpory jsou řešeny již v mé předchozí práci:

Ročníkový projekt II - Analýza dopadajícího slunečního záření a jízdních odporů pro využití fotovoltaických článků u železničních vozidel - nepřímý pohon

Autor: Bc. Dašek Petr

Rok: 2011

1. Princip a aplikační pole vozidel s nepřímým solárním zdrojem elektrické energie

1.1. Princip vozidel s nepřímým solárním zdrojem elektrické energie

Nejprve by bylo vhodné vysvětlit co je to závislá, nezávislá a polozávislá trakce.

Závislá trakce je trakce, kde je hnací vozidlo závislé na dodávce energie z externích zdrojů (neveze si zásobu energie s sebou ať už v jakékoli formě). Výkon potřebný pro provoz odebírá např. z trakčního vedení nebo napájecí kolejnice. Výhodou tohoto řešení jsou menší náklady na provoz, protože hnací vozidlo je poháněno elektrickou energií, která je levnější než např. nafta. Nevýhodou je, že trať musí být v takovémto případě elektrifikována, což značně zvyšuje počáteční náklady.

Nezávislá trakce je trakce, kde není hnací vozidlo závislé na dodávce energie z externího zdroje. Naopak si veze energii ve formě např. uhlí (u parní trakce) nebo ve formě nafty (u diesel-elektrické trakce). Výhodou tohoto řešení je, že hnací vozidlo může jezdit po kolejích, ať jsou nebo nejsou elektrifikovány. Toto řešení šetří počáteční náklady. Nevýhodou však je vyšší cena paliva v dnešní době cena nafty, než cena elektrické energie.

Polozávislá trakce je trakce, kde si hnací vozidlo veze s sebou energii uchovanou např. v setrvačnicku nebo v akumulátorech. Množstvím energie je určen jeho akční rádius. V polozávislé trakci je dojezd vozidla mnohem menší než v trakci nezávislé.

V případě vozidla s nepřímým napájením ze solárních panelů budou spojeny dohromady výhody jednotlivých trakcí. Při splnění potřebných nároků pro jízdu (budou dále specifikovány) nebude vozidlo závislé na energii z žádného externího zdroje. Tím odpadnou náklady na elektrifikaci tratě. To jsou výhody nezávislé trakce. Vozidlo však také nebude poháněno dieslovým motorem, takže se ušetří na palivu do vznětového motoru.

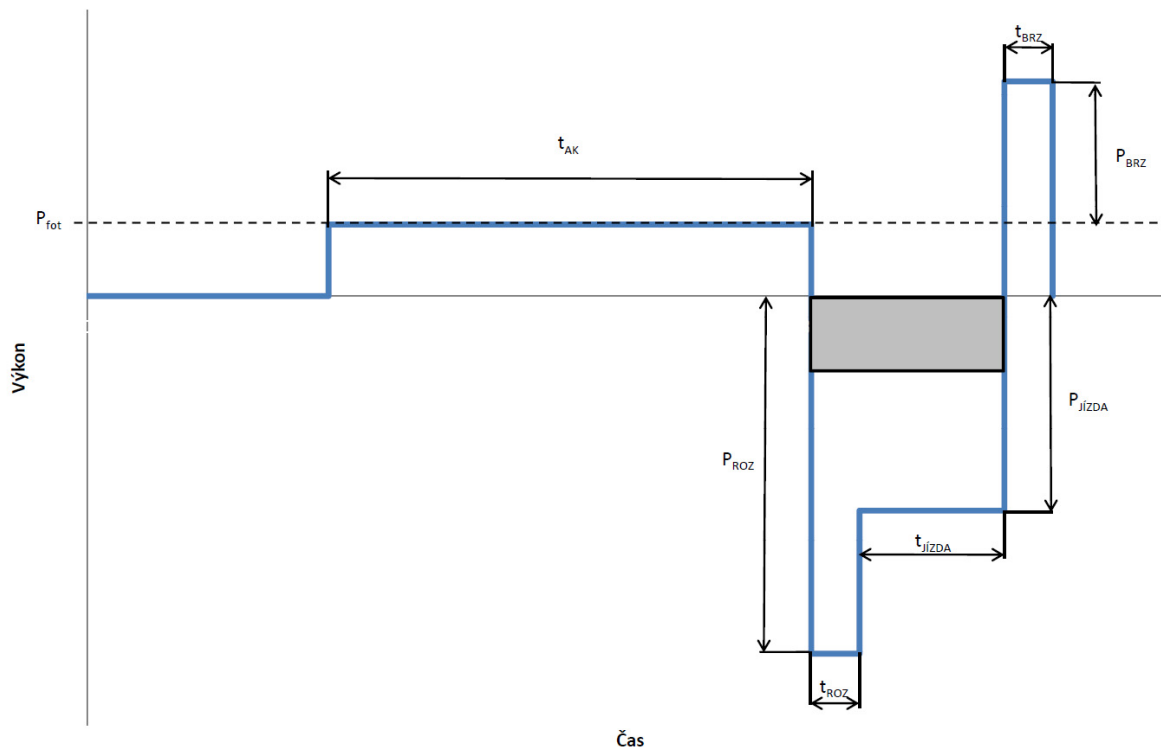
Pro pohon hnacího vozidla není vhodné dodávat do trakčního motoru energii jen z PV panelů. Výkon této energie je pro samotnou jízdu osobního vlaku dost malý. Při pohánění vozidla trakčním motorem, který by byl přímo napájen potřebným výkonem z PV panelů, by se dosáhlo velmi malé rychlosti. Těchto vlastností lze využít v nákladní dopravě. Tam není vždy nutné, aby náklad musel být z jednoho místa do druhého přepraven v krátkém časovém úseku. V osobní dopravě je ale malá cestovní rychlost nevyhovující. Pro zvýšení cestovní rychlosti v osobní dopravě je potřeba, aby měl trakční motor větší výkon.

Využívat energii z PV panelů jen ve chvíli kdy je potřebná pro jízdu, by bylo velice neefektivní. Proto bude vozidlo vybaveno nejen PV panely ale i zásobníkem, který bude schopen energii z PV panelů ve chvíli, kdy vozidlo bude stát a nebude ji tak využívat pro jízdu, nějakým vhodným způsobem akumulovat.

Energie naakumulovaná v zásobníku se pak během jízdy bude využívat pro pohon, čímž se zvětší cestovní rychlost. Celkový výkon pro jízdu pak bude:

$$P = P_{\text{fot}} + P_Z = P_{\text{fot}} + P_{\text{fot}} \cdot \eta_{\text{ZAS}} \cdot \frac{t_{\text{AK}}}{t_{\text{JIZDA}}} = P_{\text{fot}} \cdot \left(1 + \eta_{\text{ZAS}} \cdot \frac{t_{\text{AK}}}{t_{\text{JIZDA}}} \right) \quad [\text{W}] \quad (1)$$

kde P – celkový výkon [W]
 P_{fot} – výkon PV panelů [W]
 P_Z – výkon zásobníku [W]
 η_{ZAS} – účinnost zásobníku [-]
 t_{AK} – doba akumulace [min]
 t_{JIZDA} – doba jízdy [min]



Obr. 1-1 - Průběh výkonu v závislosti na čase

Pro názornost slouží Obr. 1-1. Na ose x je čas a na ose y je výkon. P_{fot} označuje výkon, který jsou schopny dodávat PV panely v reálném čase. Tento výkon se v čase t_{AK} akumuluje do zásobníku. V této době vlak nejede, ale pouze stojí a akumuluje energii. V době jízdy t_{ROZ} a t_{JIZDA} je množství potřebného výkonu větší. Nároky na výkon vyznačené šedivou plochou, jsou pokrývány z PV panelů, zbytek výkonu je dodáván ze zásobníku. Množství naakumulované energie závisí na intenzitě dopadajícího záření, na účinnosti PV panelů, na délce času akumulace a na účinnosti zásobníku.

Zjednodušeně lze popsat energii akumulovanou a energii potřebnou pro jízdu:

$$P_{\text{fot}} \cdot t_{\text{AK}} \cdot \eta + P_{\text{fot}} \cdot (t_{\text{ROZ}} + t_{\text{JIZDA}}) \geq P_{\text{ROZ}} \cdot t_{\text{ROZ}} + P_{\text{JIZDA}} \cdot t_{\text{JIZDA}} - P_{\text{BRZ}} \cdot t_{\text{BRZ}} \cdot \eta \quad (2)$$

Z obrázku je také patrné, že doba akumulace musí být mnohem větší než doba samotné jízdy. Čím delší je doba akumulace, tím více energie je k dispozici pro následnou jízdu. To tedy prodlužuje dojezd vozidla, nebo mu umožňuje jet vyšší rychlostí.

Předpoklad nabíjet zásobník vozidla pouze z PV panelů by ho velmi limitovalo v možnosti využití. Může se totiž stát, že PV panely nedodávají do zásobníku potřebné množství energie, protože jsou zastíněny, nebo intenzita dopadajícího záření není dostatečná. Proto je ještě vozidlo vybaveno přípojkou k napájecímu bodu 3 x 400 V, který je umístěn v místě stání vozidla. Z něho je nabíjen zásobník pro následnou jízdu.

1.2. Aplikační pole vozidel s nepřímým solárním zdrojem elektrické energie

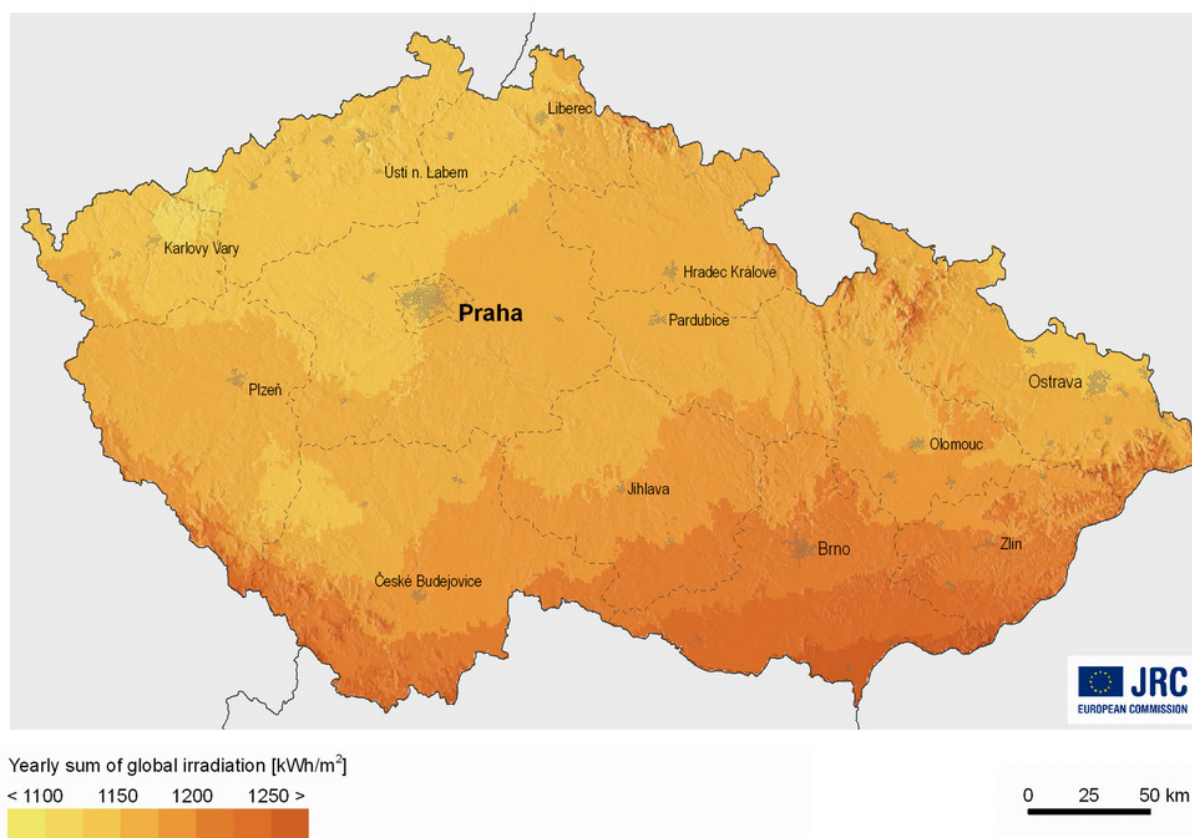
Pro správné zvolení místa kde provozovat železniční vozidlo s nepřímým solárním zdrojem elektrické energie, je nutné blíže specifikovat nároky na jízdu.

Vhodné místo totiž lze vybrat až podle kritérií, která musí splňovat.

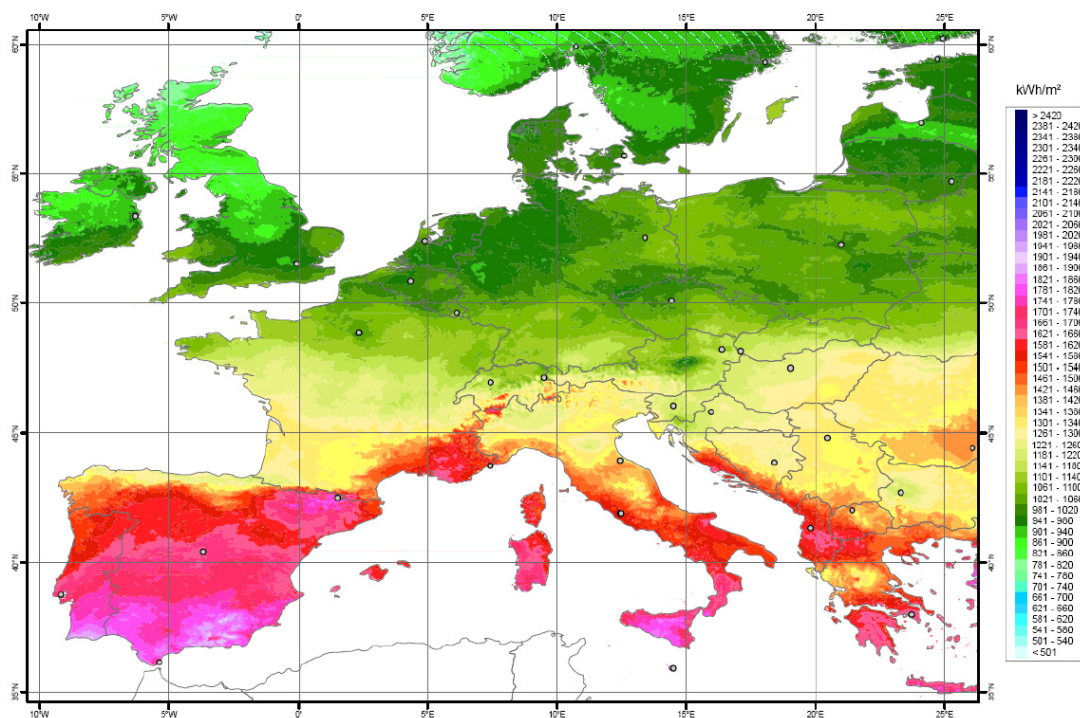
1.2.1. Velikost intenzity dopadající energie

Výstupní výkon PV panelu je závislý na velikosti dopadající energie. Čím vyšší je intenzita dopadajícího záření, tím má panel větší elektrický výkon.

Intenzita záření závisí na umístění na planetě. To je vyobrazeno na Obr. 1-2, Obr. 1-3 a Obr. 1-4. Jak je na nich vidět, u rovníku je mnohem větší množství dopadající energie na jeden m^2 za rok, než v místech která jsou od rovníku vzdálena více. Je to tím, že v oblastech kolem rovníku dopadá záření na zem skoro kolmo. Zatímco ve vzdálenějších místech je úhel odklonu od kolmice k rovině země větší. V oblastech kolem rovníku je také více slunečných dní.

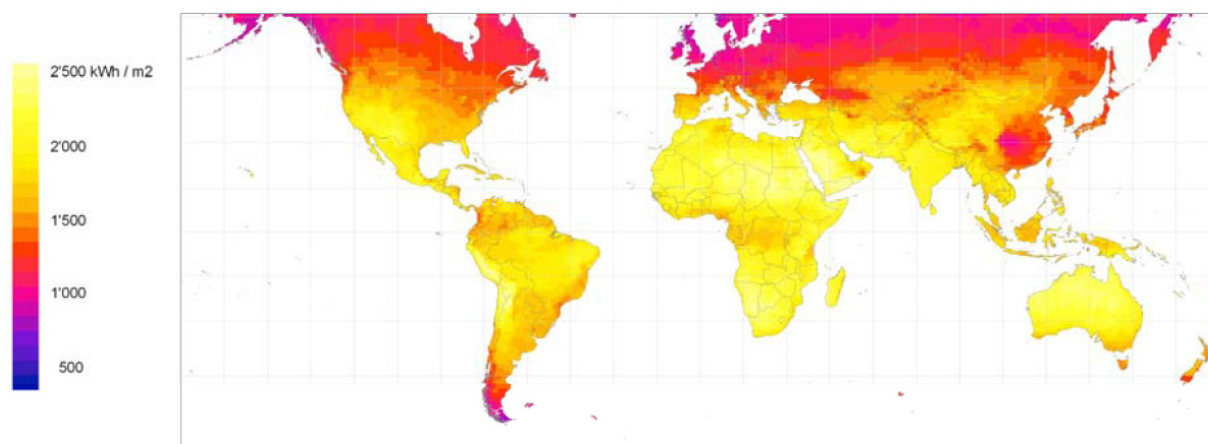


Obr. 1-2 – Množství dopadající energie na území ČR za jeden rok [5]



Obr. 1-3 – Množství dopadající energie na území Evropy za jeden rok [6]

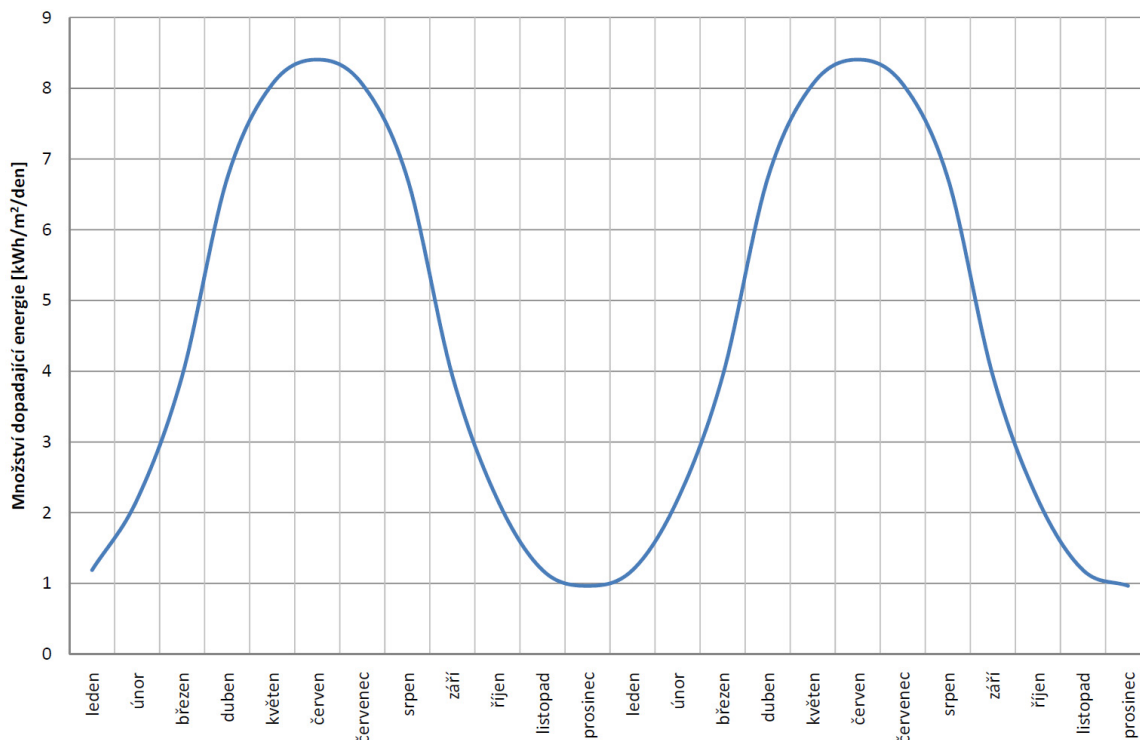
Yearly sum of global irradiance



June 2008

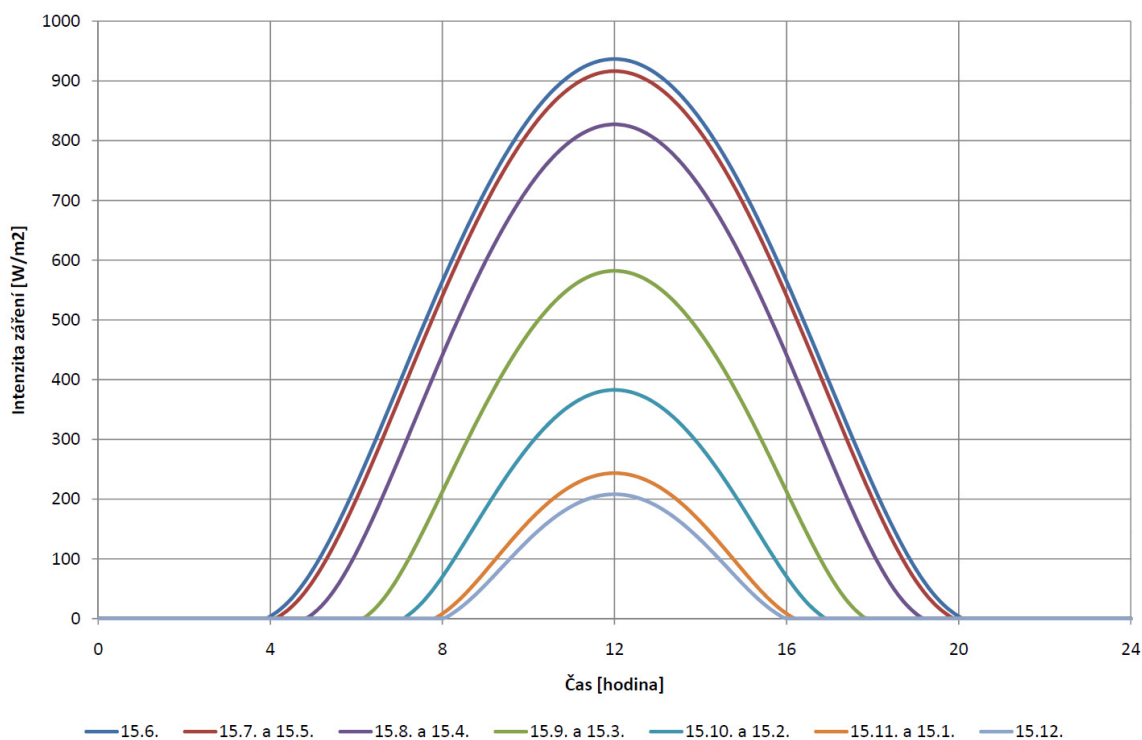
Obr. 1-4 – Množství dopadající energie na území celého světa za jeden rok [6]

Další jev, který ovlivňuje velikost intenzity dopadajícího záření, je roční období. Pro 50. rovnoběžku severní polokoule (území ČR) je tato závislost na Obr. 1-5. Z toho je zřejmé, že v průběhu roku se mění intenzita skoro sinusově. Minima jsou v zimě a maxima jsou v létě.



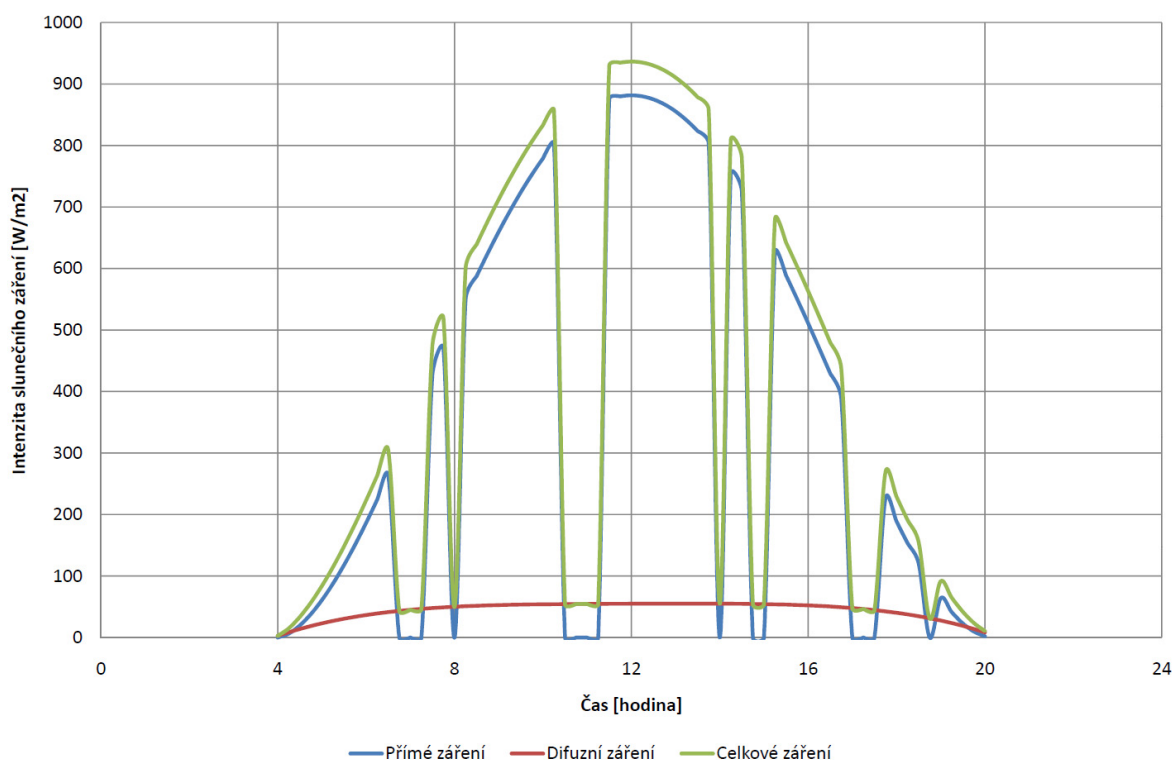
Obr. 1-5 – Množství dopadající energie v průběhu jednoho roku na 50. rovnoběžce na podložku rovnoběžnou se zemí – v ideálním případě bez mraků na obloze

Intenzita se dále ještě mění v průběhu dne. Závisí na poloze Slunce nad obzorem. To je naznačeno na Obr. 1-6. Na tomto obrázku je velikost intenzity záření v libovolných dnech v roce. V noci, kdy Slunce nesvítí, je intenzita nulová. Největší intenzita záření je pak ve 12 hodin.



Obr. 1-6 - Intenzita záření v průběhu celého dne - libovolné dny v roce, na 50. rovnoběžce, na podložku rovnoběžnou se zemí, v ideální den bez mraků

Takovýto průběh intenzity je ale podmíněn zcela slunečným dnem, kdy na obloze nebude žádný mrak. V případě, že na chvíli mrak zastíní danou plochu, intenzita záření prudce klesá. Přímé záření je v tu chvíli nulové a uplatňuje se jen záření rozptýlené neboli difuzní. To je na Obr. 1-7 pro den 15.6.



Obr. 1-7 - Reálný průběh dopadajícího záření na podložku rovnoběžnou se zemí na 50. rovnoběžce v den 15.6. – s uvažovaným vlivem mraků

1.2.2. Vhodné parametry tratě

Pro jízdu železničního vozidla z jednoho místa do místa druhého je potřebný trakční výkon. Ten závisí na jízdních odporech vlaku, na rychlosti jízdy a na profilu tratě.

Nejmenší výkon je potřebný na trati, která je přímá a nemá žádné převýšení. To je ideální případ, ale v praxi je to velmi nereálné. Avšak při návrhu nové tratě nebo při volbě tratě, na které se má provozovat železniční vozidlo s nepřímým napájením, je potřebné, aby se stávající trať ideálně co nejvíce podobala. Velice nevhodné je, aby na trati bylo převýšení. To je pro jízdu vlaku energeticky velmi náročné.

Při volbě trati se také musí vycházet z dojezdu železničního vozidla. Trať nesmí být příliš dlouhá. Zvětšující se dojezd má vliv na zvětšující se dobu akumulace t_{AK} .

1.2.3. Vyhodnocení nároků na jízdu

Dle specifikovaných nároků na jízdu lze zvolit jak místo, kde je vhodné provozovat železniční vozidlo napájené z PV panelů, tak profil tratě.

Nejvhodnější místa pro provoz jsou ta, kde je největší intenzita záření a je velký počet slunečných dní. Pro volbu v ČR lze z Obr. 1-2 říci, že nejlepším místem pro provoz je jihovýchodní část Moravy. V těchto místech je z ČR největší intenzita dopadající energie na 1 m^2 . Ta dosahuje až hodnot okolo $1,1 \text{ MWh/m}^2$. I počet slunečných hodin je v těchto místech největší z celé ČR, ten se pohybuje v rozmezí 1787 - 1844 hodin za rok.

Při výběru lokality z Obr. 1-4 se jako nevhodnější místa jeví ta, která jsou blízko rovníku a jsou vyznačena žlutou barvou. Při výběru lokality v Evropě se vhodně jeví státy

okolo Středozemního moře. Za zcela nevhodné lokality se z tohoto obrázku dají označit všechna místa, která jsou označena růžovou až modrou barvou. Jsou to místa již velmi vzdálená od rovníku, na která během roku nedopadá moc velké množství sluneční energie.

Avšak společně s již zmíněnými vhodnými lokalitami musíme také brát v úvahu profil tratě. Ač se zdá například území na severu Indie vhodné z hlediska množství dopadající energie, zcela nevyhovující je terén. Je to území velmi hornaté.

Profil tratě musí být pokud možno s co nejmenším počtem oblouků. V případě, že na trati oblouky jsou, je vhodné, když jsou velkého poloměru. Stoupání a klesání by se pokud možno na těchto tratích vyskytovat nemělo.

1.3. Možnosti využití

Už na začátku kapitoly bylo psáno, že v závislosti na době akumulace se do zásobníku ukládá energie z PV panelů. Kdyby v průběhu celého dne byla intenzita dopadajícího záření stejná, byla by závislost mezi délkou akumulace a množstvím akumulované energie lineární. Jak ale bylo uvedeno na Obr. 1-6, v průběhu dne se intenzita značně mění. Proto pro akumulaci potřebného výkonu je v různý čas potřeba různá doba čekání.

V Obr. 1-8 je znázorněno, jak dlouho by se při dané intenzitě akumulovala energie 10 kWh do zásobníku. Rozměry střechy jsou 16 500 mm x 2 800 mm, využití plochy střechy je 80 %, účinnost PV panelů je 19,50 %, počet střech (vozů) je 2. Intenzita záření dopadá na plochu rovnoběžnou se zemí, na 50. rovnoběžce a pro den 15.6. Tento čas je vypočítán:

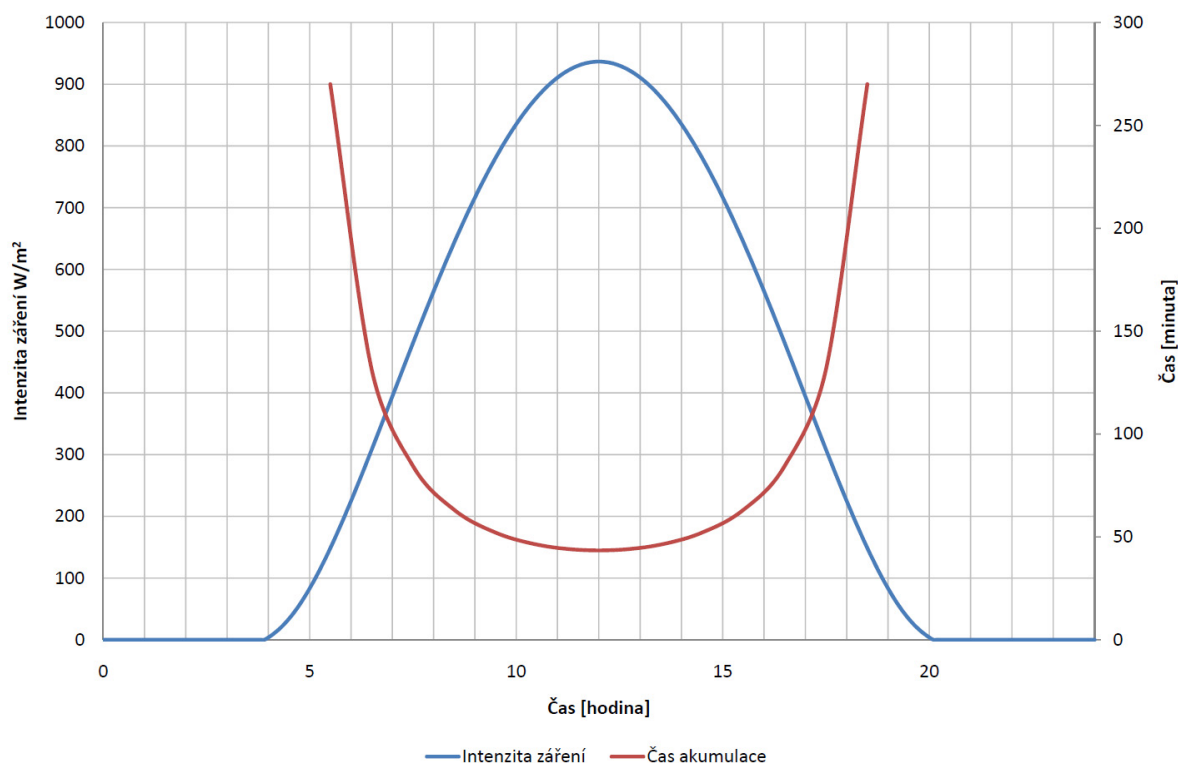
$$t_{AK} = \frac{(P - P_{PV}) \cdot t_{jizda}}{\eta_{ZAS} \cdot P_{PV}} \quad [\text{min}] \quad (3)$$

kde P – potřebný výkon [W]
 P_{PV} – výkon PV panelů [W]
 t_{jizda} – doba jízdy [min]
 η_{ZAS} – účinnost

P_{PV} je výkon PV panelů, který je:

$$P_{PV} = d_v \cdot \check{s}_v \cdot \eta \cdot v_s \cdot n \cdot p_{HOD} \quad [\text{W}] \quad (4)$$

kde p_{HOD} – intenzita záření v danou hodinu [W/m^2]
 d_v – délka střechy [m]
 \check{s}_v – šířka střechy [m]
 n – počet střech [-]
 v_s – využití střechy [%]
 η – účinnost PV panelů [%].



Obr. 1-8 - Závislost doby akumulace na intenzitě dopadajícího záření na podložku rovnoběžnou se zemí na 50. rovnoběžce v den 15.6 v ideální den bez mraků

Z průběhu času akumulace je názorně vidět, že v ranních a večerních hodinách je doba příliš dlouhá. Železniční vozidlo by příliš dlouho stálo, než by mohlo vyjet na trať. Tyto doby se tedy zkrátí tím, že se vozidlo bude nabíjet ze sítě 3 x 400 V.

Podle toho jak se intenzita zvětšuje, se následně začínají využívat PV panely a energie se akumuluje v zásobníku. Je vidět, že intenzita například v 10 hodin je jiná než intenzita ve 12 hodin. Z toho je zřejmé, že čas potřebný k akumulaci stejného množství energie se zmenšuje. Tím se také může zmenšovat délka stání vozidla a může se tím zvětšovat intenzita dopravy. Vozidlo při vyšší intenzitě záření jezdí častěji, než při menší intenzitě, protože PV panely mají v tu dobu větší výkon.

2. Parametry soudobých a perspektivních fotovoltaických článků a základní vlastnosti na zem dopadající sluneční energie z hlediska aplikace na drážní vozidlo

Jednou z nejdůležitějších částí železničního vozidla napájeného sluneční energií je fotovoltaický zdroj energie. Pro jeho použití a co nejefektivnější využití, je zapotřebí zjistit jeho základní vlastnosti a závislosti. Fotovoltaické články se jinak také nazývají PV články.

Jelikož je PV článek jediným zdrojem elektrické energie, nejdůležitějším parametrem je jeho výstupní výkon. Ten je ovlivněn množstvím dopadající energie a hlavně účinností PV článku. Čím vyšší účinnost PV článek má, tím je pro použití v tomto případě vhodnější.

Pro zjištění jeho vlastností je potřebné vysvětlit jeho funkci. Vlastnosti fotovoltaického článku totiž vycházejí již ze samotné podstaty přeměny energie dopadající ze Slunce. Další důležitou částí je technologie výroby PV článku. Ta velkou měrou ovlivňuje, jakou bude mít PV článek účinnost. Jelikož jsou PV články umístěny venku, musí být odolné proti venkovnímu prostředí, proto je důležitá i montáž článků do panelů.

2.1. Podstata fotovoltaické přeměny elektromagnetického vlnění na elektrickou energii

K přeměně elektromagnetické energie v energii elektrickou dochází v polovodičových fotovoltaických (PV) článcích. Nejpoužívanější PV články jsou vyráběny z krystalického křemíku. Nevyrábějí se však PV články jen z křemíku, používají se i jiné materiály. Záleží na konkrétních požadovaných vlastnostech. Vysvětlení přeměny energie se vztahuje na přeměnu energie v PV článku vyrobeného z křemíku. U jiných materiálů je princip přeměny totožný.

Polovodiče se dělí podle nosiče náboje na vlastní a příměsové. Polovodiče příměsové mohou být dotovány příměsí typu N nebo P. U příměsí typu N je majoritním nosičem náboje elektron a u příměsí typu P je majoritním nosičem náboje díra. Díra se chová jako kladný nosič náboje.

Atom křemíku (Si) má v plášti 14 elektronů. V poslední valenční vrstvě má elektrony 4. Kolem každého atomu křemíku jsou čtyři okolní atomy. Čtyři elektrony ve valenční vrstvě tvoří s okolními elektrony kovalentní vazby. Elektron, který není vázán vazbou k jinému atomu, může nabývat různých hodnot energie. Elektron, který je vázán vazbou k jinému atomu, to tedy platí i pro elektron vázaný v krystalové struktuře křemíku, může nabývat jen daných hodnot energie, jelikož se pohybuje v poli periodického potenciálu. Velikost této energie je dána pásem, ve kterém se elektron pohybuje. Tyto pásy se nazývají pásy dovolených energií a jsou od sebe navzájem odděleny pásy zakázaných energií.

Velmi důležité jsou tyto tři pásy:

- pás valenční (ten je za velmi nízkých teplot jako poslední obsazený),
- pás zakázaný (ten je neobsazený),
- pás vodivostní (ten je za velmi nízkých teplot jako první neobsazený).

Valenční pás má energii danou počtem jednotlivých elektronů v tomto pásu. Počet stavů je stejný jako počet valenčních elektronů. Při velmi nízkých teplotách budou všechny obsazené. Za valenčním pásem je pásmo zakázaných energií. V něm se nevyskytují žádné elektrony, jelikož nemohou mít stejnou energii jako tento pás. Další pás je pás vodivostní.

Ve valenčním pásu se nejvyšší energetická hladina označuje jako E_V . Ve vodivostním pásu se nejnižší energetická hladina označuje jako E_C . Rozdíl těchto energií se vypočítá jako

$$\Delta E_G = E_C - E_V \quad [\text{eV}] \quad (5)$$

a udává nám šířku zakázaného pásu. V případě nejnižšího energetického stavu jsou všechny valenční elektrony ve valenčním pásu, a tedy nemůže být zprostředkováno vedení

elektrického proudu. Materiál se chová jako izolant. Ve chvíli, kdy je dodána energie ve formě světelné (fotonu) nebo ve formě tepelné, dojde k uvolnění některých elektronů. Ty přejdou z pásu valenčního do pásu vodivostního. Tyto elektrony se pak mohou v krystalové mřížce volně pohybovat a mohou se tedy stát nosiči elektrického proudu. U atomů, od kterých se elektron odtrhl, tak vznikla prázdná místa. Ta se mohou znovu zaplnit jinými volnými elektrony. To by znamenalo, že se elektron z vodivostního pásu přesune zpět do valenčního pásu. Musel by tedy energii zase zpátky odevzdat. Nebo se do uvolněného místa může přesunout elektron od jiného atomu. To by způsobilo vytvoření tohoto volného místa zase u jiného atomu. Tato volná místa by se tedy pouze přesouvala. Při působení elektrického pole by se elektrony přesouvaly proti směru pole elektrické intenzity a prázdná místa by se přesouvala ve směru pole elektrické intenzity. To je z toho důvodu, že elektron má záporný potenciál a volné místo se chová, jako kdyby mělo kladný potenciál. Tato pohybující se volná místa se nazývají díry.

Je-li zkoumaný materiál tvořen jen jedním prvkem polovodiče (v tomto případě křemíkem), při každém uvolnění jednoho elektronu se vytvoří také pouze jedna díra. Navenek se tak materiál stále chová jako elektricky neutrální. K přesunutí elektronu z valenčního do vodivostního pásu je potřeba, aby foton měl dostatečnou energii k překonání zakázaného pásu. Křemík má šířku zakázaného pásu širokou zhruba $\Delta E_G = 1,1$ eV. Fotony s dostatečnou energií se v materiálu pohltnou a tím zapříčiní překonání zakázaného pásu a vytvoření dvojice elektron a díra, zatímco fotony s menší energií materiálem pouze projdou.

Ze vzorce pro energii fotonu lze vypočítat, které vlnové délky záření mohou vytvořit dvojici díra - elektron:

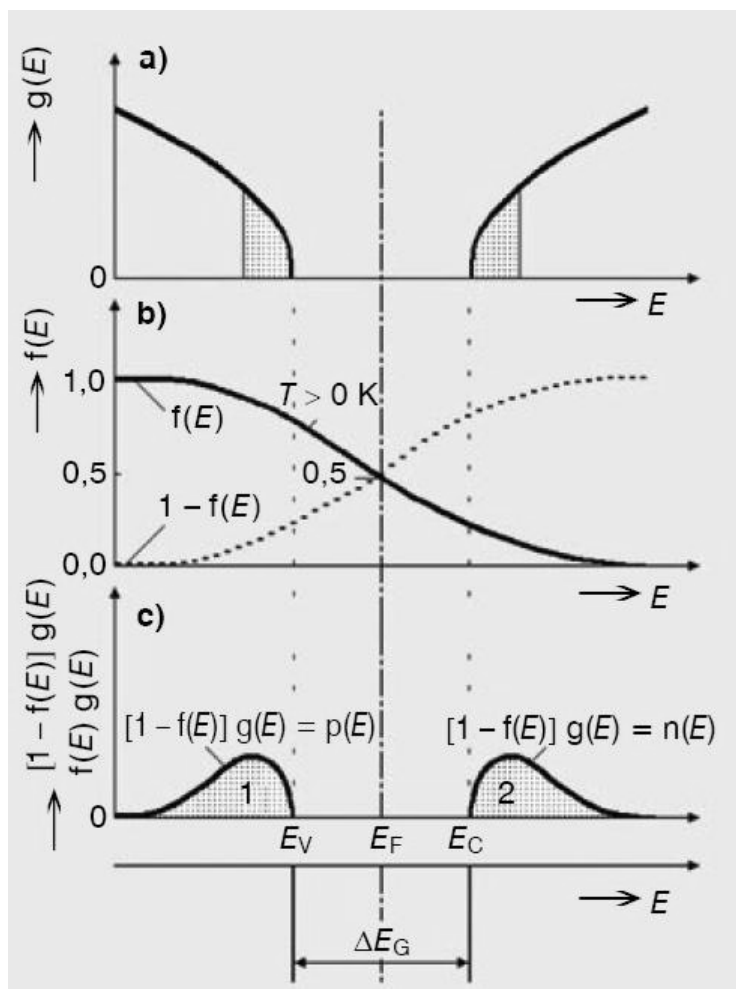
$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad [\text{J}] \text{ nebo } [\text{eV}] \quad (6)$$

kde h – Planckova konstanta

($h = 6,626\ 068\ 96 \cdot 10^{-34}$ [J.s], nebo $h = 4,135\ 667\ 33 \cdot 10^{-15}$ [eV])

f – frekvence

c – rychlost světla.

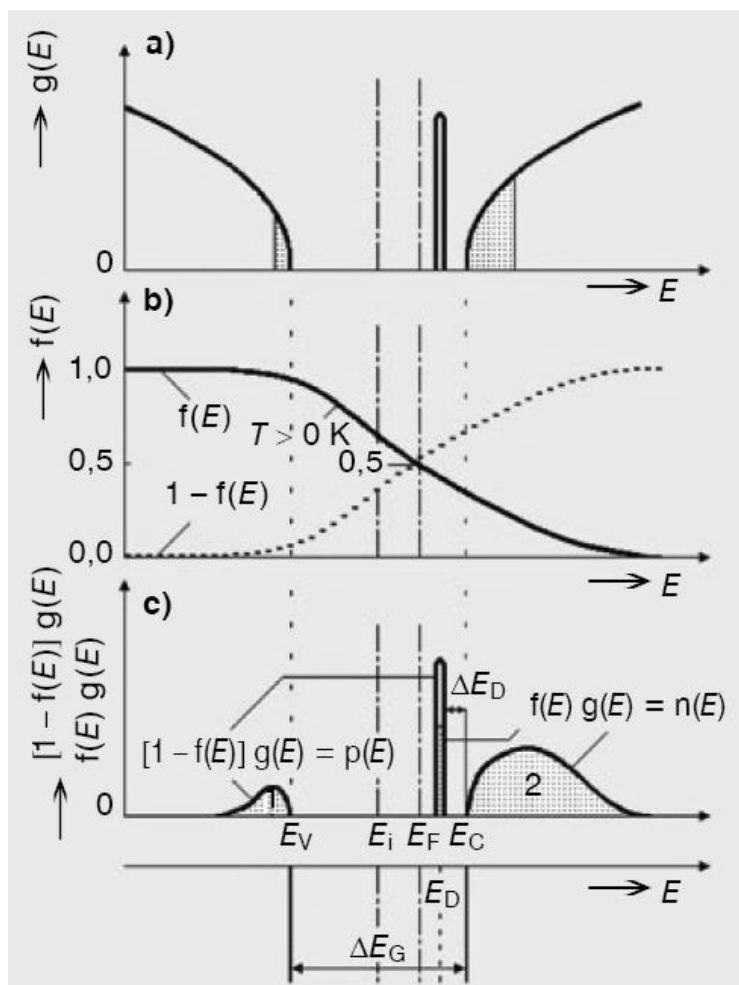


Obr. 2-1 - Model elektronů a děr - vlastní polovodič [7]

Na Obr. 2-1 jsou vyobrazeny důležité charakteristiky vlastního polovodiče. Na Obr. 2-1a je funkce $g(E)$. Tato funkce v závislosti na energii ukazuje hustotu energetických stavů elektronů ve valenčním a ve vodivostním pásu. Mezi těmito pásy je vyznačen zakázaný pás ΔE_G . Na Obr. 2-1b je funkce $f(E)$. Ta naznačuje pravděpodobnost obsazení stavu s intenzitou E elektronem a funkce $1 - f(E)$ je pravděpodobnost neobsazení daného stavu. Na Obr. 2-1c je funkce $[1 - f(E)]g(E) = p(E)$. Tato funkce ukazuje množství děr ve valenčním pásu. Funkce $f(E)g(E) = n(E)$ udává množství elektronů ve vodivostním pásu. Tyto funkce platí při nenulové teplotě. Vyznačené plochy 1 a 2 na obrázku jsou úměrné koncentraci. Pro vlastní polovodiče jsou tyto vyznačené plochy stejné.

2.1.1. Polovodič typu N

Materiál však lze upravit tím, že některé atomy křemíku Si jsou nahrazeny jinými atomy z V. skupiny Mendělejevovy periodické soustavy prvků (např. P, As, Sb). Ty mají ve valenčním pásu pět elektronů. Čtyři elektrony se budou vázat u ostatních atomů křemíku s elektrony kovalentní vazbou. Pátý elektron bude vázán k atomu přidaného prvku jen slabě. Takovýto polovodič dopovaný příměsí z V. skupiny prvků se nazývá polovodič typu N (podle angl. Negative). Když dodáme materiálu jen malé množství energie, pátý elektron přejde do vodivostního pásu a stane se tak volným. Pětimocné atomy dodané do materiálu se nazývají donory, protože dotují čistý polovodič elektrony.



Obr. 2-2 - Model elektronů a děr - polovodič typu N [7]

Na Obr. 2-2 jsou pro polovodič s příměsí pětimocného prvku zobrazeny stejné závislosti, jako pro polovodič čistý na Obr. 2-1. E_D označuje v obrázku donorovou hladinu energie. Pro přechod elektronu z hladiny s donorovou energií do vodivostního pásu je potřeba energie ΔE_D . Potřebná energie ΔE_D je mnohem menší než pro přechod elektronu z valenčního pásu do vodivostního. Její hodnota je přibližně $\Delta E_D \approx 0,01$ eV.

Z Obr. 2-2b je patrné, že při pokojové teplotě může elektron přejít do vodivostního pásu mnohem snadněji. Díky malé hodnotě ΔE_D jsou při pokojové teplotě donorové elektrony ionizovány. Ve vodivostním pásmu jich je mnohem více než děr ve valenčním pásmu. To značí Obr. 2-2c. Plocha 2, což je množství elektronů ve vodivostním pásmu, je větší než plocha 1, která značí množství děr ve valenčním pásmu. Velikost ploch však není ve stejném poměru jako poměr mezi elektrony a dírami.

2.1.2. Polovodič typu P

V materiálu lze nahradit některé atomy také prvkem z III. skupiny Mendělejevovy periodické soustavy prvků (např. In, Al). Ty mají ve valenčním pásmu pouze tři elektrony. To znamená, že tři elektrony se budou vázat s ostatními elektrony atomu křemíku. Čtvrtá vazba nebude vytvořena a bude se chovat jako díra. Při dodání energie může na toto místo přeskočit elektron od vedlejšího atomu. Tím se díra přesouvá.

Takovýto polovodič dopovaný příměsí z III. skupiny prvků se nazývá polovodič typu P (podle angl. Positive). Tyto příměsi, které v materiálu vytváří díry, se nazývají akceptory.

Energetické schéma pro polovodiče typu P je analogické s energetickým schématem pro polovodiče typu N na Obr. 2-2. Místo donorové energetické hladiny je ve schématu

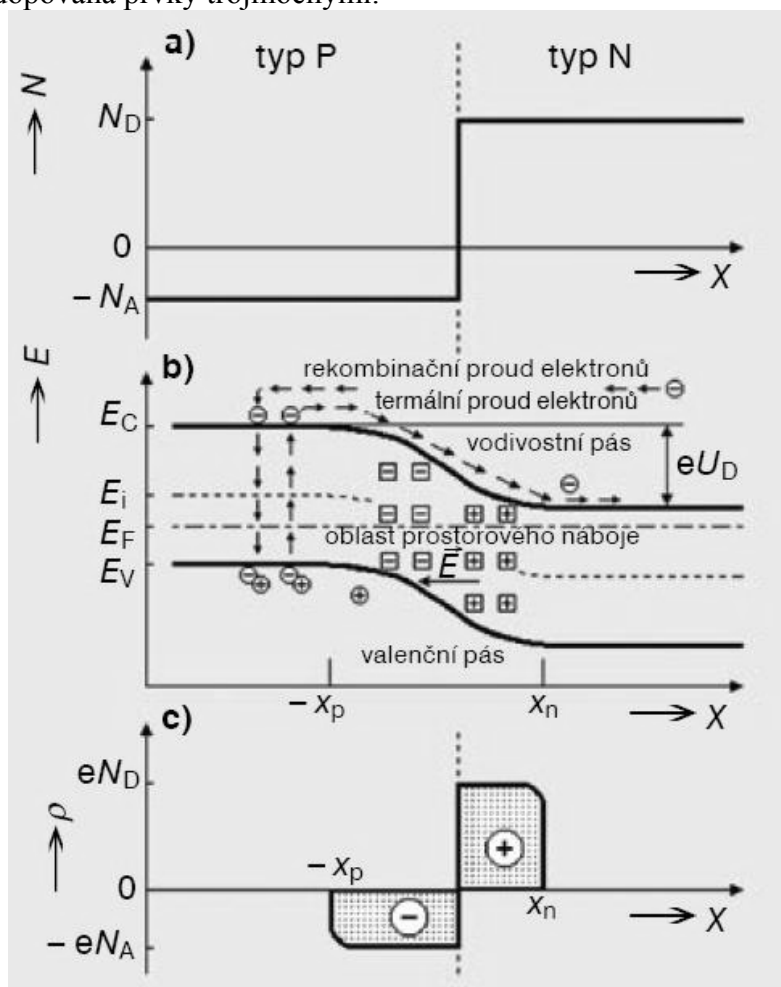
akceptorová energetická hladina E_A . Ta se nachází v zakázaném pásmu v blízkosti valenčního pásu. Pro přeskočení elektronu z valenčního pásu do donorového pásu je zapotřebí velmi malého množství energie ΔE_A . Po tomto elektronu na jeho místě zůstane díra.

V takovémto materiálu je mnohem větší množství děr ve valenčním pásmu než volných elektronů ve vodivostním pásmu. Obdobně jako v Obr. 2-2c by plocha 1 (množství děr ve valenčním pásmu) byla větší než plocha 2 (množství elektronů ve vodivostním pásmu).

Při výrobě nelze docílit přesně rovnoměrného rozložení atomů křemíku a příměsí. Na některých místech je koncentrace příměsí větší a na některých místech zase menší. Volné nosiče náboje, což jsou elektrony a díry, mají snahu se přesouvat z míst s větší koncentrací do míst s menší koncentrací, aby bylo rozložení rovnoměrné. Na místech, ze kterých unikají volné nosiče, zůstávají pevně vázané náboje, které mají opačné znaménko. Tak na těchto místech vznikají silná lokální elektrická pole. Tato vzniklá pole brání dalšímu unikání volných nosičů z více dotovaných míst a tím v materiálu vytváří rovnovážný stav.

2.1.3. Přechod PN

Nejstrmější přechod mezi těmito oblastmi je na přechodu PN. To je v ideálním stavu na Obr. 2-3. Tento přechod vzniká tak, že část křemíku je dotována pětimocnými prvky a vedlejší část je dopována prvky trojmocnými.



Obr. 2-3 - Model - přechod PN [7]

Na přechodu PN je koncentrace volných nosičů dána $grad N$. To je na Obr. 2-3a, N_D je koncentrace donorů a N_A je koncentrace akceptorů. Jak bylo napsáno v předchozím textu, elektrony a díry mají snahu vyrovnat tyto rozdíly. Proto část volných elektronů přejde z oblasti N do oblasti P a část děr přejde z oblasti P do oblasti N. Pevně vázané náboje příměsí

tak vytvoří oblasti s opačným prostorovým nábojem a tím zabrání dalšímu přecházení volných elektronů z N do P. Šířka přechodu PN je vyznačena body x_p a x_n . U_D je difuzní napětí, to je potenciálový rozdíl mezi oblastmi s různým množstvím dopování.

Takto popsaný přechod PN může být například polovodičová dioda. Tento přechod je ve stavu dynamické rovnováhy, nikoli však statické. To znamená, že v tomto polovodiči při teplotě vyšší než 0 K stále dochází ke generaci a rekombinaci elektron - díra. Přes přechod PN stále oběma směry tečou proudy. Na Obr. 2-3b je vyznačen pouze proud elektronů jedním směrem. Pro díry je tento cyklus podobný, jen je opačný. Elektrony ve vrstvě N, které mají vyšší energii, než je potenciálová bariéra difuzního napětí U_D , přecházejí do vrstvy P a tam rekombinují s dírami. Tento proud se nazývá rekombinační.

Ve vrstvě P se v tu samou dobu generují volné elektrony a díry. Volné elektrony zase přecházejí zpět do vrstvy N. Tento proud se nazývá termální nebo difuzní. Když není k přechodu PN přiloženo žádné napětí, jsou proudy rekombinační a difuzní v rovnováze a navenek vykazuje přechod PN nulovou činnost.

Když je k přechodu PN přiloženo vnější napětí, rovnováha mezi proudy se poruší. Při přiložení kladného pólu k vrstvě typu P se zmenší potenciálová bariéra tedy difuzní napětí U_D . Přechod PN je orientován v propustném směru. Rekombinační proud se zvětší a tím se zvětší přestup elektronů do vrstvy P a děr opačným směrem.

Při přiložení napětí opačného, tedy kladného pólu k vrstvě N se potenciálová bariéra a tedy difuzní napětí U_D zvětší. Rekombinační proud se tedy zmenší a zvětší se proud difuzní. Přechod PN je v tuto chvíli polarizován záporně.

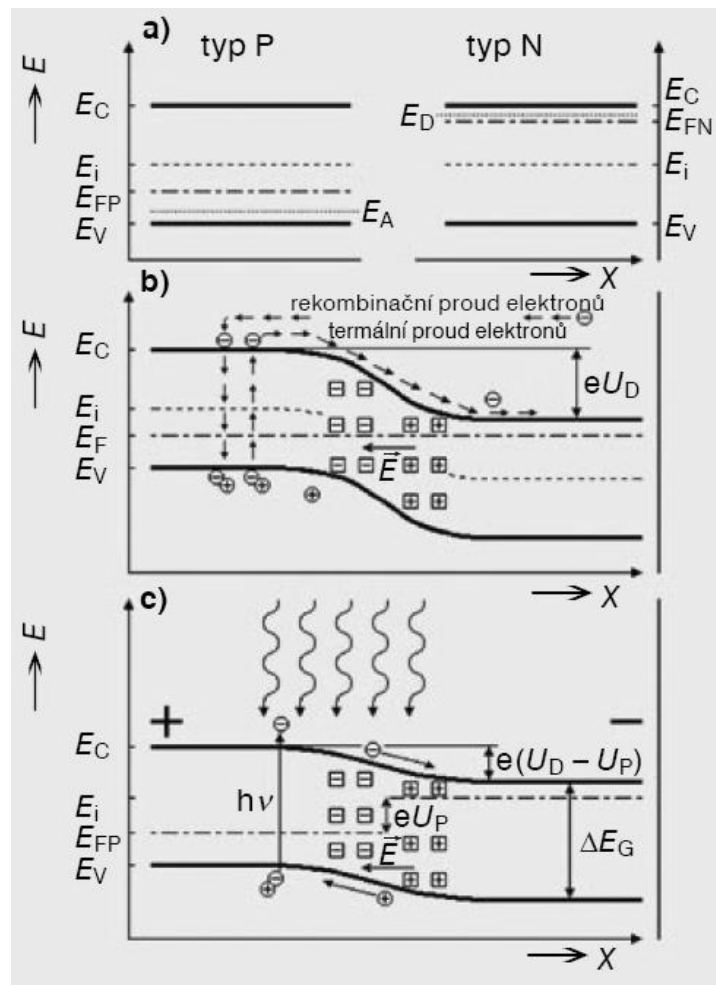
2.1.4. Princip fotovoltaického jevu

V předchozím textu je popsán princip fungování přechodu PN. Další popis je zaměřen přímo na fotovoltaickou přeměnu záření na elektrickou energii.

Tato přeměna probíhá ve fotovoltaických polovodičových člancích. V nich se dopadající energie ve formě fotonů přeměňuje na elektrický proud. Je to diodový přechod konstruovaný na velké ploše. Přechod je umístěn kolmo k dopadajícím paprskům mezi přední a zadní stranou fotovoltaického panelu. Dopadající fotony, které mají větší energii než je šířka zakázaného pásma, generují při dopadu volné elektrony a díry, tím předávají svojí energii a zanikají.

Fotony, které mají menší energii, ji předávají mřížce a tím ji zahřívají a rozkmitávají.

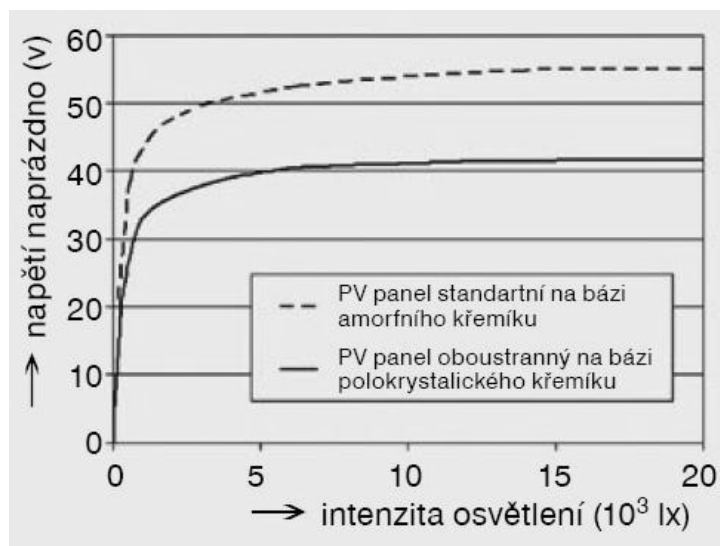
Generované volné elektrony a díry na přechodu PN jsou od sebe odděleny elektrickým polem E , které je mezi vázanými prostorovými náboji. Elektrické pole urychluje díry ve směru pole a elektrony ve směru opačném. Mezi póly P a N se objeví elektrické napětí. Po zapojení PV článku do obvodu se chová jako zdroj elektrického napětí a elektrickým obvodem teče stejnosměrný proud.



Obr. 2-4 - Model fotovoltaické přeměny energie [7]

Celý tento princip je popsán na Obr. 2-4. Na Obr. 2-4a je rozvržení energetických hladin v polovodiči typu P a N. Na Obr. 2-4b je neosvětlený PV článek. Je zde naznačen ohyb jednotlivých pásů přechodu, dále jsou zde proudy rekombinační a difuzní (termální), které jsou stejně velké ale opačné a ještě je zde difuzní napětí. PV článek se ve tmě chová jako polovodičová dioda.

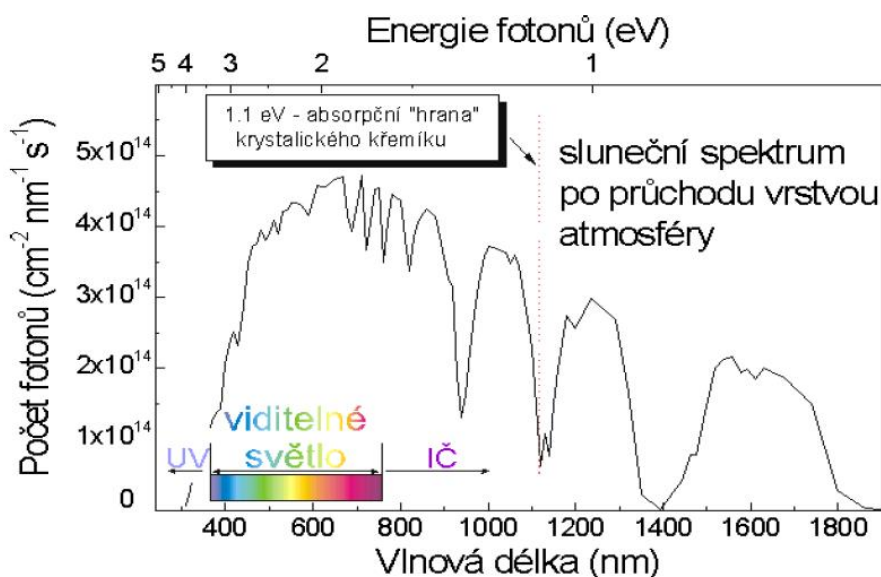
Na Obr. 2-4c je PV článek, na který dopadá energie ve formě fotonů. Dopadáním fotonů na přechod PN se vytvoří nová rovnovážná poloha. V přechodu se začnou generovat volné elektrony a díry a ty jsou urychlovány elektrickým polem, které je naznačeno šipkami. Polovodič typu P se nabíjí kladně, polovodič typu N se nabíjí záporně. Při dopadu fotonů se potenciálová bariéra U_D zmenší a objeví se fotovoltaické napětí U_P . Velikost tohoto napětí může maximálně odpovídat původnímu zakřivení pásů. U křemíku je tato hodnota $U_P = 0,6$ V. Při dalším zvyšování intenzity osvětlení se již napětí naprázdno nezvětšuje.



Obr. 2-5 - Závislost napětí PV panelu na intenzitě záření [7]

Je to vidět na průběhu grafu na Obr. 2-5. Je to z toho důvodu, že fotovoltaické napětí je vykompenzováno prostorovými náboji na přechodu PN, ty mají opačné napětí.

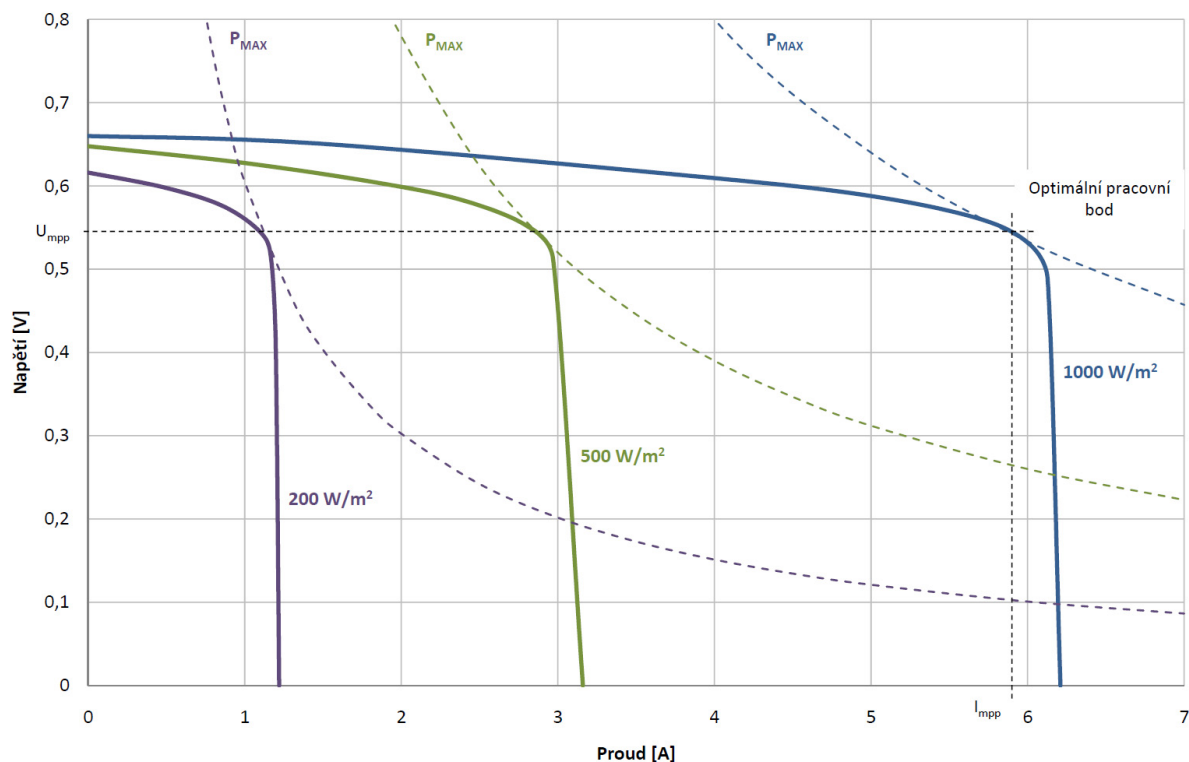
Při zapojení osvětleného PV článku do elektrického obvodu se zmenší fotovoltaické napětí U_p , tím se zvětší zakřivení pásů a zvětší se potenciálová bariéra. Při tomto ději se sníží rekombinační proud a zvýší se proud termální. Algebraický součet těchto proudů bude nenulový a výsledný proud se bude dodávat z PV článku (jako ze zdroje elektrického napětí) do obvodu (zátěže).



Obr. 2-6 - Spektrum slunečního záření [8]

Velikost zakázaného pásu u křemíku je 1,1 eV. Z již zmíněného vzorce pro výpočet energie fotonu lze určit, které vlnové délky slunečního záření mají energii stejně velkou nebo větší. Pro PV články vyrobené z křemíku jsou důležitá vlnění $\lambda \leq 1100$ nm.

Toto je zobrazeno na Obr. 2-6. Na něm je spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou. Na obrázku je zobrazeno rozhraní vlnových délek označené jako absorpční „hrana“ krystalického křemíku. Vpravo od bariéry mají fotony energii menší než 1,1 eV, proto se při fotovoltaickém jevu neuplatní. Vlevo od bariéry mají fotony energii větší než 1,1 eV, ty se uplatní.

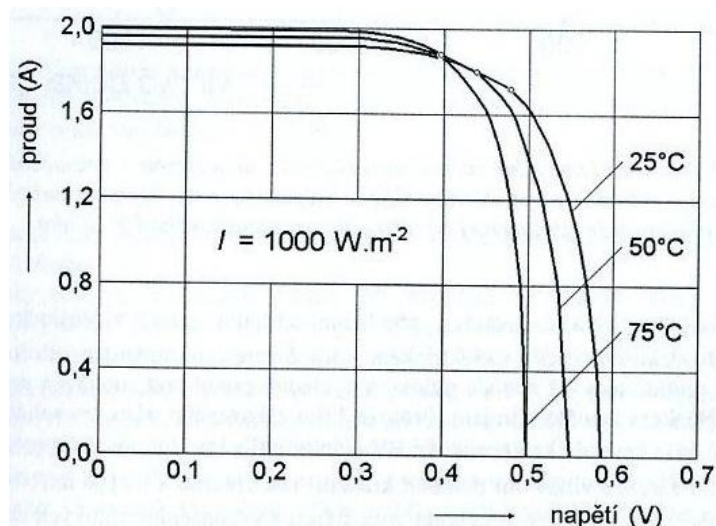


Obr. 2-7 - VA charakteristika PV článku - optimální pracovní bod - při teplotě 50°C

Na Obr. 2-7 je volt-ampérová charakteristika křemíkového PV článku zapojeného do elektrického obvodu jako zdroj energie. V tomto grafu je zkoumána velikost dodávané energie do obvodu v závislosti na intenzitě osvětlení PV článku. Na vodorovné ose je proud v ampérech a na svislé ose je napětí ve voltech. Průsečíky křivek s osou proudu ukazují velikost proudu, kterou dodává PV článek do obvodu s nulovou zátěží (do zkratu). Průsečíky s osou napětí udávají jaké je výstupní napětí na nezátíženém PV článku (když je obvod rozpojen). Na křivce pro intenzitu osvětlení 1000 W/m² je vyznačen optimální pracovní bod. Je to pracovní bod, v kterém dodává PV článek do obvodu největší množství energie. V tomto bodě je totiž největší plocha vyznačeného obdélníku, který je tvořen součinem napětí a proudu. Účinnost takového článku se určí jako:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{U_{mpp} \cdot I_{mpp}}{p \cdot S} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7)$$

kde P_2 – výkon PV článku [W]
 P_1 – dopadající výkon na PV článek [W]
 p – intenzita dopadajícího záření [W/m²]
 S – plocha článku [m²]



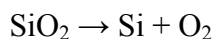
Obr. 2-8 - VA charakteristika – závislost výstupního výkonu na teplotě [3]

Na Obr. 2-8 je také volt-ampérová charakteristika křemíkového PV článku. Tento graf je zaměřen na velikost dodávané energie při konstantním osvětlení (v tomto případě 1000 W/m^2) v závislosti na teplotě PV článku. Je vidět, že při zvyšující se teplotě PV článku se také zvětšuje proud nakrátko, ale zároveň se zmenšuje napětí naprázdno. Zase jsou zde vyznačeny optimální pracovní body. Jak je z obrázku a polohy bodů patrné, při zvyšující se teplotě a konstantní intenzitě osvětlení se zmenšuje množství dodávané energie. S rostoucí teplotou tedy klesá účinnost. Je to způsobeno tím, že pokles výstupního napětí je větší než nárůst výstupního proudu.

2.2. Výroba fotovoltaických článků

Nejvíce používaným materiálem pro výrobu fotovoltaických článků a i proto byl na něm vysvětlen princip, je křemík. Je to tím, že křemík má velkou řadu výhod. První a velmi příznivé je to, že křemík je hojně zastoupen v zemské kůře. Je to dokonce druhý nejrozšířenější prvek, proto je jednoduše dostupný a má díky tomu příznivou cenu. Další výhodou je to, že není jedovatý. Jednou z nejdůležitějších kladných vlastností je ta, že křemík je asi nejvíce zvládnutým polovodičovým prvkem. Jak již bylo psáno v předchozí části, šířka zakázaného pásu je $\Delta E_G = 1,1 \text{ eV}$, což je také příznivé.

Křemík se nevyskytuje v přírodě ve formě čistého křemíku, ale převážně ve formě oxidu křemíku (SiO_2). Je ve tvaru malých zrněk, která jsou mechanicky odolná a chemicky stabilní a je velmi dobře znám jako křemenný písek. Čistý křemík se získává z křemičitého písku redukcí uhlíkem v obloukové peci. Při výrobě dochází k celé řadě reakcí. Zjednodušeně je lze napsat:



V peci se křemík taví až na teplotu $T \approx 2000 \text{ }^\circ\text{C}$. Takto rozzhavený křemík se z pece odlévá. Má vysokou čistotu až 99 % a jen 1 % jsou nečistoty hlavně železo, hliník a uhlík. Takový to materiál ale ještě není možné použít. Je stále příliš znečištěn cizími prvky. Následné čištění se provádí různými technologickými metodami. Pro výrobu integrovaných obvodů se musí dosáhnout značně velké čistoty. Dovolené množství nečistot v materiálu je menší než 10^{-9} . Pro výrobu PV článků je postačující o něco menší čistota. Dovolené množství nečistot v materiálu je menší než 10^{-6} . Skoro dvě třetiny potřebné energie pro výrobu PV článku se spotřebuje při získávání čistého křemíku. To je nejvíce náročný proces výroby na spotřebovanou energii. V současné době jsou ve stádiu vývoje nové technologie, které jsou energeticky méně náročné a příznivější z hlediska ekologie.

Čistota křemíku se kontroluje pomocí měření rezistivity. Ta se měří a v případě, že je menší než předpokládaná, je to zaviněno přítomností příměsí. Z čistého materiálu se následně vyrábí monokrystalický nebo polykrystalický ingot.

Výroba PV článků z křemíkových monokrystalických nebo polykrystalických ingotů se nazývá jako „1. generace fotovoltaických článků“.

Výroba polykrystalického ingotu je jednodušší. Při výrobě se hrudky čistého materiálu roztaví, nalijí se do formy a v předem definovaném režimu chladnou. Chladnutí musí být pomalé, aby se v křemíku vytvořila co největší monokrystalická pole. Je totiž potřeba, aby bylo v materiálu co nejméně pnutí, poruch krystalické mřížky a podobných nepříznivých míst. Tato místa představují pro elektrony potenciálové bariéry, což je nepříznivý jev.

Technologie výroby monokrystalického ingotu se nazývá Czochralského metoda. Do roztaveného křemíku, který má teplotu asi 1 415 °C, je ponořen monokrystal křemíku. Ten se následně začíná velmi pomalu vytahovat a zároveň se otáčí kolem podélné osy. Všechno se odehrává v ochranné atmosféře za sníženého tlaku.

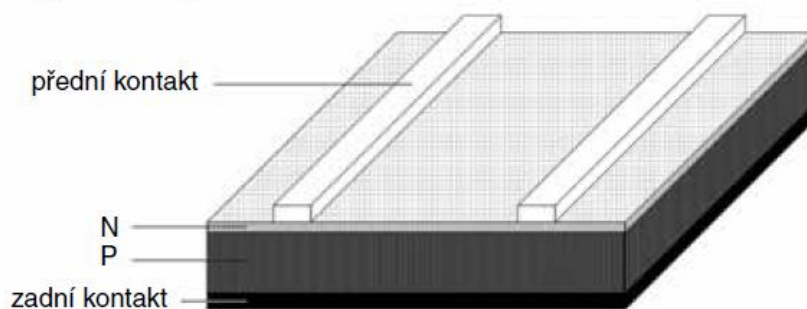
Z vytvořeného ingotu se následně řezou tenké destičky, které jsou pak základem pro PV články. Nejen technologie výroby čistého křemíku prochází neustálým zlepšováním, i technologie řezání se stále zdokonalují. Dnes je možné řezat destičky o tloušťce přibližně 100 μm se stejně velkým průřezem materiálu. Tím se také zvětšila úspora materiálu.

Přechod PN v PV člancích se provádí pomocí difuze v difuzních pecích. Na vrstvu křemíkové destičky se napařuje vrstva příměsí. Přední strana bývá opatřena antireflexní vrstvou, aby se minimalizoval odraz záření a aby se využila co největší část. Proto se na pohled zdá, že PV články mají černou barvu.

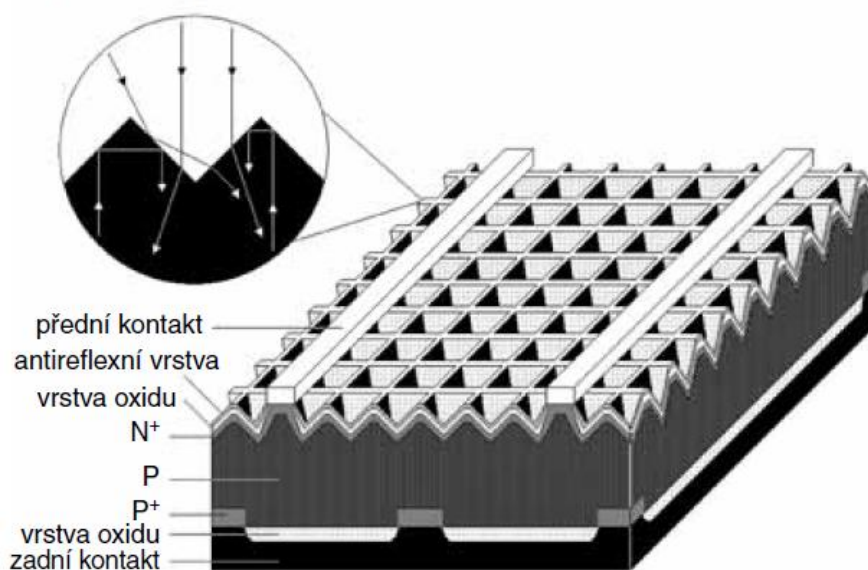
Zadní kontakt je zpravidla konstruován po celé zadní ploše článku. Přední kontakt se však musí konstruovat jinak. Kdyby byl na celé ploše zastínil by přechod PN a tím by na něho nedopadalo žádné záření. Přední kontakt je konstruován jako mřížka nebo jako hřebínek. Technologií vytváření kontaktu na přední straně je několik. Buď se kontakt nanáší sítotiskem, nebo se používají náročnější postupy, jako je třeba napařování ve vakuu. Jsou i speciální technologie, jako je vnořený kontakt do polovodiče. Dělají se u speciálních článků, které se používají v prostředí s vysokou intenzitou záření. Jednak je to lepší z toho důvodu, že se zvětší styková plocha kontakt – polovodič a také se zvětší průřez kontaktu z důvodu vysokých proudových hustot.

Tloušťka polovodičových článků je obvykle 0,2 mm.

a) jednoduchý model



b) článek s vysokou účinností



Obr. 2-9 - Jednoduchý PV článek a článek s vysokou účinností [9]

Na Obr. 2-9 jsou dva typy PV článků. Na Obr. 2-9a je jednodušší vyráběný typ. Jeho princip činnosti je stejný, jako je popsán již v předchozím textu. Tento článek má nižší účinnost hlavně kvůli rekombinačním ztrátám.

Na Obr. 2-9b je další typ PV článku. Ten má díky některým konstrukčním zdokonalením vyšší účinnost. Na povrchu je článek opatřen antireflexní vrstvou. Ta slouží k tomu, aby se od povrchu odrazila mnohem menší část záření a k přechodu PN prošla většina dopadajících fotonů. Vrstva oxidu zpasivňuje přední stranu. Tato vrstva je přerušena jen na některých místech a právě těmito místy je odváděn elektrický náboj. Přední plocha není plochá jako v provedení jednoduchého modelu, ale je ve tvaru naznačeném na obrázku. To usnadňuje fotonům vniknout do materiálu. Když foton projde přes přechod PN, nevyvolá fotovoltaický jev a odrazí se od zadní strany, nemůže přední stranou vylétnout ven z článku. Na přední straně dojde k totálnímu odrazu a foton znovu letí k PN přechodu. Tím se zvyšuje pravděpodobnost fotovoltaické přeměny. Některé články se vyrábějí jako oboustranné. Ty mají na obou stranách stejný povrch, jako je přední strana článku na Obr. 2-9b. Do nich může záření vstupovat z obou stran. Zadní stranou do článku vstupuje záření odražené od země nebo od speciálně vytvořených zrcadel nebo jiných zařízení a tím se také zvyšuje možnost fotovoltaické přeměny.

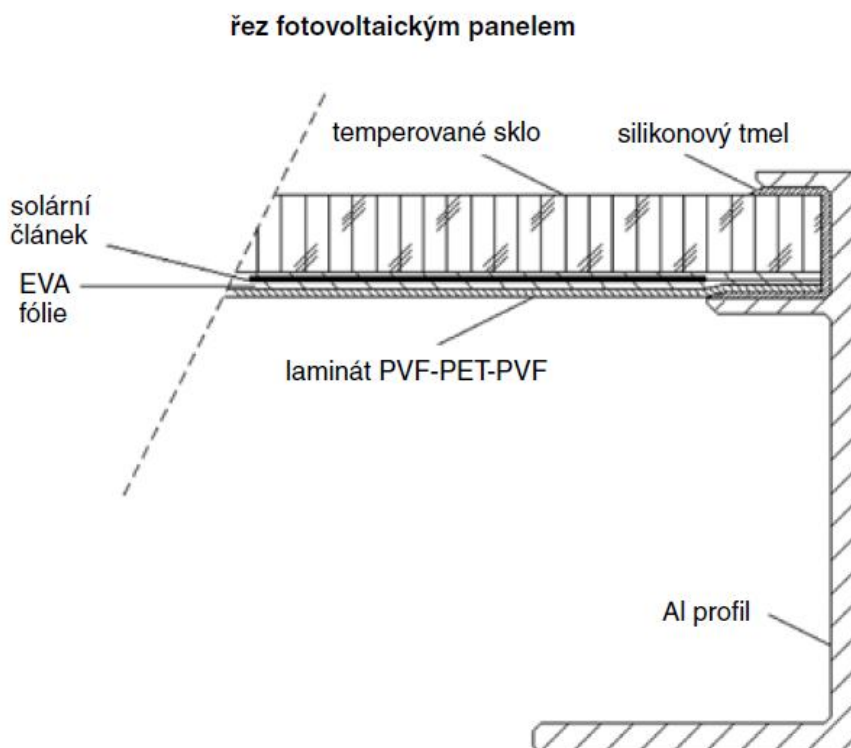
Účinnost u sériově vyráběných monokrystalických PV článků je v nynější době okolo 20 %. V laboratorních podmínkách za přispění různých technologických a technických vylepšení se účinnost těchto PV článků pohybuje okolo 30 %. Některé PV články vyrobené na

bázi jiných materiálů např. InP nebo GaAs mají účinnost až 25 %. Takovéto PV články mají i jiné kladné vlastnosti, jako je třeba odolnost proti kosmickému záření, menší ovlivnění účinnosti při zvyšování teploty. Jejich cena je ale oproti PV článkům z křemíku několikanásobně větší. Těchto vlastností se využívá pro použití ve vesmíru (jako napájení družic, sond aj.).

PV články se vyrábějí i z jiných materiálů např. CuInSe nebo CdTe nebo na bázi heteropřechodů různých polovodičových materiálů. Tyto články mají dvě základní vlastnosti jednu kladnou a druhou zápornou. Jejich cena je sice menší, ale menší je i jejich účinnost. Pohybuje se okolo 10 % a navíc jsou jejich parametry nestálé a s časem se nepříznivě mění. Dají se vyrobit články s účinností až 15 %, ale jejich účinnost brzy klesá a dostává se pod 10 %. Avšak tyto články našly své použití hlavně v napájení malých elektronických zařízení, jako jsou kalkulačky, hodinky apod. a to i proto, že mají lepší vlastnosti při menší intenzitě osvětlení.

2.3. Montáž do panelů

Samotné PV články by byly velmi choulostivé na možné mechanické poškození. Vyrábí se tedy PV panely, v kterých jsou PV články skládány do série tak, aby dosahovaly požadované velikosti napětí, při předem definované intenzitě dopadajícího záření. Jelikož jsou panely umístěny venku, aby na ně mohlo dopadat sluneční záření, musí být odolné proti venkovnímu prostředí. Řez jedním PV panelem je na obrázku Obr. 2-10.



Obr. 2-10 - Řez PV panelem [9]

Toto je jedna z nejběžnějších konstrukcí panelů. Přední část panelu je konstruována ze solárního tvrzeného skla. Toto sklo je velmi odolné proti nárazu a vydrží dopad i poměrně velkých krup. Na skle je položena fólie EVA (etyl-vinyl-acetát) a na ní jsou rozloženy jednotlivé PV články. Ty jsou propojeny sériově. Na PV články je znovu položena EVA fólie. Na zadní části je krycí fólie, která je většinou tvořena laminátovou kompozicí PVF-PET-PVF (polyvinylidenfluorid-polyetylentereftalát-polyvinylidenfluorid).

Když jsou jednotlivé vrstvy složeny dohromady, odčerpá se vzduch a celá sestava se zahřeje nad teplotu tání EVA fólie. Ta se roztaví a zalije PV články mezi předním sklem a krycí fólií.

V posledním kroku se panely umísťují do hliníkových profilů a tmelí se silikonovým tmelem. Ke každému takto vytvořenému panelu je ještě přimontována krabice s vývodními kontakty.

Takto sestavené panely jsou odolné proti přírodním vlivům, jako je déšť, vítr, prachové nečistoty aj. Životnost panelů se pohybuje v rozmezí 20 až 30 let.

2.4. Tenkovrstvá technologie

Tato technologie se označuje jako „2. generace vývoje fotovoltaických článků“. Při již zmíněných technologiích je spotřeba křemíku pro výrobu PV článků příliš vysoká. Udává se, že na 1 W je potřeba 9 g křemíku. Při výhledech do roku 2100 a s vizí použití monokrystalických a polykrystalických PV článků pro fotovoltaické elektrárny je obava, aby bylo dostatečné množství křemíku pro jejich výrobu. Proto se vymýšlejí nové technologie, které mají množství použitého křemíku ušetřit. Jednou z těchto technologií je i technologie tenkovrstvá.

Tato technologie je založena na tom, že jednotlivé polovodičové vrstvy se nanášejí různými technologickými postupy na libovolný podklad, nejčastěji to je sklo nebo plast. Tloušťka takového článku je pak mnohem menší asi 600 krát než u předchozí technologie. Tím se tedy ušetří velké množství materiálu. Nevýhodou této výroby je však stále menší účinnost. Ta se pohybuje okolo 8 % až 10 %. Podle zkušeností z vývoje PV článků touto metodou se předpokládá, že se účinnost bude zvyšovat.

Pro její zvýšení se již teď používá technologie vícevrstvého přechodu nazývaná „trojitý přechod“. Díky této úpravě se může využít širší spektrum záření. Spodní strana článku a zároveň záporný pól je tvořena z ušlechtilé oceli, vhodně upravena plastickými potahy. Dále jsou nanášeny jednotlivé vrstvy *P*, *I* a *N*. Vrchní kladný pól je tvořen z mřížky vytvořené z ušlechtilé oceli. První vrstva *P* je tvořena křemíkem, druhá vrstva *I* je tvořena slitinou germania a křemíku a třetí vrstva *N* je tvořena zase slitinou germania a křemíku, v níž ale převažuje germanium.

2.4.1. Montáž do panelů

Následně se provádí montáž do panelů. Před tím se však ještě jednotlivé články zalijí do speciálního polymerního obalu. Ten je vysoce odolný proti otěru a mechanickému poškození. Zabraňuje tvorbě usazenin a zajišťuje, že článek je stále viditelný, jelikož má samočisticí vlastnosti. Tento obal je vyroben z materiálu na bázi EVA (etyl-vinyl-acetát) a na bázi teflonu TEFZEL.

Velkou výhodou těchto článků je, že jsou pružné a dají se ohýbat. Proto se hojně využívají a specializují se na to jednotlivé firmy, jako jednak hydroizolační systémy plochých střech a zároveň jako výkonné fotovoltaické elektrárny. Jednotlivé PV články jsou umístěny na fóliové pásy, které se pak připevňují na střechy. Hmotnost takovýchto fóliových pásů je menší než hmotnost klasických PV panelů.

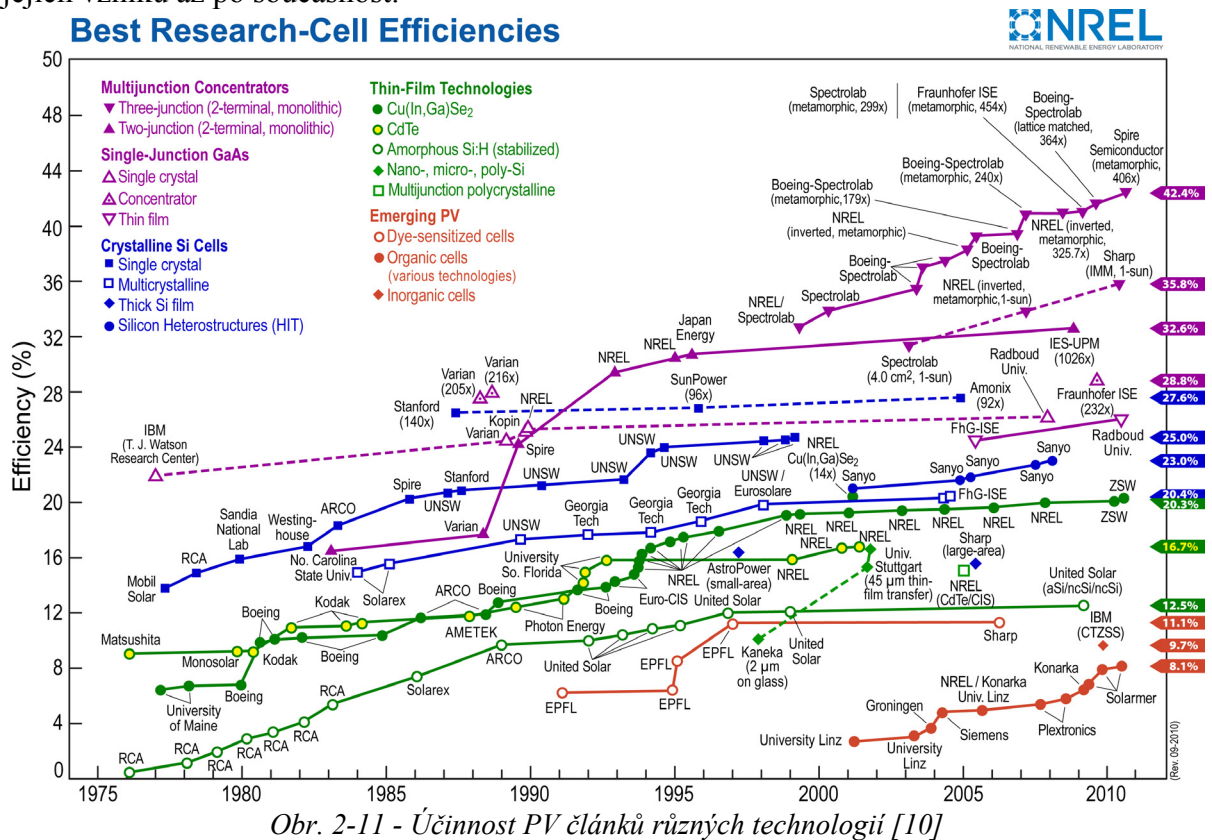
2.5. 3. generace vývoje fotovoltaických panelů

Snahou všech je zvýšit účinnost PV článků. Toho se vědci snaží docílit různými technologickými postupy, různými použitými materiály a různými jinými vylepšeními.

Mezi tyto technologie se řadí např. i vícevrstvé přechody. Tato technologie byla popsána o několik odstavců dříve. Jako zajímavost by se dalo uvést, že vědci se zabývají přeměnou slunečního záření na elektrickou energii, ke které dochází v organických látkách. Tato technologie je zatím testována jen v laboratořích a její účinnost je někde mezi 2 % a 4 %.

Na obrázku Obr. 2-11 je vývoj účinností jednotlivých technologií výroby PV článků od jejich vzniku až po současnost.

Best Research-Cell Efficiencies



Obr. 2-11 - Účinnost PV článků různých technologií [10]

2.6. Výrobci

Výrobou fotovoltaických článků a panelů se zabývá řada firem celého světa. Jedni z výrobců a do budoucna jistě jedni z největších výrobců budou čínské firmy. Tento fakt se již teď ukazuje na celosvětových výstavách, jelikož počet čínských vystavujících firem stále narůstá.

2.6.1. Konkrétní výrobky

Jak bylo psáno, výrobou se zabývá velké množství firem. Jedna z firem, která vyrábí PV panely je i Sun Power ze San Jose v USA. Má pobočky po celém světě. V Evropě například v německém Frankfurtu nad Mohanem, ve švýcarské Ženevě nebo v italském Miláně.

Zde je uveden jeden z jejich výrobků PV panel SPR-318E-WHT-D. Pro použití na železničním vozidle je vhodný jak z hlediska jeho rozměrů, tak i z hlediska účinnosti.

Popis PV panelu SPR-318E-WHT-D je v Tabulka 1, Tabulka 2, Tabulka 3, Tabulka 4.

Tento panel je sestaven z 8 řad a 12 sloupců jednotlivých PV článků s monokrystalickou strukturou. Celkem jich je 96. Jeho maximální výstupní výkon je 318 W, při intenzitě záření 1 000 W/m². Z pravidla všichni výrobci udávají velikost výkonu při této intenzitě záření.



Obr. 2-12 - SPR-318E-WHT-D - Vzhled PV panelu [11]

Tabulka 1 - SPR-318E-WHT-D - Elektrické parametry PV panelu [11]

Elektrické parametry		
Maximální výkon	P_{MAX}	318 W
Účinnost	η	19,50 %
Jmenovité napětí	U_{mpp}	54,7 V
Jmenovitý proud	I_{mpp}	5,82 A
Napětí naprázdno	U_{oc}	64,7 V
Zkratový proud	I_{sc}	6,2 A
Maximální systémové napětí	U_L	600 V
Teplotní koeficient	Výkon	-0,38 %/K
	Napětí	-176,6 mV/K
	Proud	3,5 mA/K
Jmenovitá pracovní teplota		45°C +/- 2°C
Maximální sériový proud		15 A

Tabulka 2 - SPR-318E-WHT-D - Technické parametry [11]

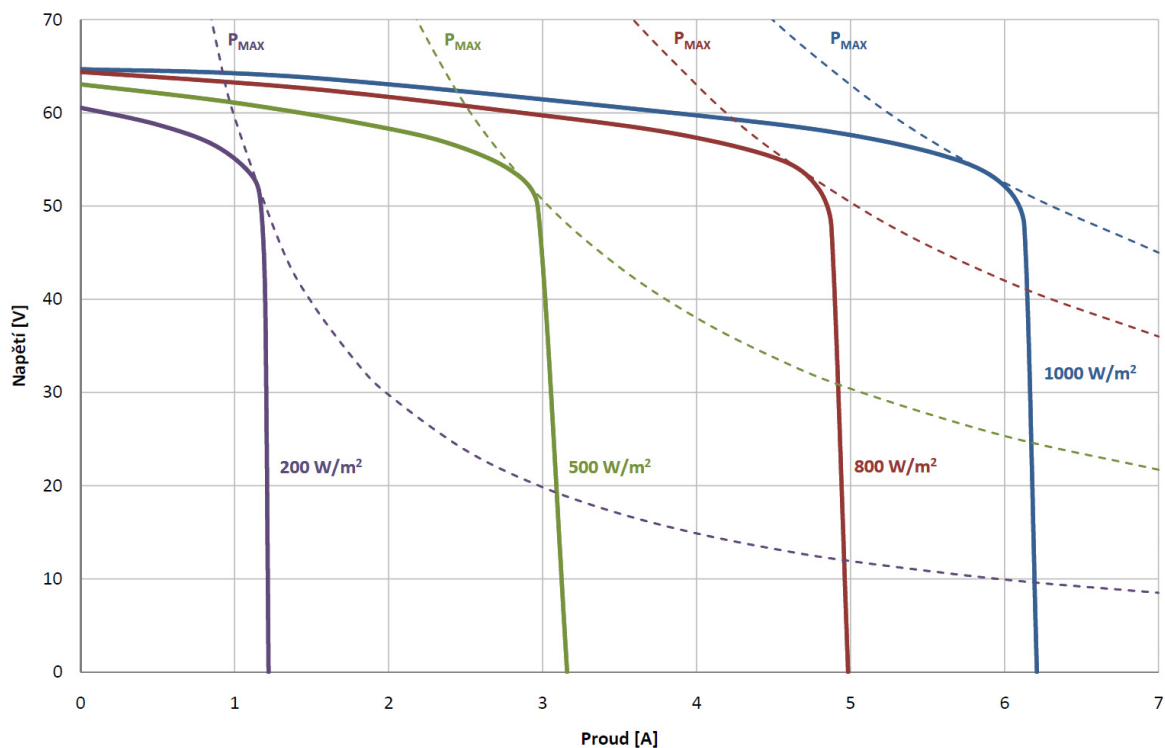
Technické parametry	
Solární články	96 článků, monokrystalické
Přední strana	Vysoce přenosové tvrzené sklo
Rozvodná krabice	IP 65
Váha	18,6 kg
Rozměry – šířka – a	1 046 mm
Rozměry – délka – b	1 559 mm
Plocha panelu	1,631 m ²

Tabulka 3 - SPR-318E-WHT-D - Testované provozní podmínky [11]

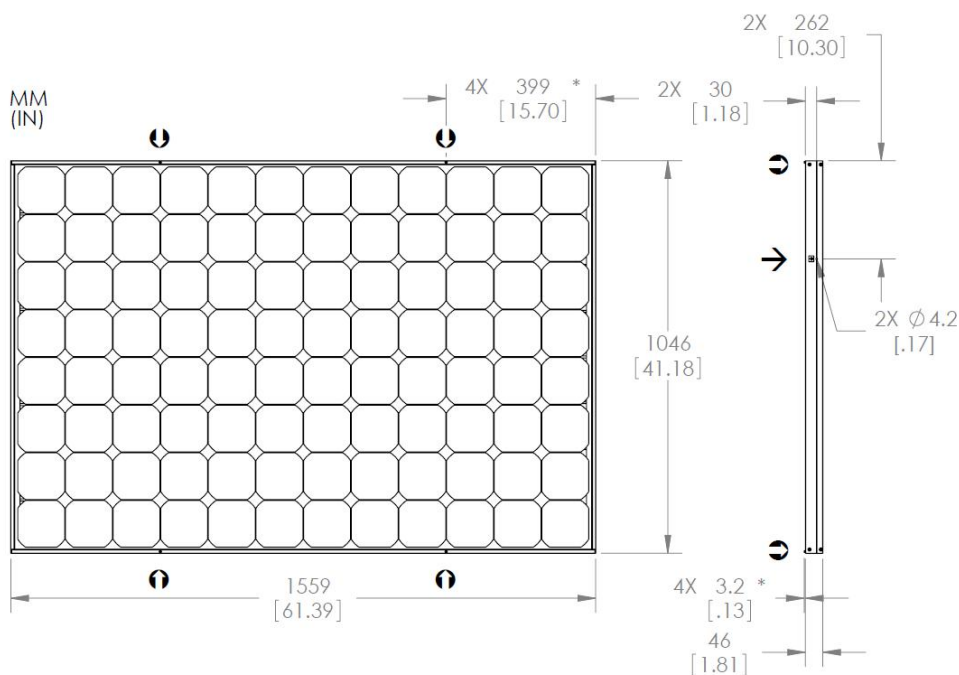
Testované provozní podmínky
Teplota od - 40°C až do + 85°C
Maximální zátěž 245 kg/m ² (2400 Pa) přední a zadní strana např. vítr
Odolnost proti nárazu - kroupa 25 mm a rychlost dopadu 23 m/s

Tabulka 4 - SPR-318E-WHT-D - Záruky a certifikace [11]

Záruky a certifikace	
Záruky	- 25 roků zaručený limitní výkon
	- 10-ti letá omezená záruka na výrobek
Certifikace	Testováno podle UL 1703. Požární Hodnocení - Třída C



Obr. 2-13 - SPR-318E-WHT-D - VA charakteristika - závislost výkonu na intenzitě dopadající energie



Obr. 2-14 - SPR-318E-WHT-D - Technické provedení a rozměry PV panelu [11]

Na přední straně PV panelu je tvrzené sklo, které ho chrání před vlivy počasí.

Důležitý údaj je účinnost PV panelu. Ta je udávána 19,5 %.

$$P = U_{mpp} \cdot I_{mpp} = 54,7 \cdot 5,82 \cong 318 \quad [\text{W}] \quad (8)$$

$$\eta = \frac{P}{p \cdot S} \cdot 100 = \frac{U_{mpp} \cdot I_{mpp}}{p \cdot a \cdot b} \cdot 100 = \frac{54,7 \cdot 5,82}{1000 \cdot 1,046 \cdot 1,559} \cdot 100 = 19,5 \quad [\%] \quad (9)$$

kde η – účinnost [%]
 P – výkon [W]
 p – intenzita dopadajícího záření [W/m^2]
 S – plocha panelu [m^2]
 a – šířka [m]
 b – délka [m].

Pro maximální odebíraný výkon jsou důležité informace o jmenovitém napětí a jmenovitém proudu. Při těchto hodnotách napětí a proudu dodává panel do obvodu největší výkon. V případě menší intenzity dopadajícího záření se odebíraný proud bude zmenšovat, ale velikost výstupního napětí, pro maximální odebíraný výkon musí být pořád stejná. Toto je naznačeno také na Obr. 2-13. Na něm jsou VA charakteristiky při různých intenzitách záření. Na nich je dobře vidět, že s rostoucí intenzitou záření se napětí příliš nemění, ale zásadně se mění proud PV článku.

Dalšími údaji jsou teplotní koeficienty, ty jsou důležité při změně teploty. Udávají, jak se se změnou teploty změní výstupní parametry PV panelu. Jmenovitá pracovní teplota je 45 °C.

Pro skládání PV panelů do sérioparalelních skupin pro zvětšení výstupního výkonu jsou důležité parametry maximálního systémového napětí a maximálního sériového proudu. Tyto hodnoty se nesmějí při spojování více PV panelů překročit.

Záruka na panel je 10 let. Výrobce také zaručuje, že během 25-ti let provozu neklesnou parametry panelu pod předem určenou mez.

Dále výrobce dle Obr. 2-14 udává rozměry jednoho PV panelu. Jeden PV článek má přibližně 130 x 130 mm.

Rozvodná krabice je také konstruována tak, aby vydržela venkovní podmínky. Krytí IP 65 znamená, že:

- 6 – zařízení je plně prachotěsné,
- 5 – ochrana proti tryskající vodě ve všech směrech.

2.7. Budoucí vývoj PV článků

Do budoucna se dá předpokládat, že tím že se zvyšuje počet výrobců PV panelů, se jejich vlastnosti budou neustále zlepšovat a cena, která je v dnešní době vysoká, se bude zmenšovat. Vývoj jednotlivých firem se jistě bude ubírat různými směry z pohledu technologie výroby i z pohledu použitých materiálů. Již dnes se v laboratorních podmínkách dosahuje velmi vysokých účinností nad 40 %, viz Obr. 2-11.

Bude jen otázkou financí a technických možností člověka, jak se budou vlastnosti a tím je na mysli hlavně účinnost PV článků zlepšovat.

2.8. Vnitřní zapojení PV panelů

Výkon jednoho PV panelu je určen plochou jednoho článku a jeho účinností (závisí na technologii jakou je vyroben) a počtem zapojených PV článků v jednom panelu. Výkon PV panelu se udává při standardní intenzitě záření 1000 W/m².

Výkon jednoho PV článku je:

$$P_{\text{članku}} = p \cdot S \cdot \eta \quad [\text{W}] \quad (10)$$

kde p – intenzita dopadajícího záření [W/m²]

S – plocha článku [m²]

η – účinnost [%]

Výkon jednoho PV panelu je:

$$P_{\text{panelu}} = P_{\text{članku}} \cdot n = p \cdot S \cdot \eta \cdot n \quad [\text{W}] \quad (11)$$

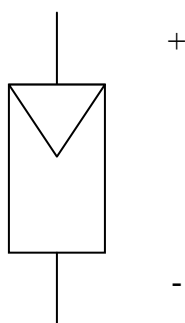
kde n – počet článků [-]

Pro dosažení velkých výkonů se nedělají PV panely velkých rozměrů (několik m²). Je to z důvodu obtížné přepravy, pevnosti konstrukce, manipulace s panely atd. Maximální výkony jednotlivých panelů se pohybují v hodnotách stovek W. Pro dosažení větších výkonů např. kW se PV panely musejí zapojovat do větších sérií.

Pro zapojování panelů platí hlavní pravidlo:

Skládat do větších sérií by se měly pouze panely jednoho typu a všechny by měly být od stejného výrobce. Tím by mělo být zaručeno dosažení stejných vlastností všech panelů při osvětlení Sluncem.

Schematická značka PV panelu je na Obr. 2-15. Kladný pól je nahoře, záporný pól je dole, jak je vyznačeno na obrázku.

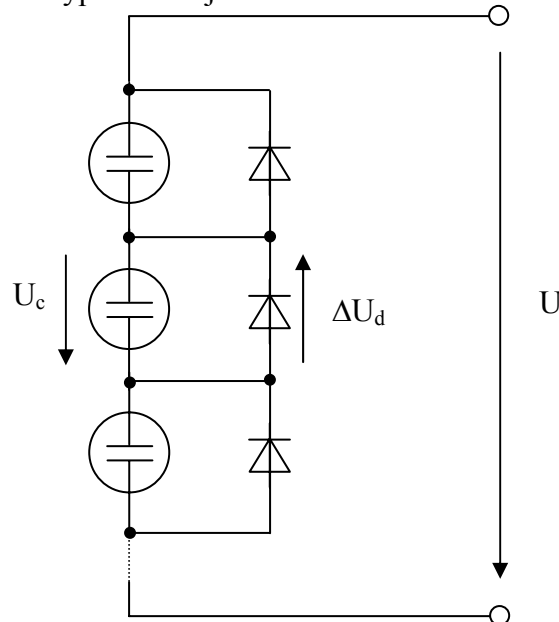


Obr. 2-15 - Schematická značka PV panelu

V PV panelu jsou zapojeny všechny PV články do série a ještě jsou u nich umístěny tzv. bypass diody. Jsou to diody, které chrání PV článek v případě, že je zastíněn a není

v obvodu jako zdroj energie. V této chvíli se totiž chová jako odpor. Procházející proud vytvářený ostatními osvětlenými PV články ho zatěžuje a mohlo by dojít k jeho zničení. Proto je k němu ještě sériově připojena bypass dioda. Někteří výrobci dávají bypass diodu ke každému PV článku, někteří výrobci skládají PV články do různých skupin a až k nim připojují bypass diody.

Zapojení PV článků a bypass diod je na Obr. 2-16.



Obr. 2-16 - Zapojení PV článků v PV panelu

V případě, že u každého PV článku je jedna bypass dioda, tak celkové napětí v závislosti na počtu zastíněných PV článků je:

$$U = n_{prac} \cdot U_c - n_{zast} \cdot \Delta U_d = (n - n_{zast}) \cdot U_c - n_{zast} \cdot \Delta U_d = N \cdot U_c - n_{zast} \cdot (U_c + \Delta U_d) \text{ [V]} \quad (12)$$

$$U_{100\%} = n \cdot U_c \quad \text{[V]} \quad (13)$$

$$\Delta U_{panel} = U_{100\%} - U = n_{zast} \cdot (U_c + \Delta U_d) \quad \text{[V]} \quad (14)$$

kde U – napětí zastíněného PV panelu [V]

n_{prac} – počet nezastíněných PV článků [-]

n_{zast} – počet zastíněných PV článků [-]

$n = n_{prac} + n_{zast}$ – celkový počet PV článků [-]

U_c – napětí PV článku [V]

ΔU_d – napětí bypass diody [V]

$U_{100\%}$ – napětí nezastíněného panelu [V]

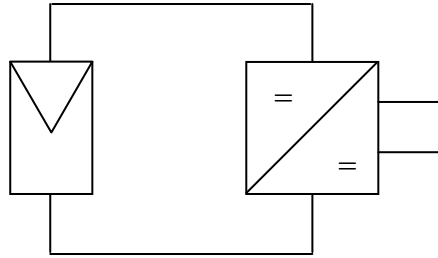
ΔU_{panel} – změna napětí nezastíněného a zastíněného PV panelu [V]

Pro skládání PV panelů do větších skupin je zde několik možných zapojení:

2.9. Vnější zapojení PV panelů

2.9.1. Každý PV panel je připojen přes vlastní měnič

Toto zapojení je na Obr. 2-17.



Obr. 2-17 - PV panel s vlastním měničem

Každý PV panel je do stejnosměrného (dále jen ss) meziobvodu připojen přes vlastní DC/DC měnič. Tímto měničem je řízeno výstupní napětí (napětí meziobvodu) a následný proud.

Výhodnou tohoto zapojení je, že každý panel dodává do ss meziobvodu maximální možný výkon. Nevýhodou však jsou vyšší náklady, což je způsobeno měničem u každého PV panelu. Toto zapojení se používá.

2.9.2. Sériové zapojení

PV panely jsou zapojeny do série a výstupní napětí je přes DC/DC měnič vyvedeno do ss meziobvodu. Počet PV panelů zapojených do série není neomezený. Výrobce udává maximální systémové napětí, které se nesmí při sériovém zapojování překročit. Je to napětí, které udává elektrickou odolnost konstrukce proti zemi. Maximální počet je pak dán velikostí tohoto napětí a velikostí jmenovitého napětí jednoho PV panelu:

$$n \leq \frac{U_L}{U_{mpp}} \quad [-] \quad (15)$$

kde U_L – maximální systémové napětí [V]
 U_{mpp} – jmenovité napětí PV panelu [V]
 n – musí být vždy celé kladné číslo [-]

Při sériovém spojení je pak výstupní proud roven jmenovitému proudu jednoho PV panelu a napětí závislé na počtu spojených PV panelů.

$$I_{MAX} = I_{mpp} \quad [A] \quad (16)$$

kde I_{mpp} – jmenovitý proud [A]

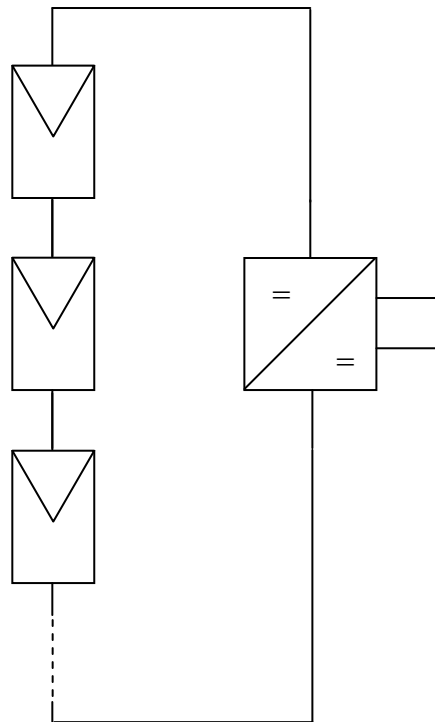
$$U_{MAX} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_N = \sum_{i=1}^n U_i = n \cdot U_{mpp} \quad [V] \quad (17)$$

kde $U_1, U_2, U_3, U_i \dots$ - napětí jednotlivých PV panelů [V]

Maximální výkon je pak dán výkonem jednoho PV panelu a počtem zapojených panelů.

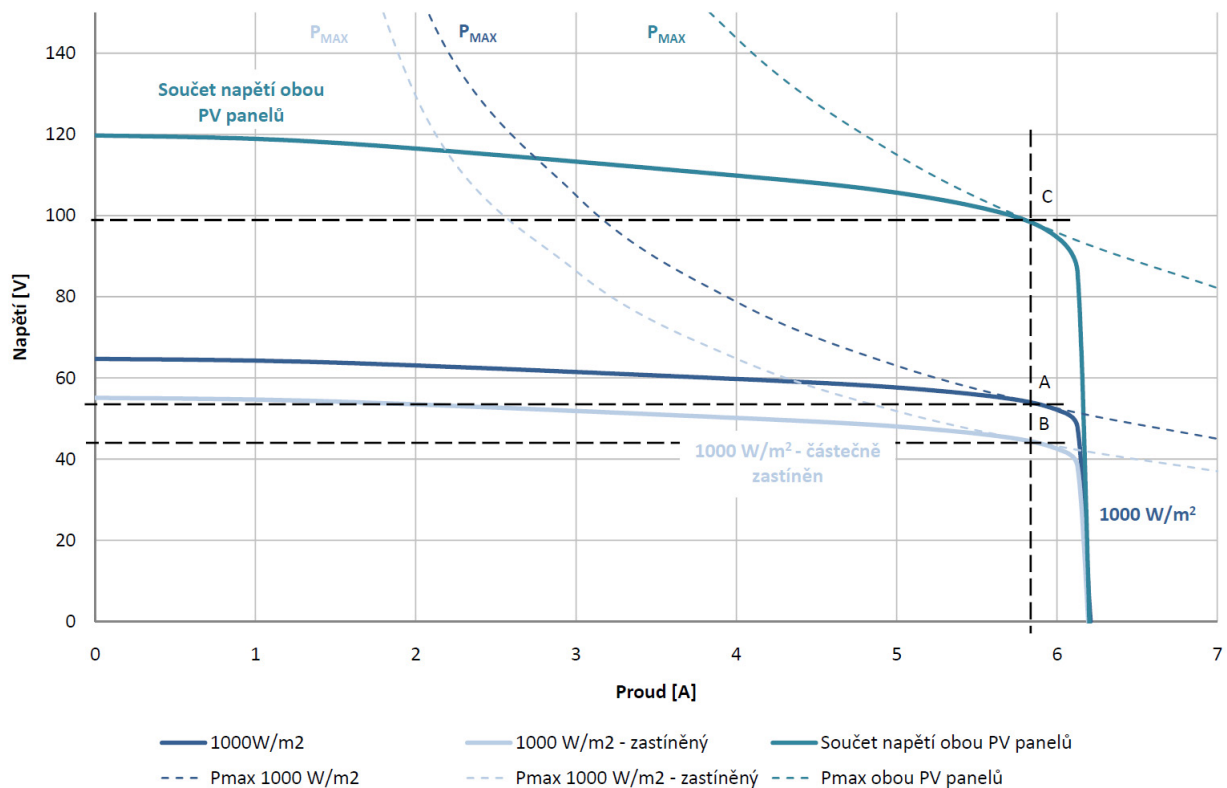
$$P_{MAX} = n \cdot U_{mpp} \cdot I_{mpp} \quad [W] \quad (18)$$

Sériové zapojení je na Obr. 2-18.



Obr. 2-18 - Sériové řazení PV panelů

Při zastínění části panelu se výstupní napětí zmenší o napětí zastíněných článků, výstupní proud zůstane stejný. Ten totiž neteče přes zastíněné PV články, ale teče bypass diodami. Tím se částečně zmenší výstupní napětí celého sériového zapojení. Na panely takový stav nemá žádné jiné záporné vlivy. Toto zapojení se používá.



Obr. 2-19 - VA charakteristika při celém a částečném ozáření PV panelu a součet napětí obou PV panelů při sériovém spojení

Na Obr. 2-19 je VA charakteristika dvou PV panelů. Tmavomodrý průběh je charakteristika PV panelu, který je celý ozářený, světlomodrý průběh je charakteristika PV

panelu, který je částečně zastíněný. Intenzita záření je 1 000 W/m². Čárkované průběhy značí maximální výkon při daném osvětlení. Tmavou tyrkysovou barvou je vynesena průběh součtu napětí obou PV panelů. Z grafu je také zřejmé, že při stejné intenzitě je stejný výstupní proud, ale jelikož je jeden z nich částečně zakryt, má menší výstupní napětí.

2.9.3. Paralelní spojení bez diod

PV panely jsou zapojeny paralelně a výstupní napětí je přes DC/DC měnič vyvedeno do ss meziobvodu. Počet PV panelů zapojených paralelně je omezený maximálním proudem do DC/DC měniče.

Při paralelním spojení je pak výstupní proud závislý na počtu paralelně zapojených PV panelů a napětí je rovno jmenovitému napětí jednoho PV panelu.

$$I_{MAX} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N = \sum_{i=1}^n I_i = n \cdot I_{mpp} \quad [A] \quad (19)$$

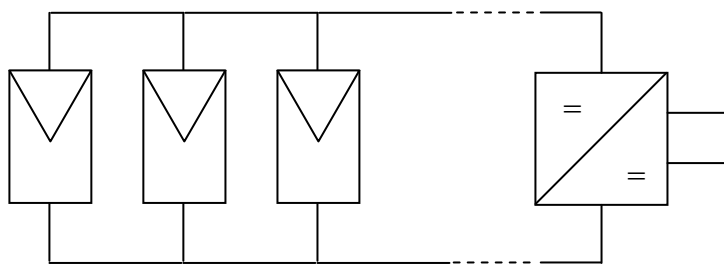
kde $I_1, I_2, I_3, I_i \dots$ - jmenovitý proud jednoho PV panelu [A]

$$U_{MAX} = U_{mpp} \quad [V] \quad (20)$$

Maximální výkon je pak dán výkonem jednoho PV panelu a počtem zapojených panelů.

$$P_{MAX} = U_{mpp} \cdot n \cdot I_{mpp} \quad [W] \quad (21)$$

Paralelní zapojení je na Obr. 2-20.

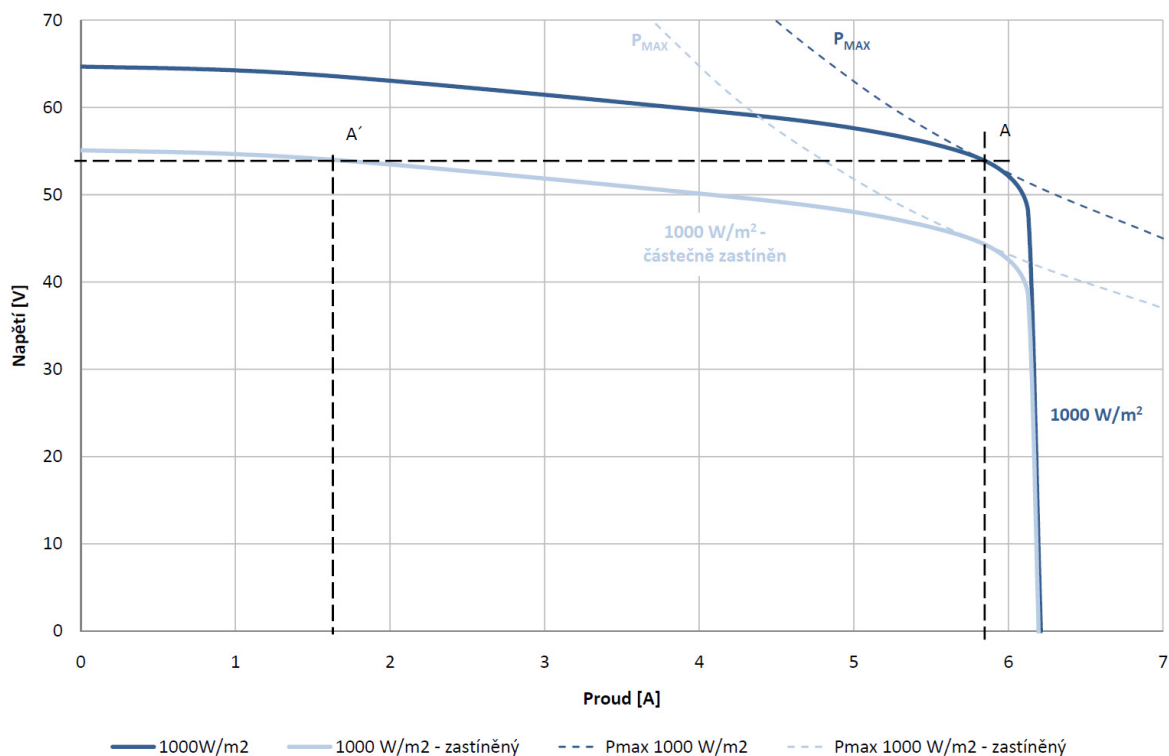


Obr. 2-20 - Paralelní zapojení PV panelů bez diod

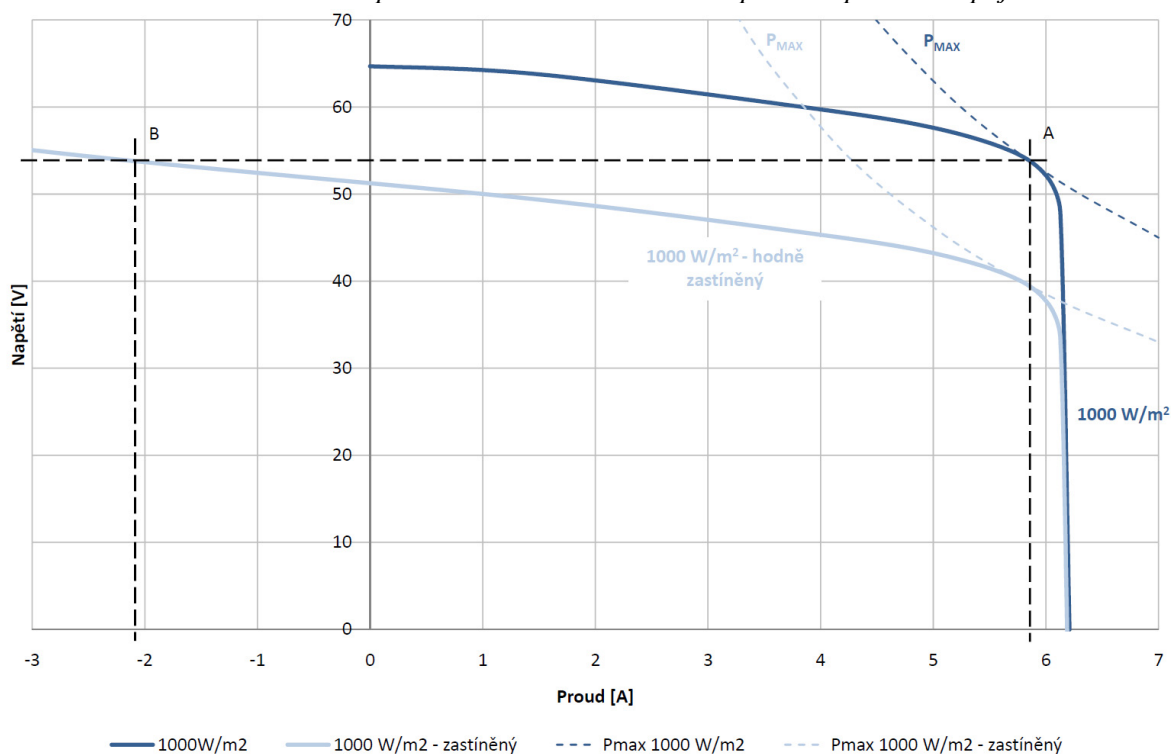
Na Obr. 2-21 je VA charakteristika dvou PV panelů zapojených paralelně. Tmavomodrý průběh je charakteristika PV panelu, který je celý ozářený, světlomodrý průběh je charakteristika PV panelu, který je částečně zastíněný. Intenzita záření je 1 000 W/m². Čárkované průběhy značí maximální výkon při daném osvětlení.

Při částečném zakrytí jednoho panelu se zmenší jeho výstupní napětí. Jelikož jsou panely řazeny paralelně, velikost výstupního napětí se snaží udržet druhý panel (bod **A**), který není zastíněný. U částečně zakrytého panelu se tedy výstupní napětí zvýší (bod **A'**), ale to způsobí menší výstupní proud. Tento stav není nebezpečný, ale z provozního hlediska nepříjemný.

Při dalším zastínění se však bod **A'** dostane až do druhého kvadrantu. To je na Obr. 2-22 a bod je označen jako **B**. To vyvolá nežádoucí tok vyrovnávacího proudu mezi panelem plně osvětleným a panelem méně osvětleným. Je to nepříznivý jev, protože se zmenšuje výstupní výkon a protože zastíněný panel je namáhán vyrovnávacím proudem. Tento stav může dospět až ke zničení panelu. Toto zapojení se nepoužívá.



Obr. 2-21 - VA charakteristika při celém a částečném ozáření panelů - paralelní spojení bez diod

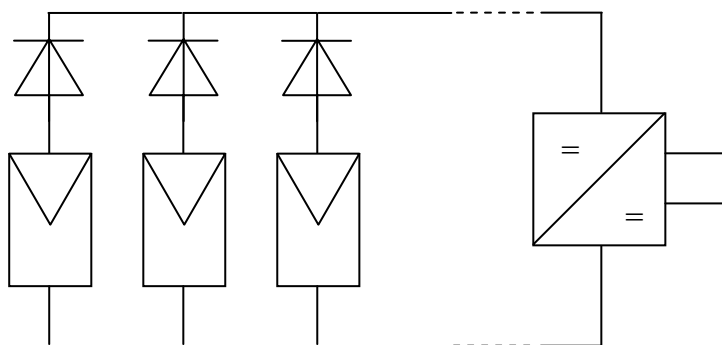


Obr. 2-22 - VA charakteristika při celém ozáření panelu a při velkém zakrytí panelu - paralelní spojení bez diod

2.9.4. Paralelní spojení s diodami

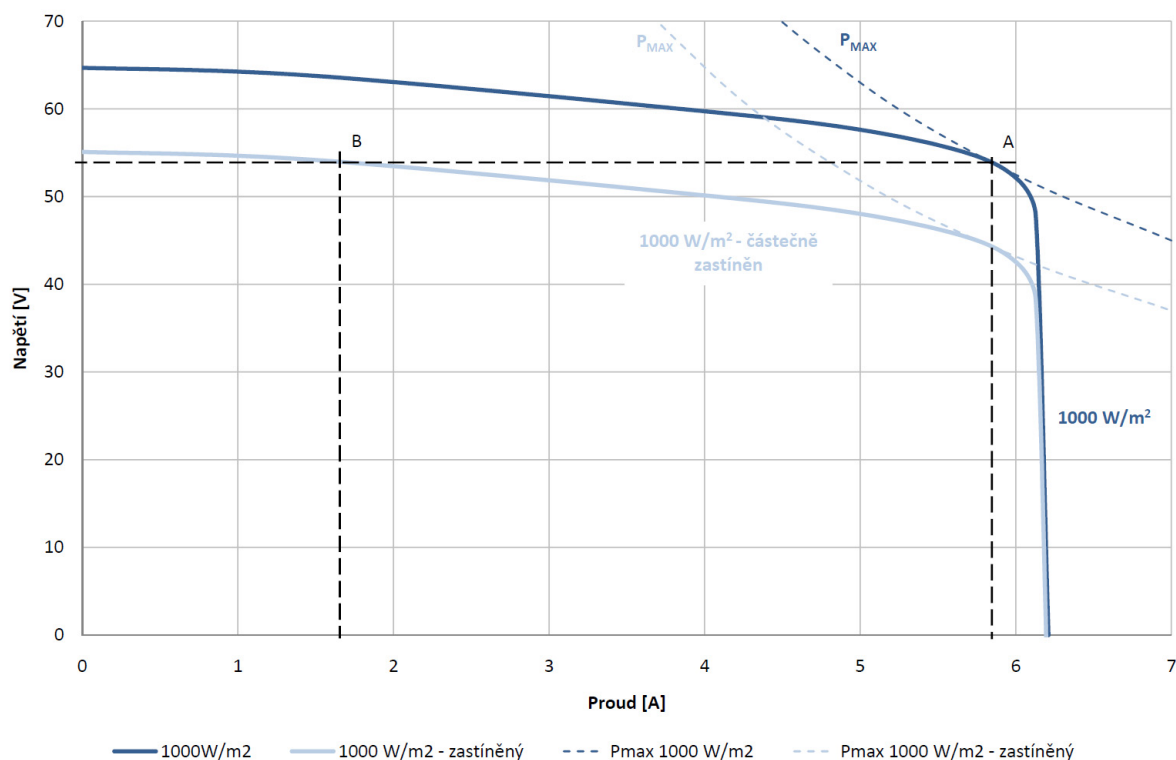
Vyrovňovacím proudům by se dalo zabránit přidáním diody do každé větve, jak je to na Obr. 2-23.

Toto zapojení by zabránilo průchodu vyrovnávacích proudů mezi jednotlivými PV panely.



Obr. 2-23 - Paralelní zapojení PV panelů s diodami

Na Obr. 2-24 je VA charakteristika PV panelů. Tmavomodrý průběh je charakteristika PV panelu, který je celý ozářený, světlomodrý průběh je charakteristika PV panelu, který je částečně zastíněný. Intenzita záření je $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$. Čárkované průběhy značí maximální výkon při daném osvětlení.



Obr. 2-24 - VA charakteristika při celém a částečném ozáření panelu - paralelní spojení s diodami

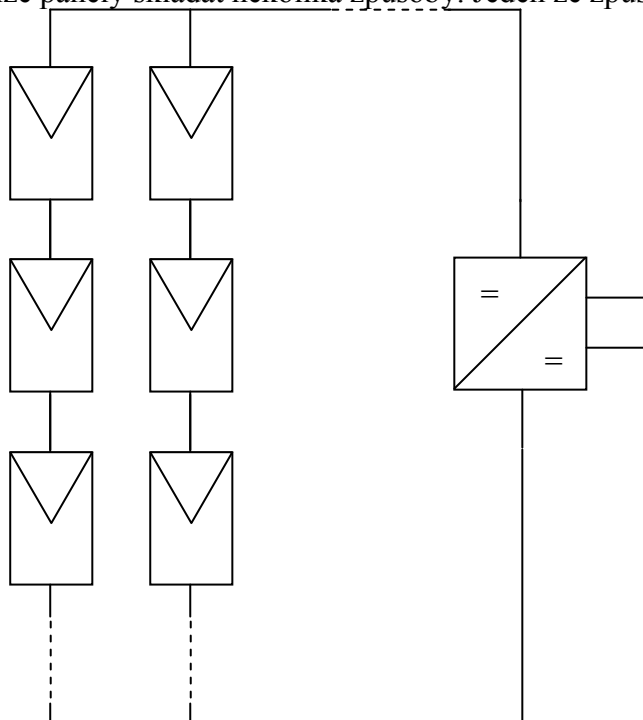
Tímto grafem by mohly být popsány dva paralelně zapojené PV panely, které mají jednotlivé PV články zapojeny všechny do série a ke každému je sériově přiřazena dioda. Na první PV panel dopadá záření o intenzitě $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ a na druhý panel dopadá záření o stejné intenzitě, ale část panelu je zakryta nějakou překážkou. To značí dva modré průběhy. Pro panel celý ozářený je průběh tmavě modrý, pro panel částečně zakrytý je průběh světle modrý. Nezástíněný panel má výstupní napětí a proud vyznačen v grafu. Ten je totiž závislý na intenzitě záření v tomto případě $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$. Při tomto proudu je výstupní napětí částečně zastíněného panelu menší. To znamená, že anoda diody je kladnější. Dioda je tedy zavřená. Proto, aby částečně zastíněný panel dodával výkon do obvodu, se jeho napětí musí zvýšit tak, aby se dioda otevřela. To je v bodě **B** na obrázku. Panel dodává do obvodu výkon určený hodnotami napětí a proudu v tomto bodě. Jak je zřejmé z obrázku, bod **B** je velmi vzdálen od

hyperboly maximálního výkonu. Panel do obvodu nedodává maximální možný výkon. To je nepřijatelná funkční vlastnost, ale není nebezpečná z hlediska zničení PV panelu.

Dioda umístěná u každého PV panelu zajistí, že v případě velkého zastínění se pracovní bod hodně zastíněného panelu nedostane do 2. kvadrantu, ale panel se v tomto případě odpojí a nedodává žádný výkon. Tato vlastnost je vhodná z hlediska funkčnosti a je bezpečná z hlediska zničení PV panelu. Nulový výstupní výkon částečně zastíněného panelu je ale nepřijatelná vlastnost. Toto zapojení se nepoužívá.

2.9.5. Sérioparalelní kombinace PV panelů bez diod

Sérioparalelně lze panely skládat několika způsoby. Jeden ze způsobů je na Obr. 2-25.



Obr. 2-25 - Sérioparalelní zapojení PV panelů bez diod

Z obrázku je vidět, že do sérioparalelní kombinace je zapojen velký počet PV panelů. Výsledný výstupní výkon je dán:

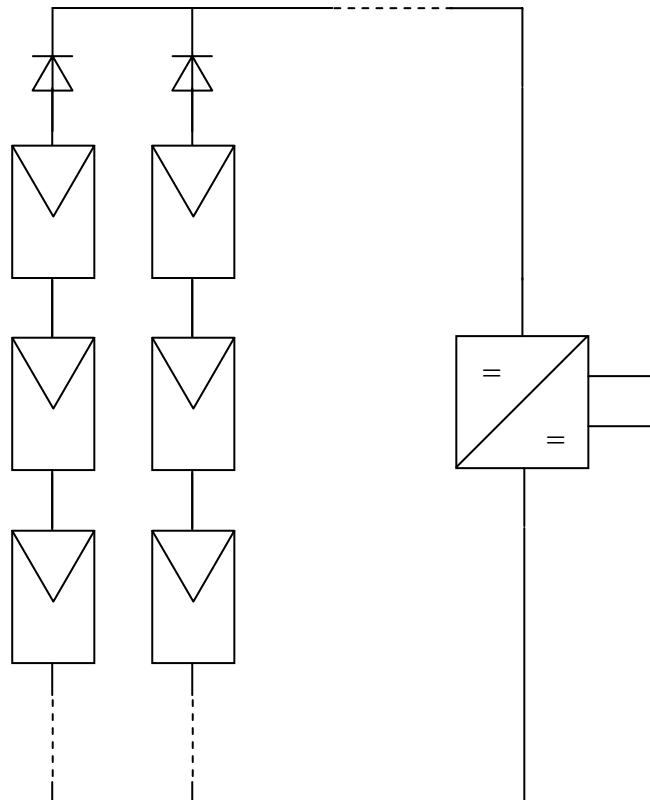
$$P_{MAX} = n_{SER} \cdot U_{mpp} \cdot n_{PAR} \cdot I_{mpp} \quad [W] \quad (22)$$

kde n_{SER} – počet PV panelů v sérii [-]
 U_{mpp} – jmenovité napětí [V]
 n_{PAR} – počet paralelních větví [-]
 I_{mpp} – jmenovitý proud [A]

Toto zapojení má vyšší výstupní výkon než jen sériové zapojení. Nevýhodou však je to, že v případě částečného zastínění některých panelů se změní hodnoty napětí jednotlivých větví (ty mohou být nepatrně jiné již při stejném osvětlení všech panelů z důvodů nestejných parametrů způsobených nepřesností výroby) a obvodem začnou protékat vyrovnávací proudy, jak tomu bylo v paralelním zapojení. Tento stav zase zapříčiní zmenšení výstupního výkonu a nadměrné zatěžování zastíněných PV panelů. Toto zapojení se nepoužívá.

2.9.6. Sérioparalelní kombinace PV panelů s diodami

Stejně jako bylo popsáno v paralelním zapojení s diodami, bude chování obvodu v zapojení dle Obr. 2-26.

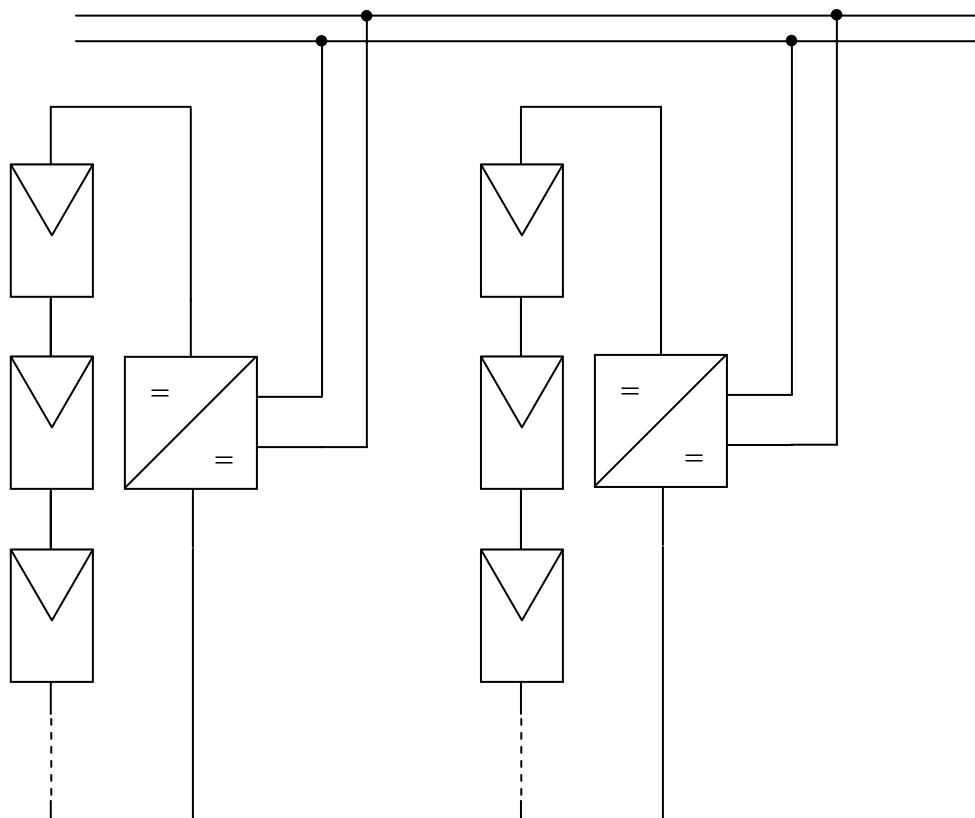


Obr. 2-26 - Sérioparalelní zapojení PV panelů s diodami

Toto zapojení by zase zabránilo průchodu vyrovnávacích proudů mezi jednotlivými větvemi. Nelze ho však použít ze stejných důvodů, jaké už byly popsány v předchozím textu. I zde by byly velké výkonové ztráty, které by byly nepřijatelné. Toto zapojení se nepoužívá.

2.9.7. Sériová zapojení přes měniče do jednoho meziobvodu

V tomto zapojení jsou zapojeny jednotlivé PV panely podle již zmíněných pravidel v kapitole 2.9.2 Sériové zapojení. Tato sériová spojení PV panelů jsou pak přes měniče zapojeny do jednoho ss meziobvodu. To je na Obr. 2-27. Maximálním systémovým napětím je dán maximální počet zapojených PV panelů do jedné série. To limituje velikost výstupního výkonu jednoho sériového spojení. Do ss meziobvodu lze přes měniče zapojit libovolné množství sériově spojených PV panelů. Toto zapojení se v praxi používá.



Obr. 2-27 - Sériové spojení přes měniče

2.10. Porovnání jednotlivých zapojení

Zapojení kde má každý PV panel svůj vlastní měnič je výhodné z toho hlediska, že se vždy využívá maximální výkon z panelu a ten se přenáší do ss meziobvodu. Nevýhodou je, že je potřeba stejný počet měničů jako PV panelů, což je finančně náročnější.

Řazení sériové má tu výhodu, že pro větší počet PV panelů je potřeba jen jeden měnič. Velikosti výstupního napětí a proudu jsou v tomto zapojení vhodné pro zpracování v měniči. Počtem sériově spojených PV panelů je limitován výstupní výkon.

Paralelní zapojení má nevýhody v tom, že jsou nestejná napětí PV panelů při částečném zastínění a následně s tím spojené problémy, které jsou popsány výše.

Paralelním zapojení s diodami má nevýhodu v tom, že není využíván maximální možný výkon z každého PV panelu.

Sérioparalelní kombinace mají velkou výhodu v tom, že pro velký počet PV panelů stačí jediný měnič, ale jsou zde stejné problémy při částečném zastínění jako u paralelního zapojení.

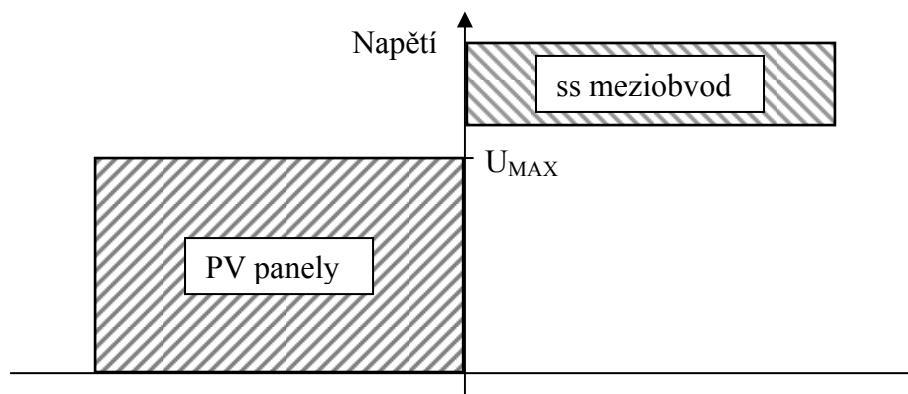
Z tohoto zhodnocení se jako nejvhodnější jeví zapojení sériové.

Každé sériové spojení PV panelů je připojeno do ss meziobvodu přes jeden DC/DC měnič. Z toho vyplývá, že PV panely stejného typu musí být jen v sériové větvi z důvodu stejného proudu všech panelů. Následné přizpůsobení je již řešeno měničem.

Pro zvýšení výstupního výkonu je nejvhodnější sériové zapojení přes měniče do jednoho ss meziobvodu dle Obr. 2-27. Pro dosažení potřebného výkonu se zapojí potřebné množství sériových seskupení PV panelů.

Napětí ze sériově spojených PV panelů může dosahovat napětí od 0 V (při celkovém zakrytí panelů) až do napětí U_{MAX} (definované v 2.9.2 Sériové zapojení). Napětí ss meziobvodu je proto voleno vyšší než napětí PV panelů, protože ve ss meziobvodu bude umístěn zásobník, který se na nulové napětí nikdy nevybíje.

Z toho vyplývá, že DC/DC měnič bude jednokvadrantový zvyšující měnič. Výhodou bude jednodušší konstrukce i řízení. Rozdílné hladiny napětí jsou naznačeny na Obr. 2-28.



Obr. 2-28 - Napěťové hladiny sériově spojených PV panelů a ss meziobvodu

3. Parametry soudobých a perspektivních zásobníků elektrické energie

K nepřímému napájení železničního vozidla je zapotřebí zařízení, které vhodným způsobem bude v době přebytku akumulovat elektrickou energii z fotovoltaických článků a v době potřeby bude tuto energii dodávat do trakčních motorů. Takových zařízení je celá řada a mají různé vlastnosti. Bude tedy potřeba specifikovat, jak by se zařízení mělo chovat a jaké by mělo mít vlastnosti.

V první řadě bude zapotřebí, aby mělo dostatečně velkou kapacitu pro uchování potřebného množství energie. Velmi důležitou otázkou bude také účinnost zařízení, rychlost akumulace energie a také jak rychle bude zařízení schopno energii zase vrátit zpět.

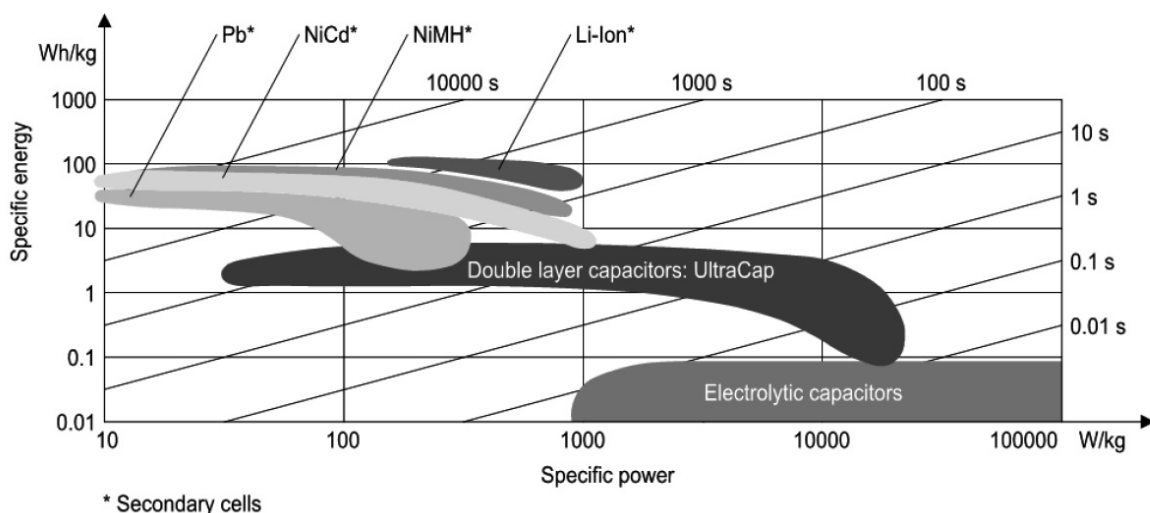
3.1. Použitelná zařízení

Pro uchování energie lze použít elektrochemické akumulátory nebo superkapacitory. V Obr. 3-1 je rozložení vlastností akumulátorů, superkapacitorů a elektrolytických kondenzátorů. Na ose x je měrný výkon [W/kg] a na ose y je měrná energie [Wh/kg]. Z těchto parametrů lze vypočítat vybíjecí čas:

$$T = \frac{A}{P} \quad [h] \quad (23)$$

kde A – měrná energie [Wh/kg]
 P – měrný výkon [W/kg].

Z obrázku je vidět, že kondenzátory a superkapacitory mají velký měrný výkon, ale množství energie které v nich lze uchovat, je v poměru k hmotnosti malé. To Pb, NiCd, NiMH a Li-Ion akumulátory mají velkou měrnou energii, ale poměrně delší časy na uchování a znovu vydání energie než již zmíněné kondenzátory a superkapacitory. Ideální umístění z hlediska vlastností by bylo někde mezi vyznačenými Li-Ion akumulátory a superkapacitory.



Obr. 3-1- Přehled akumulátorů elektrické energie [12]

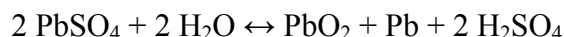
Následující část se bude zabývat parametry jednotlivých akumulátorů a superkapacitorů.

3.2. Olověné baterie

První olověná baterie byla vyrobena již v roce 1859. Je to tedy již 150 let stará technologie, která se v průběhu používání zlepšuje.

Olověný akumulátor je tvořen olověnými deskami (elektrody), které jsou ponořeny do zředěného roztoku kyseliny sírové. Jeden článek je tvořen dvěma olověnými deskami a

jednotlivé články se spojují do série. Při nabíjení a vybíjení dochází k chemickému procesu, který je vratný. Proto lze olovenou baterii s pravidelným nabíjením používat. Chemický proces je popsán rovnicí:



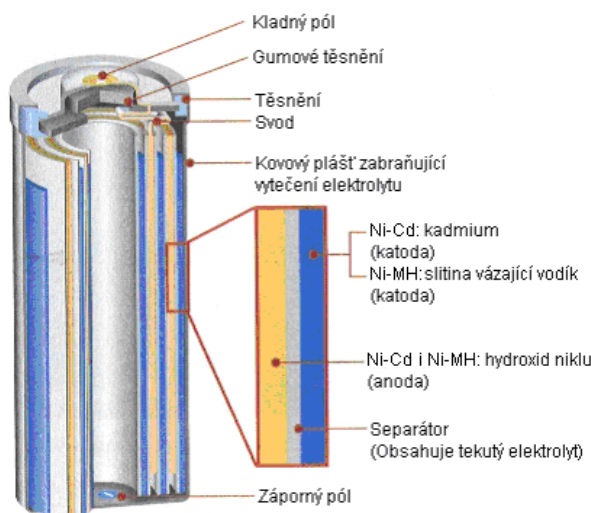
Šipka vpravo značí nabíjení a šipka vlevo vybíjení. Při vybíjení se kyselina sírová spotřebovává a vzniká voda. Proto se baterie nesmí vybit úplně, to by znamenalo, že v baterii se veškerý elektrolyt změní na vodu a již nelze znovu nabít. Napětí naprázdno nabitého akumulátoru je 2,06 až 2,15 V. Napětí vybitého oloveného článku je přibližně 2 V. Pod tuto hranici nesmí napětí klesnout.

Vnitřní odpor akumulátoru v nabitém stavu je řádově mΩ. Závisí na hustotě a na teplotě elektrolytu a na nabitém nebo vybitém stavu baterie. Při nabíjení se odpor zmenšuje a naopak.

Olovený akumulátor nemá příliš dobré vlastnosti z hlediska uchování energie. Počet nabíjecích a vybíjecích cyklů je 200 až 3000, v závislosti na hloubce vybití. Měrná energie je asi 25 kWh/t a měrný výkon je přibližně 15 kW/t.

3.3. NiCd akumulátory

Nikl-Kadmiová baterie je na Obr. 3-2.



Obr. 3-2 - Řez NiCd akumulátorem [13]

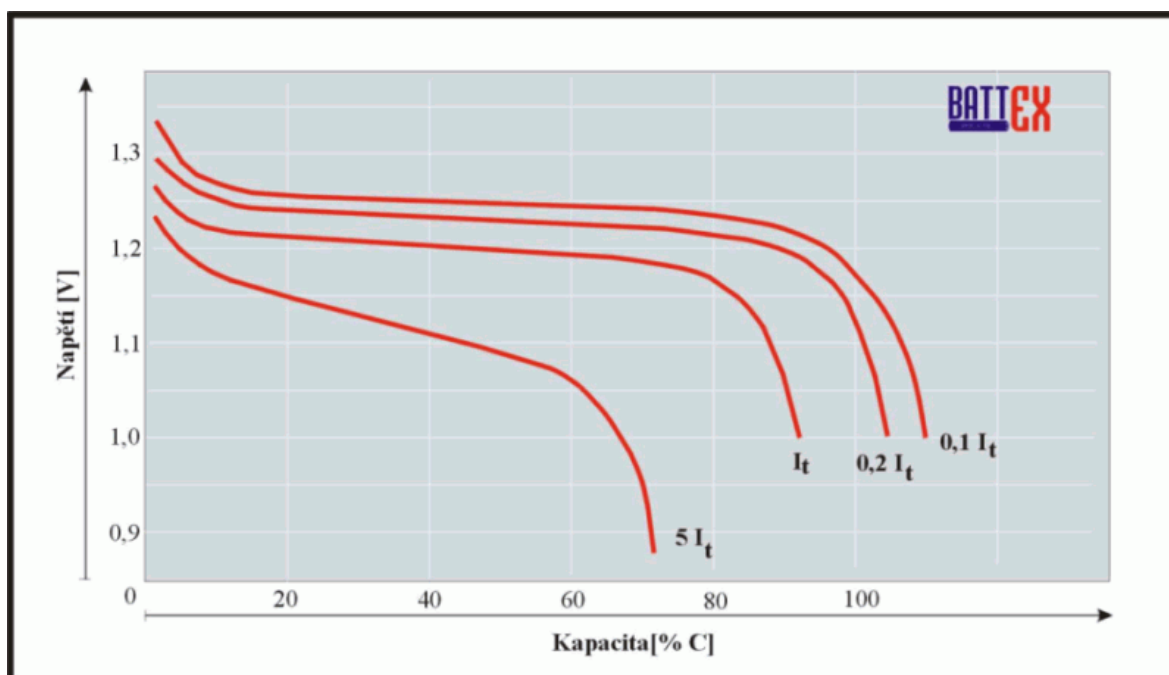
Z obrázku je patrné, že akumulátor je tvořen třemi vrstvami. Kladná elektroda je z hydroxidu niklu a záporná elektroda je z kadmia (kadmium je jedovaté). Obě elektrody jsou odděleny separátorem, který obsahuje alkalický elektrolyt (hydroxid draselný). Jednotlivé elektrody jsou připojeny k vývodům. Napětí jednoho článku je přibližně 1,2 V. Pro zvětšení napětí se skládají jednotlivé články sériově do skupin.

Mezi přednosti této baterie patří vysoké proudové zatížení a pracovní teplota až do - 15 °C. V porovnání s akumulátorem NiMH se může nabíjet pětikrát rychleji a v porovnání s lithiovým akumulátorem až dvacetkrát rychleji. Tedy pětikrát respektive dvacetkrát větším proudem.

Velkou nevýhodou akumulátorů tohoto typu je jejich paměťový efekt. Což znamená, že v případě, že se akumulátor nabíjí po dlouhou dobu malým proudem a před tím nebyl úplně vybit, začne při vybíjení rychle vykazovat vybitý stav. To proto, že na kladné elektrodě jsou kovové krystalky, ty sníží kapacitu a zvýší vnitřní odpor. Tím článek při zvyšování proudu neudrží výstupní napětí.

Takovýto článek však není zničený. Několikanásobným nabitím a vybitím zase docílíme jeho funkčnosti. Životnost NiCd akumulátorů je více než 10 let nebo více než 1 000 vybíjecích a nabíjecích cyklů.

Na Obr. 3-3 jsou vybíjecí křivky NiCd akumulátoru při teplotě 20 °C. Ten byl nejdříve 16 hodin při teplotě 20 °C nabíjen proudem 0,1 It.

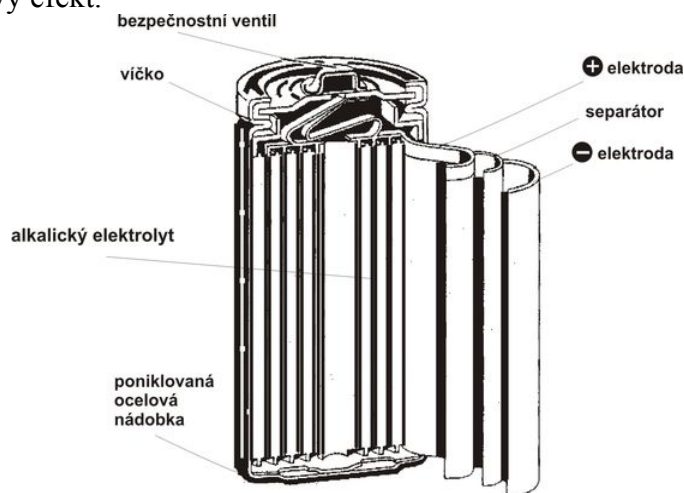


Obr. 3-3 - Vybíjecí křivky NiCd akumulátoru [14]

3.4. NiMH akumulátory

Nikl-metal-hydridové akumulátory jsou svou konstrukcí velmi podobné NiCd akumulátorům. Kladná elektroda je z hydroxidu niklu a záporná elektroda je z kovové slitiny, která má schopnost vázat vodík. Obě elektrody jsou opět odděleny separátorem, který obsahuje alkalický elektrolyt (hydroxid draselný). Rozdíl mezi NiCd a NiMH je tedy v tom, že není použito jedovaté kadmium a že záporná elektroda je vyrobena ze slitiny, která je schopna vázat vodík. NiMH akumulátor je na Obr. 3-4. Napětí jednoho článku je stejné 1,2 V. Při samovybití se za 24 hodin vybije 6 až 16 % energie.

Výhodou oproti NiCd je skoro dvojnásobná hustota energie. Mají malý vnitřní odpor, ale NiCd mají vnitřní odpor ještě menší. Životnost je menší než u NiCd asi 500 cyklů. Zato mají menší paměťový efekt.



Obr. 3-4 - Řez NiMH akumulátorem [15]

3.5. Li-Ion akumulátory

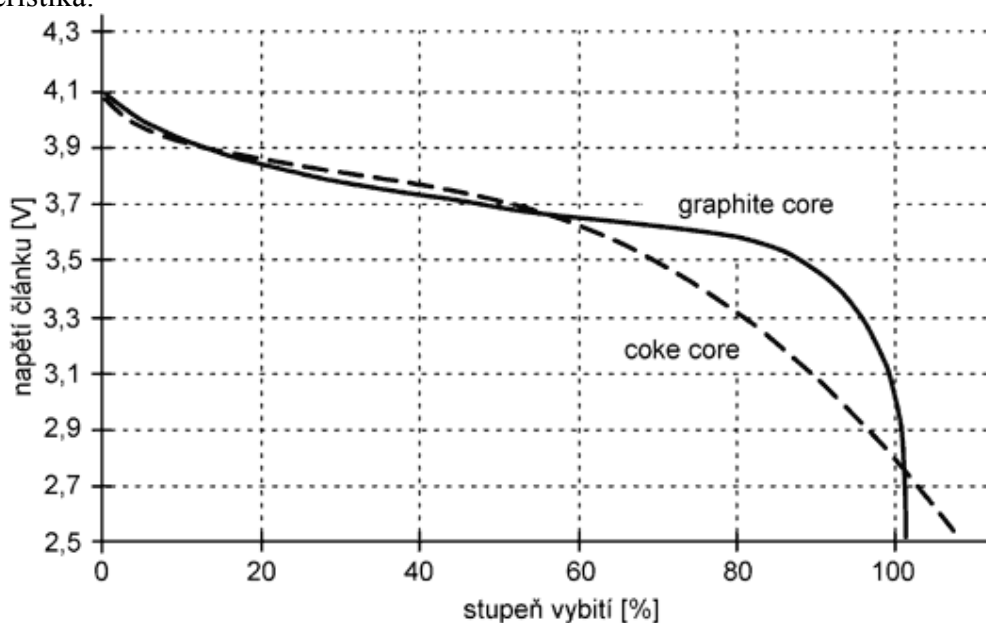
Lithium je kov, který je ze všech nejlépejší. Má velký elektrochemický potenciál a jeho největší předností je to, že poskytuje největší měrnou energii. První akumulátory byly vyráběny s kovovou tedy lithiovou katodou. Tato technologie výroby ale byla pozastavena poté, co jeden z akumulátorů vybuchl.

Kvůli nestabilitě lithia při nabíjení se začaly vyrábět nekovové katody. Ty byly z oxidu lithia a kobaltu. Lithium-kovové akumulátory měly sice větší měrnou energii než baterie Li-Ion, ale z důvodu bezpečnosti se nevyrábí. Výzkum v použití lithia pro výrobu katod však stále běží.

Anoda je tvořena ze sloučenin uhlíku, který je ve dvou provedeních. V prvním případě jako koks (coke) a ve druhém případě jako grafit (graphite). Mezi elektrodami je elektrolyt tvořený lithiovou solí.

Měrná energie Li-Ion akumulátorů je asi dvakrát větší než NiCd. Napětí jednoho článku je 3,60 V. Výzkum v této oblasti naznačuje, že měrná energie článku v budoucnu ještě poroste.

Výhodou je také dobrá vybíjecí charakteristika na Obr. 3-5. Plochá křivka vybíjení nabízí efektivní využití velkého množství energetických zásob při napětí od 3,70 V až do 2,80 V na článek. Z obrázku je také vidět, že pro různou konstrukci anody je různá vybíjecí charakteristika.

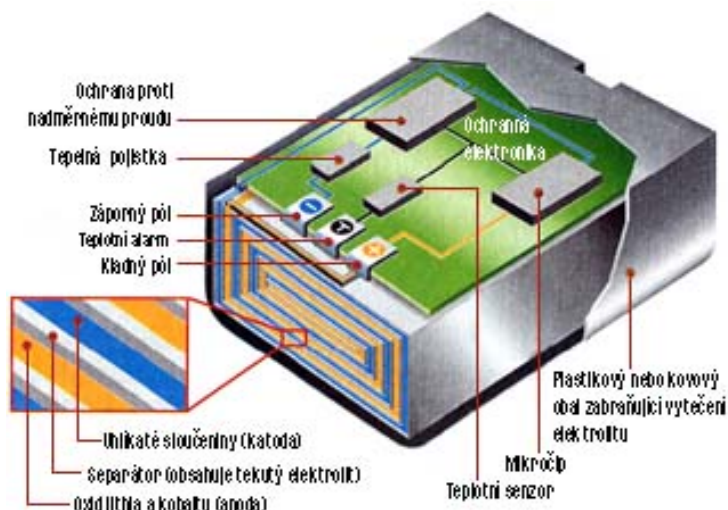


Obr. 3-5 - Vybíjecí charakteristika Li-Ion akumulátorů [16]

Postupný pokles ceny výroby akumulátorů na jednotku měrné energie, použití netoxických materiálů a postupné zvyšování měrné energie dostaly tyto akumulátory až na pomyslný vrchol. Li-Ion akumulátory se nejprve používaly v přenosných zařízeních. Dnes se používají i v těžkém průmyslu a jako akumulátory pro elektromobily.

Li-Ion je nízkodržbový akumulátor a s jeho výhodami se nemohou jiné chemické akumulátory rovnat. U tohoto typu akumulátorů není paměťový efekt, takže není potřebné je pravidelně vybíjet. Nevýhodou těchto akumulátorů je, že potřebují ochranný obvod, který hlídá velikost nabíjecího napětí při nabíjení a jejich cena je větší než u ostatních akumulátorů. Další nevýhodou je jejich krátká životnost. Li-Ion akumulátory mají životnost přibližně 500 až 1 000 nabíjecích a vybíjecích cyklů.

Na Obr. 3-6 je řez Li-Ion akumulátorem. Na horní zelené ploše jsou vidět obvody ochranné elektroniky. Ze strany je vidět anoda, katoda a separátor mezi nimi. To celé je zapouzdřeno v plastovém nebo kovovém krytu, navíc obal zabraňuje vytečení elektrolytu.



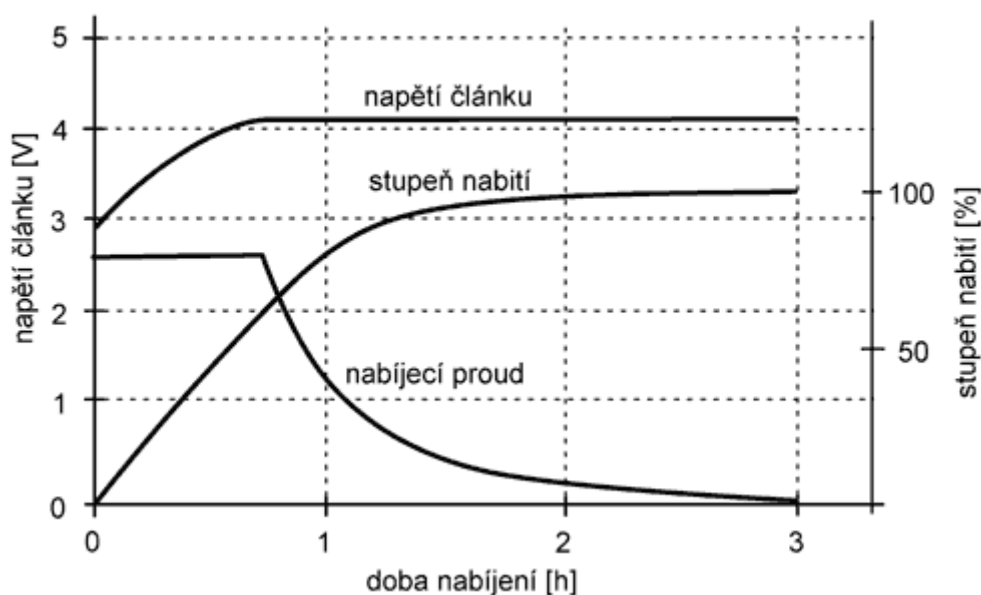
Obr. 3-6 - Řez Li-Ion akumulátorem [17]

3.5.1. Nabíjení Li-Ion akumulátorů

Podobně jako olověné akumulátory se Li-Ion akumulátory nabíjejí ze zdroje napětí, omezuje se nabíjecí proud. Při nabíjení je důležité přesně dodržet konečnou hodnotu napětí. Jen malé přepětí se projeví na životnosti článku, která se tím značně snižuje. V případě, že je konečné napětí nižší než definované, tak se akumulátor nenabije na plnou kapacitu. Konečná hodnota napětí je podle typu článku 4,1 V nebo 4,2 V. Tato hodnota se musí dodržet s přesností $\pm 1\%$.

Na nabíjecí proud takové striktní požadavky nejsou. V závislosti na jeho velikosti se bude jen zkracovat nebo prodlužovat délka nabíjení. Avšak jisté podmínky výrobci udávají. Nabíjecí proud by měl mít hodnotu 0,1 až 2 C. Písmenem C se značí celková kapacita článku. Když bude kapacita článku 10 Ah, tak proud 0,1 C = 1 A a obdobně 2 C = 20 A.

Nabíjecí křivky jsou na Obr. 3-7. Nabíjecí proud je zde 1 C.



Obr. 3-7 - Křivky nabíjení Li-Ion akumulátoru [16]

Z obrázku je patrné, že článek je již asi po hodině a čtvrt nabit skoro na plnou kapacitu. Nejprve je článek nabíjen stálým proudem, až do doby kdy má napětí článku hodnotu konečného nabíjecího napětí. V tuto chvíli je akumulátor nabit asi na 70 % kapacity. Nabíjecí

proud nemusí být po tuto dobu jen konstantní, může pulsovat, ale nesmí překročit maximální povolenou hodnotu nabíjecího proudu.

Po dosažení konečného nabíjecího napětí se článek začne nabíjet konstantním napětím. Proud postupně klesá podle nabíjení článku, až klesne k hodnotě asi 0,05 C. V tu chvíli je článek nabit.

Na začátku nabíjení musí mít článek napětí alespoň 2,7 V až 3 V. Když je článek hluboce vybit a jeho napětí je ještě menší, musí se nabíjet pouze malým proudem v řádu jednotek miliampér, dokud se napětí nezvýší až k potřebné hranici. Kdyby se začal hned nabíjet velkým proudem, hrozilo by poškození článku.

Pro nabíjení Li-Ion akumulátorů je možnost vybrat si z velké řady integrovaných obvodů, které samotný nabíjecí cyklus po celou dobu nabíjení kontrolují a dohlížejí na správný průběh.

3.5.2. Další typy Lithiových akumulátorů - LiFePO₄

Tento typ akumulátoru se liší od klasického tím, že jeho katoda je vyrobena z lithium-železo-fosfátu (LiFePO₄). Anoda je zase vyrobena z uhlíku. Jeho výhodou je schopnost dodávat větší proud do zátěže, má výbornou teplotní stabilitu, nevýhodou je menší napětí článku. Má velkou kapacitu až 170 mAh/g.

Maximální nabíjecí napětí LiFePO₄ článku je 3,6 V a nominální hodnota je 3,2 V. Minimální napětí pod které nesmí hodnota napětí klesnout je 2,8 V.

Stejně jako Li-Ion akumulátory nemají paměťový efekt, samovybití efekt je skoro nulový. Akumulátory dokážou dodávat proud až 40 C a jejich životnost je více jak 500 nabíjecích a vybíjecích cyklů. Někteří výrobci udávají, že v případě vhodného používání se životnost dá prodloužit až na několik tisíc cyklů. Článek má schopnost rychle se nabíjet. Z vybití se na 70 % kapacity nabije za 10 minut, na plnou kapacitu se nabije za 15 minut. Měrný výkon článku je 3000 W/kg.

3.5.3. Další typy Lithiových akumulátorů Li-Sulfare - lithium sírová baterie

Katoda je vyrobena ze slitin lithia a anoda je vyrobena ze síry, která je přidána pomocí nanostruktur do vodivého uhlíku. Výhodou této technologie je třikrát až čtyřikrát větší měrná energie než u klasických Li-Ion akumulátorů tedy asi 600 Wh/l. Jelikož je to nedávno objevená technologie, její životnost je zatím malá.

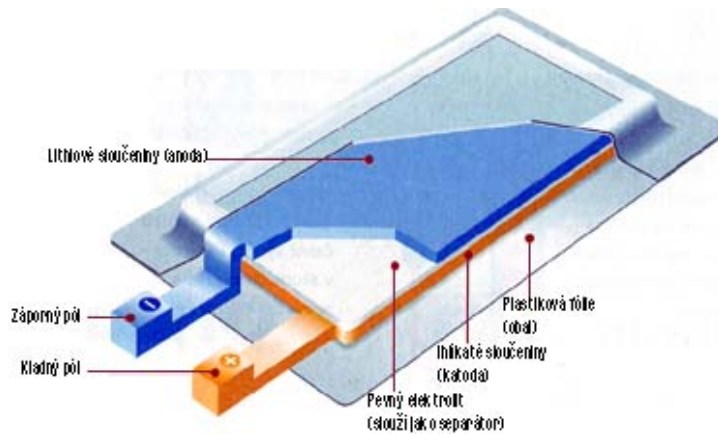
3.5.4. Další typy Lithiových akumulátorů - Li-Polymer

Rozdíl mezi Li-Ion a Li-Pol akumulátory je v tom, že Li-Pol akumulátory používají místo tekutého elektrolytu pevný. Ten je mezi elektrodami, a proto není potřebný separátor. Není potřebný ani nijak pevný obal, protože nemusí držet tekutý elektrolyt. Stačí tedy pouze pevnější fólie, popřípadě fólie pokovená hliníkem.

Katoda je vyrobena z oxidu lithia a kobaltu nebo z oxidu lithia, niklu a kobaltu. Anoda je vyrobena z grafitu. Stejně jako u Li-Ion akumulátoru je napětí článku 3,6 V.

Li-Pol akumulátory lze vyrobit hodně tenké (několik milimetrů). Také jejich ohebnost je velká. Dají se různě formovat.

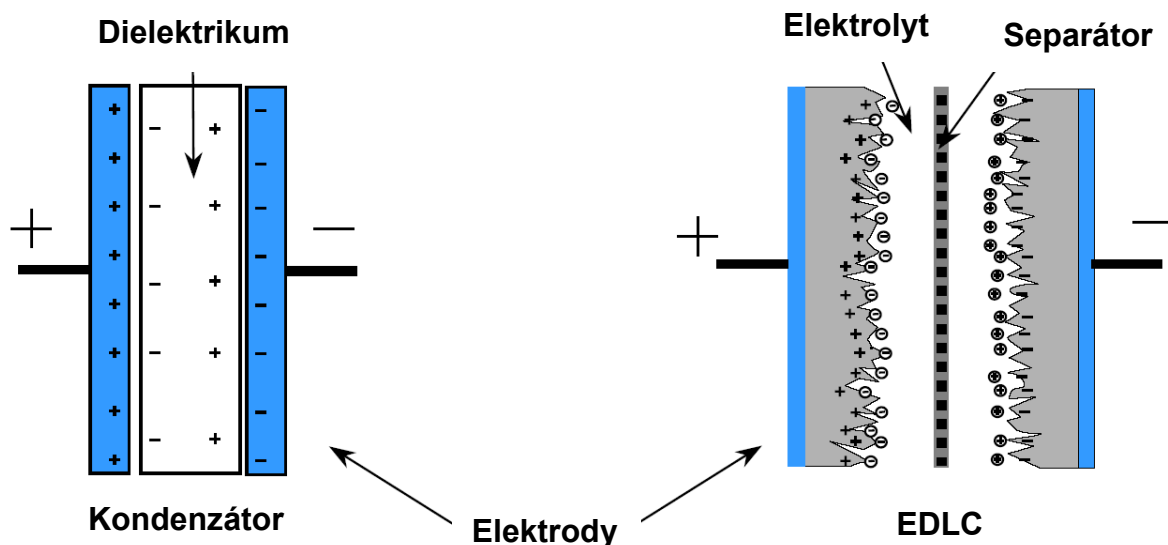
Při stejné kapacitě energie jsou akumulátory Li-Pol asi o 10 až 15 % lehčí, mají však o 10 až 20 % větší objem. Řez Li-Pol akumulátorem je na Obr. 3-8.



Obr. 3-8 - Řez Li-Pol akumulátorem [17]

3.6. Superkapacitor

Superkapacitor neboli superkondenzátor je speciální elektrolytický kondenzátor, který je vyrobený technologií, díky které dosahuje velmi vysokých kapacit řádově stovek až tisíců Faradů. Podstatou této technologie je tzv. elektrochemická dvouvrstva. Z tohoto důvodu tyto kondenzátory dostaly označení EDLC (Electrochemic Double Layer Capacitor). Na Obr. 3-9 je řez obyčejným kondenzátorem (vlevo) a superkapacitorem (vpravo) a na něm je vysvětlen princip činnosti.



Obr. 3-9 – Elektrolytický kondenzátor (vlevo), Superkapacitor (vpravo) [18]

Po přiložení elektrického napětí na kontakty superkapacitoru se záporné ionty začnou přesouvat ke kladné elektrodě a kladné ionty k záporné elektrodě. Šedivě vybarvená plocha představuje vrstvu aktivního uhlíku. Ta je nanesena na vnitřní stranu elektrod, které jsou vyrobeny z hliníkové fólie. Aktivní uhlík je prášek, který je tvořený velmi malými částicemi. V prostoru vytváří velmi pórovitý povrch velké plochy. Výrobci udávají, že jeden gram aktivního hliníku vytvoří plochu asi 2000 m². Aktivní uhlík je pevný materiál tvořený aerogelem. Jeho hustota je malá a gel je v tomto případě nahrazen vzduchem. Dalšími použitými materiály jsou uhlíkové polymery a uhlíkové nanotrubičky, ty dále ještě zvyšují povrch aktivního uhlíku. Elektrody jsou od sebe navzájem odděleny separátorem (polypropylenová fólie) a jsou ještě obklopeny elektrolytem. Ten je tekutý nebo ve formě gelu. Dielektrikum má tloušťku řádově 10⁻¹⁰ m. Díky velké ploše a velmi malé vzdálenosti se dosahuje velké kapacity. Vychází se totiž z toho, že kapacita je popsána jako:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{l} \quad [\text{F}] \quad (24)$$

kde ε_0 – permitivita vakua [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]
 ε_r – relativní permitivita [-]
 S – plocha desek [m^2]
 l – vzdálenost desek [m].

Nevýhodou superkapacitorů je jejich malé pracovní napětí. To se pohybuje okolo 2,3 V až 2,7 V. Pro větší pracovní napětí se musí superkapacitory sestavovat do série. Mezi superkapacitory však musí být použity ochranné balanční obvody.

3.6.1. Vlastnosti superkapacitoru

Jak je patrné z Obr. 3-1 patří superkapacitor někam mezi akumulátory a elektrolytický kondenzátor. V porovnání s akumulátory má vyšší výkonovou hustotu (jednotky až desítky kW/kg), ale menší energetickou hustotu.

Uložit a zase následně odevzdat energii dokáže superkapacitor díky způsobu uchovávání v porovnání s akumulátory rychleji. Čas na nabití a vybití je do 10 s. Vnitřní odpor je menší než u akumulátorů.

Účinnost samotného superkapacitoru je velmi vysoká až 98 %.

Životnost superkapacitoru je podle výrobců až 1 000 000 nabíjecích a vybíjecích cyklů. I po dosažení této hodnoty jsou superkapacitory schopny pracovat, ale již se sníženými parametry kapacity a zvětšeným vnitřním odporem. Avšak životnost je velmi závislá také na pracovních podmínkách. Pracovní teplota je 25 °C. S každým zvýšením teploty o 10 stupňů je životnost poloviční. I při zvýšení jmenovitého napětí se životnost velmi zmenšuje.

Pro příklad je zde uvedeno jedno z provedení superkapacitoru od firmy MAXWELL TECHNOLOGIES. Je to superkapacitorový blok na Obr. 3-10. Jeho parametry jsou v Tabulka 5.



Obr. 3-10 - Superkapacitorový blok [19]

Tabulka 5 - Parametry superkapacitorového bloku [19]

Parametr	Hodnota
Životnost	1 000 000 cyklů
Kapacita	165 F + 20 %
Napětí	48,6 V
Sériový odpor	7,6 mΩ
Proud	4 800 A
Měrná energie	3,81 Wh/kg
Měrný výkon	6,6 kW/kg
Rozměry	416 x 160 x 190 mm
Hmotnost	14,2 kg

V Tabulka 6 je hrubé porovnání běžných akumulátorů, klasického elektrolytického kondenzátoru a superkapacitoru. Hodnoty v tabulce jsou pouze v přesnosti řádů nikoli v jednotkách hodnot.

Tabulka 6 - Hrubé porovnání parametrů elektrochemických akumulátorů, klasického kondenzátoru a superkapacitoru

Parametr	Elektrochemický akumulátor	Klasický kondenzátor	Superkapacitor
Hustota energie	100 Wh/kg	0,2 Wh/kg	1 - 10 Wh/kg
Měrný výkon	1 kW/kg	500 kW/kg	10 kW/kg
Doba nabíjení (vybíjení)	5 h	0,001 s	10 s
Životnost	1 000 cyklů	1 000 000 cyklů	1 000 000 cyklů

3.7. Porovnání vlastností jednotlivých technologií

Jednoznačně nejlepší zařízení pro uchování elektrické energie není. Z výše popsaných vlastností jednotlivých akumulátorů a superkapacitoru lze říci, že každý má svoje výhody a nevýhody.

Z pohledu měrné hustoty energie vycházejí nejlépe akumulátory Li-Ion a jejich speciální typy. Ty mají měrnou hustotu energie až 200 Wh/kg, ve stádiu výzkumu jsou akumulátory Li-Sulfare s měrnou hustotou energie až 600 Wh/kg. Další typy akumulátorů mají hodnotu menší. Nejhůře je na tom z akumulátorů olověný akumulátor. Superkapacitor je v této vlastnosti neporovnatelně horší až o dva řády.

Z pohledu měrného výkonu jsou na tom z akumulátorů nejlépe zase Li-Ion a jejich speciální typy, nejhůře je na tom olověný akumulátor. Superkapacitor je z tohoto pohledu mnohem lepší o jeden až dva řády.

Dle délky nabíjení jsou na tom z akumulátorů znovu nejlépe akumulátory Li-Ion a jejich speciální typy. Akumulátor LiFePO₄ se na plnou kapacitu nabíjí jen asi 15 minut. Superkapacitor je zase o dva řády lepší s dobou nabíjení do 10 s.

Samovybíjení je v tomto případě vlastnost, na kterou nemusíme brát tak velký ohled. Jelikož akumulátory budou v průběhu jednoho dne vícekrát nabíjeny a zase vybíjeny. Nebude se tedy uplatňovat z důvodu malého času, po který se energie bude v akumulátoru uchovávat.

V našem použití musíme dát velký důraz na vlastnost nazývanou „paměťový efekt“. Jelikož není předem jisté, že se při každé jízdě akumulátor zcela vybije, musíme se na tuto vlastnost zaměřit. Z tohoto pohledu jsou zcela nevhodné akumulátory NiCd a NiMH. U nich by se mohlo stát, že po nabití by po rozjezdu vozidla mohly začít vykazovat vybitý stav. Z tohoto se zase zdá, že by nejvhodnější volbou byly Li-Ion akumulátory nebo jeden z jejich speciálních typů. Bez paměťového efektu je i superkapacitor.

Z předchozího zhodnocení by se jevílo, že pro použití by byl nejvhodnější jeden z typů Lithiových akumulátorů. Jenže tyto akumulátory mají velkou nevýhodu v porovnání s ostatními akumulátory, kterou je jejich životnost. U nich se uvádí životnost asi 500 nabíjecích a vybíjecích cyklů. NiCd a NiMH akumulátory mají životnost přes 1000 cyklů a olověné akumulátory mají při šetrném zacházení životnost až 3000 cyklů.

U typu LiFePO₄ bude vhodné se zaměřit na ty baterie, u kterých výrobce udává při předem definovaném používání delší životnost až několik tisíc cyklů.

Z hlediska životnosti je na tom však nejlépe superkapacitor. Jeho životnost je výrobcem udávána na 1 000 000 cyklů. A i po tomto překročení může superkapacitor pracovat, i když již se sníženým parametrem kapacity a se zvětšeným vnitřním odporem.

Akumulátory NiCd a NiMH jsou v tomto případě pro použití nevhodné, protože mají paměťový efekt.

Olověný akumulátor má poměrně malou měrnou hustotu energie v porovnání s jinými akumulátory. I jeho vlastnosti jsou již překonané modernějšími akumulátory. Proto ani tento typ nebude vhodné použít.

Superkapacitor by byl dle svých vlastností ideální, ale má velmi malou měrnou hustotu energie. Muselo by být použito velké množství superkapacitorů a měly by tedy velkou hmotnost řádově několik desítek tun.

Nejvýhodněji tedy při porovnání všech vlastností vychází akumulátory LiFePO₄. Bude tedy vhodné zaměřit se na tyto akumulátory, u kterých výrobce udává, že při správném používání mají životnost až několik tisíc cyklů. Nejenom životnost ale i jejich poměrně krátký potřebný čas na plné nabití je velkou výhodou oproti jiným akumulátorům. Této výhody lze využít, když se budou akumulátory dobíjet z externího zdroje.

3.8. Li-Ion akumulátor

Po zhodnocení vlastností jednotlivých akumulátorů byl vybrán typ akumulátoru Li-Ion. Vhodný pro použití je akumulátor TS – LYP400AHA - je to LiFeYPO₄. Jeho parametry jsou shrnuty v Tabulka 7.

Tabulka 7 - Parametry akumulátoru TS-LYP400AHA [20]

TS-LYP400AHA		
Jmenovitá kapacita	400 Ah	
Provozní napětí	Nabitý	4,0 V
	Vybitý	2,8 V
Maximální nabíjecí proud	$\leq 3CA$	
Maximální vybíjecí proud	Konstantní	$\leq 3CA$
	Impulsní	$\leq 20CA$
Standardní nabíjecí a vybíjecí proud	0,5CA	
Životnost	80% DOD	≥ 3000 cyklů
	70% DOD	≥ 5000 cyklů
Odolnost pláště proti teplotě	≤ 200 °C	
Pracovní teplota	Nabíjení	- 45 °C až 85 °C
	Vybíjení	- 45 °C až 85 °C
Vlastní vybíjení	$\leq 3\%$ za měsíc	
Hmotnost	13,5 kg \pm 0,2 kg	

Z parametrů v tabulce lze určit velikost kapacity:

$$E_{CELK} = C \cdot U = 400 \cdot 2,8 = 1120 \text{ Wh} \quad (25)$$

kde C – jmenovitá kapacita [Ah]
 U – napětí vybitého akumulátoru [V]

Optimální nabíjecí a vybíjecí proud je:

$$I_{OPT} = 0,5 \cdot C = 0,5 \cdot 400 = 200 \text{ A} \quad (26)$$

kde $0,5$ – standardní nabíjecí a vybíjecí proud
 C – jmenovitá kapacita [Ah]

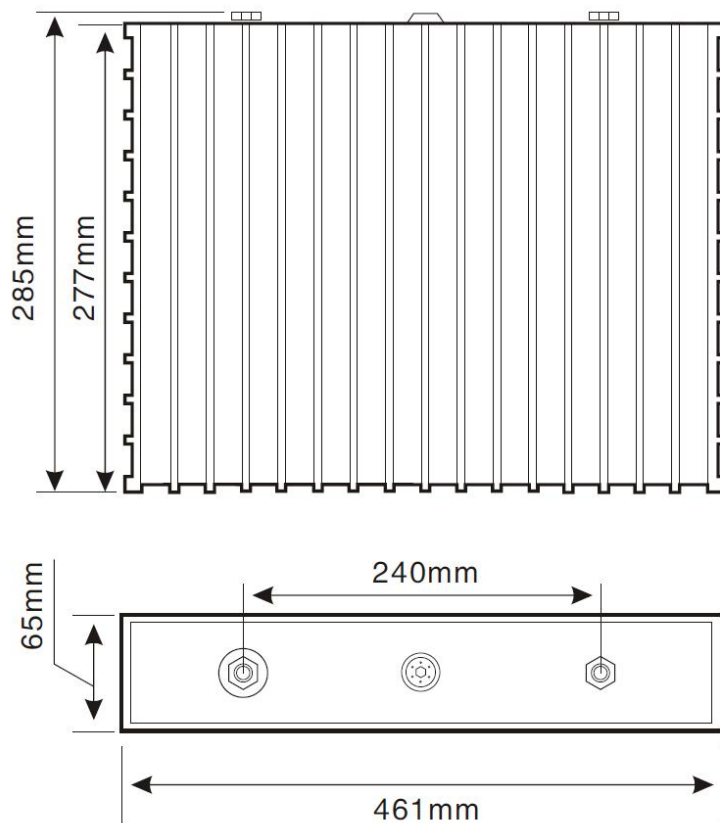
Maximální nabíjecí a vybíjecí proud je:

$$I_{OPT} = 3,0 \cdot C = 3,0 \cdot 400 = 1200 \text{ A} \quad (27)$$

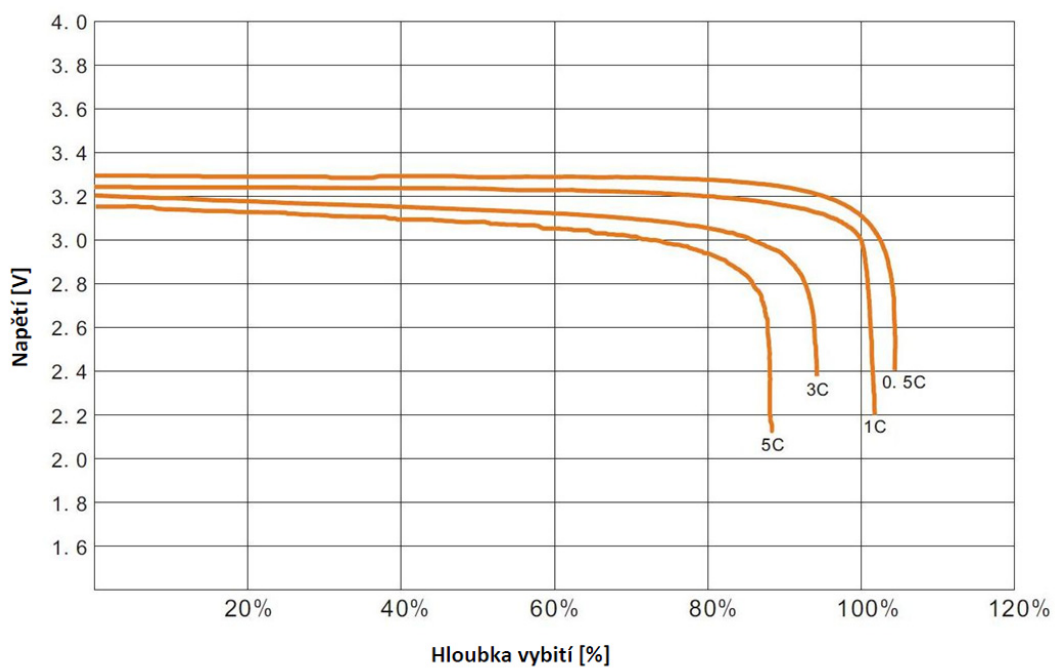
kde $3,0$ – maximální konstantní nabíjecí a vybíjecí proud
 C – jmenovitá kapacita [Ah]

Velmi důležitý pro životnost akumulátoru je parametr DOD (hloubka vybití akumulátoru). Z hodnot charakterizujících akumulátor vyplývá, že v případě nižšího vybití akumulátoru se životnost zvyšuje.

Z Obr. 3-12 je patrné, jak klesá velikost výstupního napětí akumulátoru v závislosti na velikosti vybíjecího proudu. Dále je z grafu zřejmé, že nominální hodnota napětí akumulátoru je přibližně 3,2 V. Až v oblasti vybití napětí prudce klesá.



Obr. 3-11 - Rozměry akumulátoru TS-LYP400AHA [20]



Obr. 3-12 - Vybíjecí křivky akumulátoru TS-LYP400AHA [20]

4. Energetická náročnost vlakové dopravy a její minimalizace k realnosti použití solárního zdroje elektrické energie

Spotřeba elektrické energie velmi ovlivňuje možnost použití k napájení železničního vozidla solárního zdroje elektrické energie. Vozidlo je sice vybaveno systémem s vysokou účinností, jako je trakční motor, měniče a další zařízení, ale velice limitující je stále účinnost samotného zdroje. PV panely mají účinnost okolo 20 %.

Množství energie dopadající na povrch PV panelů je pro provoz železničního vozidla v předem definovaném režimu ve vhodných aplikacích dostatečné, ale po převedení dopadající sluneční energie v PV panelech na energii elektrickou je provoz velmi omezen velikostí výstupního výkonu. U nepřímého napájení zmenšuje tuto nevýhodu akumulování a následné využití energie ze zásobníku.

Při výpočtu energetické náročnosti musíme vycházet z reálného použití železničního vozidla. Spotřeba elektrické energie závisí na mnoha parametrech. Jak na cestovní rychlosti a době jízdy, tak na vlastnostech vozidla a profilu tratě, na režimu jízdy a počtu zastávek.

4.1. Jízda železničního vozidla

Jízda železničního vozidla se skládá ze čtyř fází. První fází je rozjezd, druhou fází je jízda cestovní rychlostí, třetí fází může být jízda výběhem a čtvrtou fází je brzdění.

Energeticky nejnáročnější částí z vyjmenovaných fází je rozjezd. Při rozjezdu železniční vozidlo zvětšuje svou kinetickou energii. Ta se skládá z energie posuvných částí E_k a energie rotujících částí E_r . Energií E_k mají části, které při jízdě vykonávají pohyb posuvný. To je tedy celé železniční vozidlo. Energií E_r mají části, které kromě pohybu posuvného vykonávají ještě pohyb rotační. To jsou např. dvojkolí, rotor trakčního motoru.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m_{zv} \cdot v^2 \quad [\text{J}] \quad (28)$$

kde m_{zv} – hmotnost železničního vozidla [kg]
 v – rychlost jízdy [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

$$E_r = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad [\text{J}] \quad (29)$$

kde J – moment setrvačnosti rotujících hmot [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]
 ω – úhlová rychlost rotujících hmot [s^{-1}].

Pro lepší názornost je vhodné přepočítat celkovou energii vozidla na Wh:

$$E_{\text{CELK}} = \frac{E_k + E_r}{3600} \quad [\text{Wh}] \quad (30)$$

kde E_{CELK} – celková energie [Wh].

Při rozjezdu se tedy musí trakčními motory vytvořit potřebná kinetická energie. Tato závislost je kvadratická. Jelikož potřebná energie pro rozjezd na danou rychlost je kvadraticky závislá na rychlosti jízdy i rychlosti úhlové. Navíc se při rozjezdu musí překonávat i odporové síly, které na železniční vozidlo působí.

Při dosažení ustálené rychlosti se trakční výkon zmenší o výkon potřebný k dalšímu zrychlování a dále se jede stálou rychlostí. Pro tuto část jízdy je potřebný výkon, který překonává všechny odporové síly, které by železniční vozidlo brzdily.

Třetí částí jízdy je jízda výběhem. Tato fáze se však nemusí využívat. Může se z druhé fáze přejít rovnou do fáze čtvrté. Při výběhu není do trakčních motorů dodáván výkon, který udržuje stálou rychlost, ale železniční vozidlo jede setrvačností. Odporové síly, které byly

během jízdy pod výkonem překonávány trakčními motory, v této části jízdy železniční vozidlo zpomalují.

Čtvrtou částí jízdy je brzdění. Při tomto ději se kinetická energie, která byla železničnímu vozidlu dodána při rozjezdu, zase musí odebrat. To se provádí např. při elektrodynamickém brzdění tak, že se kinetická energie převádí v trakčních motorech na energii elektrickou a ta se přivádí do brzdných odporníků, kde se přeměňuje na teplo a to je odvětráváno do okolí. Veškerá energie se tak zmaří a nelze ji znovu využít. Další možností je třecí brzdění.

Pro zlepšení energetických vlastností se brzdění do odporníků nahrazuje rekuperačním brzděním. Při rekuperačním brzdění se kinetická energie železničního vozidla nemaří v odpornicích, nebo jinak neztrácí. Trakční motory v tuto chvíli pracují jako generátory, které jsou poháněny železničním vozidlem. Jelikož je vozidlo z důvodu funkce nepřímého solárního napájení vybaveno zásobníkem energie, tak energie, která by se při brzdění mařila v odpornicích, se ukládá do zásobníku. Tuto energii lze pak následně využít při dalším rozjezdu. Jelikož je zásobník dimenzován tak, že je schopen toto množství energie dodat při rozjezdu, je také schopen tuto energii v době brzdění zpátky pojmout.

4.2. Jízdní odpory

Na vlak při jízdě působí několik různých sil, které musí překonávat. Těmto silám se říká jízdní odpory.

Jízdní odpory se dají rozdělit do tří základních skupin:

- vozidlové odpory
- traťové odpory
- dynamické odpory

4.3. Vozidlové odpory

Vozidlové odpory vždy působí proti směru jízdy vlaku. Tedy také proti směru působení tažné síly vyvíjené trakčními motory. Jsou závislé na konstrukci samotného vozidla a na velikosti rychlosti a jsou v porovnání s odpory jiných dopravních prostředků značně menší.

Tyto odpory vznikají třením a patří mezi ně tyto tři následující:

- odpor valivého tření – ten vzniká třením mezi koly a kolejnicí
- odpor čepového tření – tento odpor vzniká třením v nápravových ložiscích
- odpor vzduchu – vzniká rozrážením vzduchového valu před vozidlem a třením vzduchu o jedoucí vlak

Prvním zmíněným odporem je valivé tření. Valivé tření vzniká mezi kolem a kolejnicí. Je to síla, která brání kolu ve valení po kolejnici. Její velikost závisí na materiálech kola a kolejnice, na jejich povrchu, na tíze kterou kolo působí na kolejnici, na rychlosti jízdy, na technickém stavu trati.

Dalším odporem je čepové tření. To vzniká otáčením nápravy dvojkolí v ložisku. Jeho velikost je závislá na konstrukci ložiska a principu na jakém ložisko funguje. Na materiálu z kterého je ložisko vyrobeno, jaké byly pracovní podmínky v blízké minulosti. Jestli ložisko bylo v klidu nebo jestli již bylo v provozu, na druhu použitého oleje a na tom jak je ložisko mazáno. U valivých ložisek je jejich odpor minimální.

Posledním odporem je odpor vzduchu. Závislost odporu vzduchu na rychlosti je kvadratická. Z toho vyplývá, že odpor vzduchu má velký vliv hlavně při vyšších rychlostech.

Velikost odporu vzduchu se dá určit ze vzorce:

$$F_{VZD} = \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \quad [\text{N}] \quad (31)$$

kde C_x – je tvarový součinitel, ten je závislý na tvaru přední masky a na počtu vozidel obvykle se pohybuje v hodnotách [-]

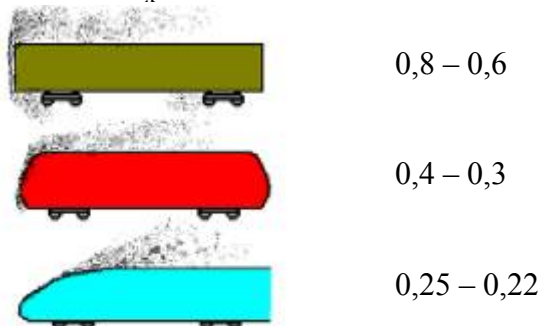
ρ – hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

S – příčný průřez čelního vozidla [m^2]

v – rychlost vlaku [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

nebo ho lze změřit v aerodynamickém tunelu. Při tomto měření se většinou používají zmenšené modely vozidla nebo celého vlaku.

Na Obr. 4-1 jsou znázorněny různé konstrukce přední části hnacího vozidla a velikosti hodnoty tvarového součinitele C_x .



Obr. 4-1 - Hodnota C_x podle tvaru čela [22]

4.4. Traťové odpory

Další skupinou odporů, které působí na vlak během jízdy, jsou traťové odpory. Ty na vlak nepůsobí stále stejnou velikostí ani směrem. Záleží na profilu krajiny a tratě do ní umístěné. Traťové odpory lze zase rozdělit do několika skupin:

- odpor ze stoupání

$$F_{ODP} = m \cdot g \cdot s = m \cdot g \cdot \frac{h}{L} \quad [\text{N}] \quad (32)$$

kde m – hmotnost železničního vozidla [kg]

g – gravitační zrychlení [m/s^2]

s – stoupání [m]

L – dráha stoupání [m]

h – výška stoupání [m].

- odpor v oblouku trati

Při jízdě do stoupání zvyšuje vlak svou potenciální energii:

$$E_{POT} = m \cdot g \cdot h \quad [\text{J}] \quad (33)$$

Trakční motory při jízdě do stoupání musejí nejenom překonávat jízdní odpory, ale musejí také zvětšovat potenciální energii železničního vozidla. To klade velký důraz na větší výkon. Čím je stoupání strmější, tím je větší energetická náročnost.

Při jízdě po spádu se potenciální energie z vozidla odevzdává. Když je tato energie větší než energie potřebná pro překonávání odporových sil působících proti vozidlu, musí být buď likvidována v třecích brzdách, což je ztrátové, nebo může být rekuperována.

Při průjezdu vlaku obloukem se mění směr jízdy vlaku. Na vlak působí síly, které ho vedou v kolejnicích a tím ho ovlivňují. Tyto síly se nazývají odpor z oblouku trati. Čím menší má oblouk poloměr, tím větší je odporová síla.

4.5. Minimalizace energetické náročnosti

Z předešlého rozboru jízdních a traťových odporů vyplývá, co energeticky zatěžuje železniční vozidlo při jízdě. Pro použití napájení z PV panelů je třeba všechny tyto nároky minimalizovat.

4.5.1. Minimalizace energetické náročnosti – vozidlové odpory

Mnohem vhodnější je využít PV panely k napájení železničního vozidla než automobilu. Vhodnost použití vyplývá již z porovnání jejich valivého odporu. Železniční vozidlo má dvojkolí vyrobená z oceli, stejně tak jsou vyrobeny i kolejnice, po kterých jezdí. Zatím co automobil má na obvodu kola pneumatiku a jezdí po asfaltové silnici. To je příčinou toho, že valivý odpor železničního vozidla je asi osmkrát menší. Valivý odpor železničního vozidla je asi 1 ‰ a automobilu je asi 8 ‰ celkové hmotnosti.

Železniční vozidlo má oproti automobilu i další nesporné výhody, umí totiž tvořit vlak. Pro přepravu více osob je vhodné využít jeden vlak, než využít několik automobilů. Vlak je totiž sestavován tak, že má jedno čelo, za kterým se schová celý zbytek vlaku. Zatím co automobily se takto skládat nedají. Každý automobil má čelo, kterým rozráží vzduch před sebou. To je již zmíněný odpor vzduchu.

Tento odpor je závislý na druhé mocnině rychlosti. Tím je tedy ještě více nevhodné, když se tento odpor musí překonávat vícekrát u několika automobilů než jen jednou u železničního vozidla. Zmenšit ho lze také vhodným tvarem předního čela. Jak je patrné z Obr. 4-1, je důležité, jaký tvar čelo má. Nejvhodnější tvar čela by se měl blížit tvaru kapky. Vhodnost tvaru čelní plochy se zjišťuje v aerodynamických tunelech na zmenšených modelech, nebo pomocí počítačových simulací.

Odpor čepového tření je závislý na ložiscích. V dnešní době jsou valivá ložiska již na takové úrovni, že jejich odpor je při jízdě nepatrný. Velikost je přibližně jedna tisícinou celkové tíhy vozidla. Jejich další výhodou je i nenáročnost na údržbu.

Celkový jízdní odpor je součtem jednotlivých jízdních odporů. Pro výpočet celkových jízdních odporů se používá vyjádření, které se vztahuje na jeden kN vozidla. Pro použité železniční vozidlo DESIRE Classic DMU lze měrný jízdní odpor vyjádřit vztahem:

Výpočet koeficientů:

$$a = 1 \text{ (hladká kola – použití kotoučové brzdy) N/kN} \quad (34)$$

$$c = \frac{F_{VZD}}{F_G} = \frac{\frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot S}{m \cdot g} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 0,6 \cdot 1,2 \cdot 11,5}{72 \cdot 9,81} = 0,00586 \text{ N/kN} \quad (35)$$

$$o_{DE} = a + c \cdot v^2 = 1 + 0,00586 \cdot v^2 \text{ N/kN} \quad (36)$$

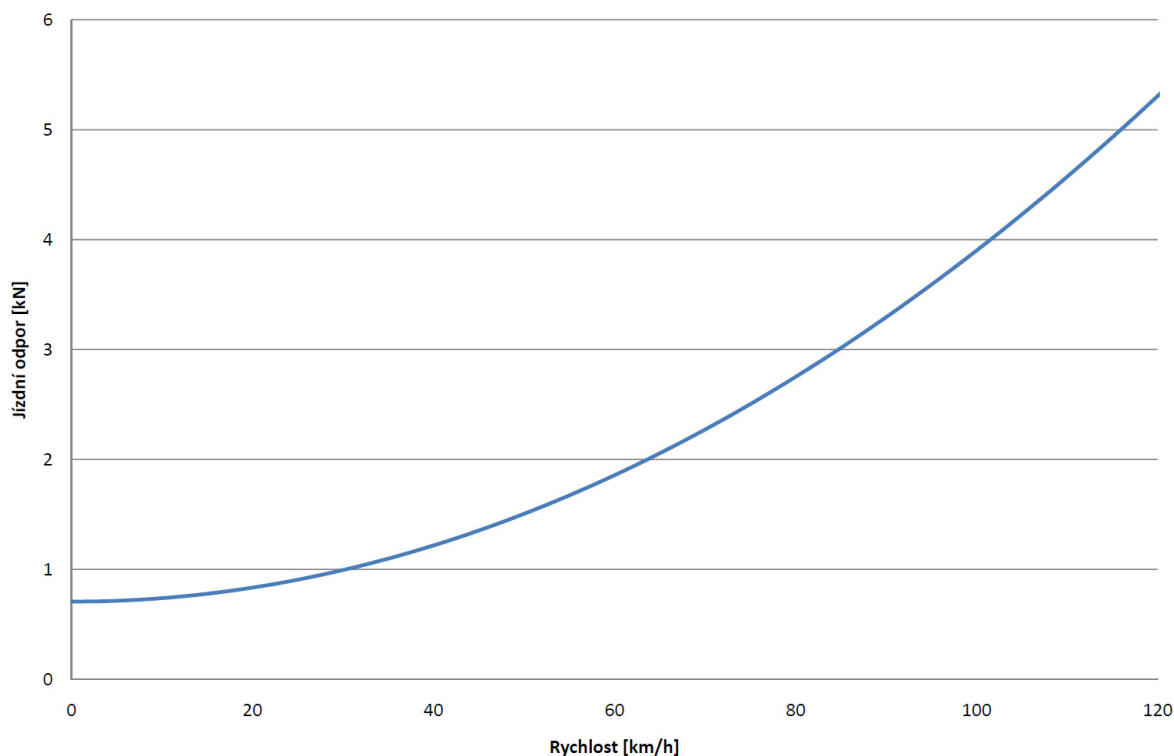
kde a – absolutní člen – závislý na čepovém tření [-]

c – kvadratický člen – závislý na odporu vzduchu [-]

o_{DE} – měrný jízdní odpor DESIRO Classic DMU [N/kN]

v – rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Na Obr. 4-2 je odporová síla železničního vozidla DESIRO Classic DMU v závislosti na velikosti rychlosti.



Obr. 4-2 – Jízdní odpor železničního vozidla DESIRO Classic DMU v závislosti na rychlosti

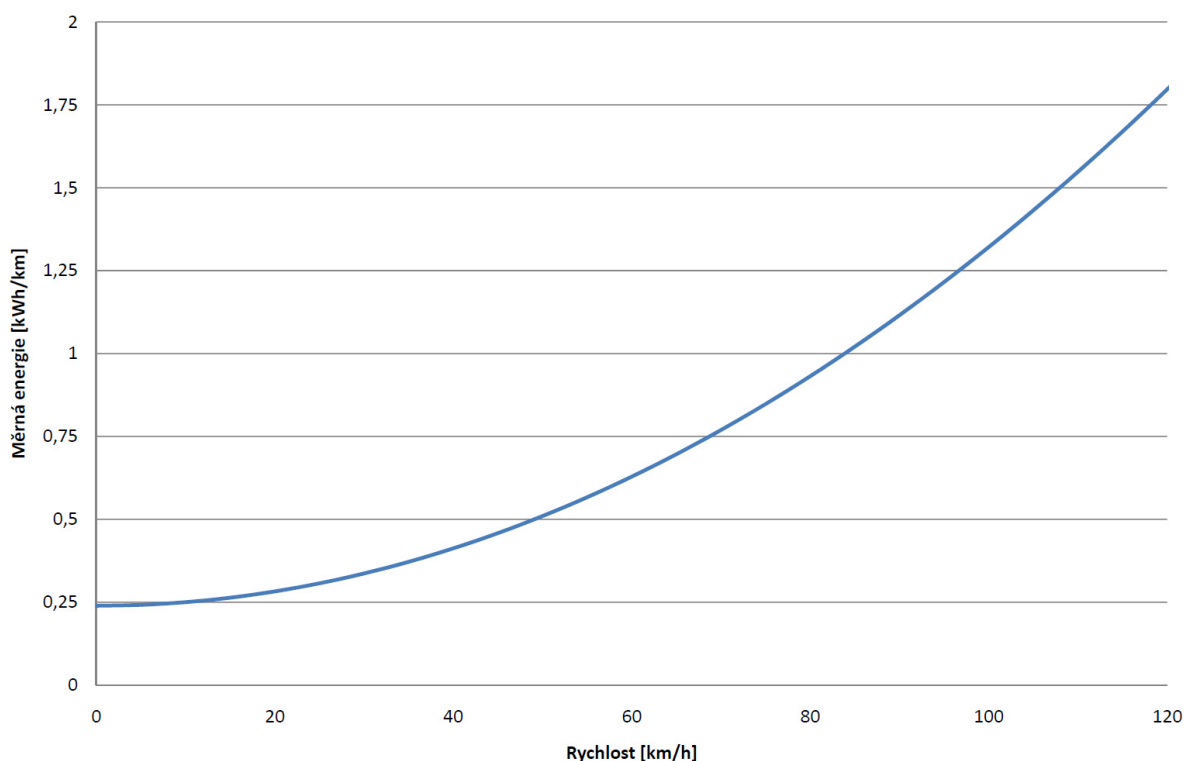
Ze znalosti odporové síly lze vypočítat měrnou potřebu energie pro jízdu rovnoměrnou rychlostí. Tato závislost je vynesena do grafu na Obr. 4-3, měrná energie je v kWh/km.

Výpočet měrné energie:

$$E_{MER} = \frac{F \cdot l}{l \cdot \eta_{PMSM} \cdot \eta_{MEN} \cdot \eta_{ZAS} \cdot 3600} = \frac{F}{\eta_{PMSM} \cdot \eta_{MEN} \cdot \eta_{ZAS} \cdot 3600} \text{ [Wh/m]} \quad (37)$$

kde F – odporová síla [N]
 l – ujetá vzdálenost [m]
 η_{PMSM} – účinnost trakčního motoru [-]
 η_{MEN} – účinnost měniče [-]
 η_{ZAS} – účinnost zásobníku [-]

Účinnost trakčního motoru je 92 %, účinnost měniče je 98 % a účinnost zásobníku je 90 %.



Obr. 4-3 – Měrná spotřeba energie vozidla DESIRO Classic DMU pro jízdu rovnoměrnou rychlostí
Tabulka 8 - Měrná spotřeba energie vozidla DESIRO Classic DMU v závislosti na rychlosti

Rychlost [km/h]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Energie [kWh/km]	0,24	0,24	0,25	0,26	0,28	0,31	0,34	0,37	0,41	0,46	0,51	0,57	0,63

4.5.2. Minimalizace energetické náročnosti – traťové odpory

Traťové odpory byly definované v předešlém textu. Patří mezi ně odpor ze stoupání a odpor v oblouku trati.

Při jízdě do stoupání se zvětšuje potenciální energie, což je u železničního vozidla výkonově dost náročné. Je to způsobeno tím, že železniční vozidlo má zpravidla velkou hmotnost několik desítek tun. Z energetického hlediska by tedy trať neměla mít žádná, nebo jen velmi malá stoupání, aby byla vhodná pro použití. Při jízdě po spádu se přebytečná energie může rekuperovat zpět do zásobníku.

Dalším odporem je odpor v oblouku. Jak bylo uvedeno, velikost odporové síly a tedy i větší náročnost na potřebný výkon, je závislá na poloměru oblouku. Pro energetickou minimalizaci by bylo nejvýhodnější, aby trať byla rovná. Z hlediska dopravního je ale potřeba, dopravit lidi z jednoho místa do druhého. Mezi těmito místy se jen málokdy dá vystavět přímá trať. Z toho tedy plyne, že když již jsou oblouky zapotřebí, jejich poloměr by měl být co největší.

4.6. Výpočet reálné spotřeby na trati

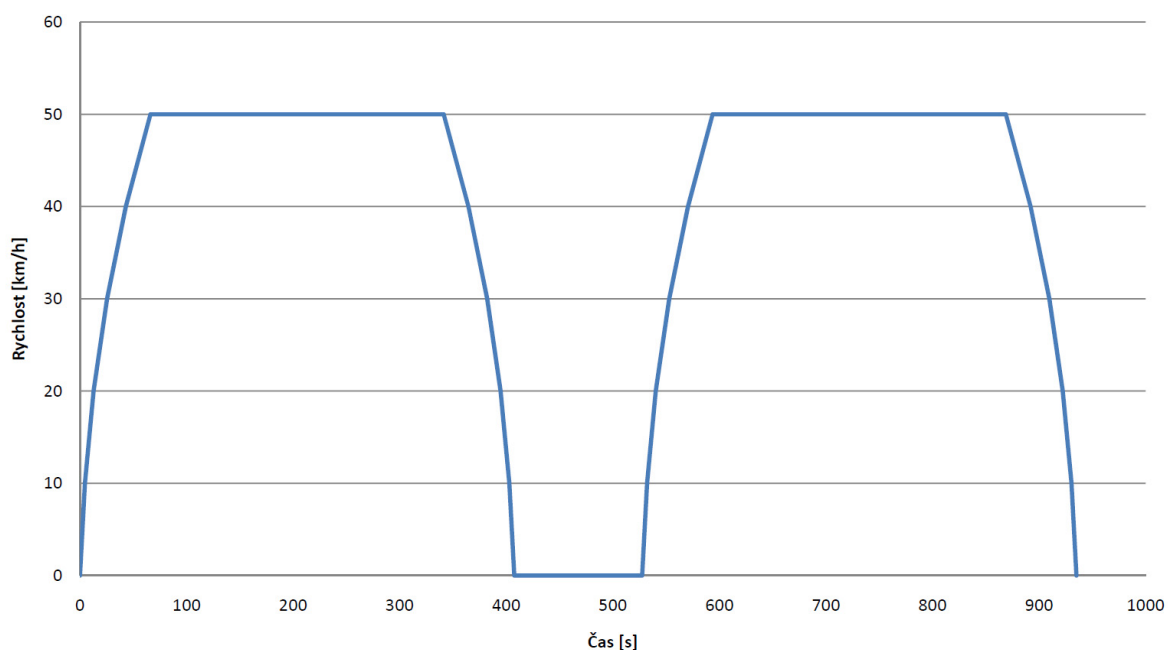
Pro využití solárních zdrojů elektrické energie teď následuje výpočet energetické náročnosti pro jízdu.

4.6.1. Energetická náročnost při cestovní rychlosti 50 km/h

Vzorový příklad:

Trať je přímá, dlouhá 10 km a na trati jsou dvě zastávky. Ve stanici 2 vlak čeká 2 minuty. Projetí celé tratě i se zastavením ve stanici 2 trvá 15 min a 35 sekund.

Průběh rychlosti v závislosti na čase je naznačen na Obr. 4-4. Při výpočtu se vycházelo z předpokladu, že maximální trakční výkon trakčních motorů je 150 kW. Tento výkon se musí v každý okamžik rozložit na část, která urychluje železniční vozidlo a na část která překonává odporové síly a hraje ztráty v trakčním pohonu.



Obr. 4-4 - Závislost rychlosti jízdy na čase

V Tabulka 9 je vypočítaná elektrická energie potřebná pro projetí dané dráhy ustálenou rychlostí. Tato energie je potřebná pro překonávání jízdních odporů.

$$E_{JIZ} = \frac{F \cdot l}{\eta_{PMSM} \cdot \eta_{MEN} \cdot \eta_{ZAS}} \quad [\text{Wh}] \quad (38)$$

V Tabulka 10 je spočítána elektrická energie potřebná pro urychlení vozidla na požadovanou rychlost. Je to kinetická energie, kterou vozidlo při rozjezdu získá a která pokryje ztráty při urychlení. Hodnoty jsou vypočítány:

$$E_{KIN} = \frac{\frac{1}{2} \cdot (m_{ZV} + m_{ROT}) \cdot v^2}{\eta_{PMSM} \cdot \eta_{MEN} \cdot 3600} \quad [\text{Wh}] \quad (39)$$

kde m_{ZV} – hmotnost železničního vozidla [kg]
 m_{ROT} – ekvivalent rotujících hmot [kg]
 v – rychlost [m/s].

Hmotnost železničního vozidla je 72 000 kg a ekvivalent rotujících hmot je 6 000 kg.

Ve sloupci nazvaném Rekuperace je ještě spočítána energie, která se při rekuperačním brzdění vrátí zase zpět do zásobníku. Při výpočtu se uvažuje kinetická energie železničního vozidla a účinnosti trakčního motoru a měniče.

$$E_{REK} = E_{KIN} \cdot \eta_{PMSM} \cdot \eta_{MEN} \quad [\text{Wh}] \quad (40)$$

Tabulka 9 - Energetická náročnost na ujetí dané dráhy cestovní rychlostí

Energie E_{JIZ} [kWh]		Vzdálenost [km]								
		2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Cestovní rychlost [km/h]	15	0,53	0,66	0,79	0,92	1,05	1,19	1,32	1,45	1,58
	20	0,56	0,71	0,85	0,99	1,13	1,27	1,41	1,55	1,69
	25	0,61	0,77	0,92	1,07	1,23	1,38	1,53	1,69	1,84
	30	0,67	0,84	1,01	1,18	1,35	1,51	1,68	1,85	2,02
	35	0,74	0,93	1,11	1,30	1,49	1,67	1,86	2,04	2,23
	40	0,82	1,03	1,24	1,44	1,65	1,85	2,06	2,27	2,47
	45	0,92	1,15	1,37	1,60	1,83	2,06	2,29	2,52	2,75
	50	1,02	1,27	1,53	1,78	2,04	2,29	2,55	2,80	3,06
	55	1,13	1,42	1,70	1,98	2,26	2,55	2,83	3,11	3,40
	60	1,26	1,57	1,89	2,20	2,51	2,83	3,14	3,46	3,77

Tabulka 10 - Energie potřebná pro urychlení na danou rychlost a energie vrácená do zásobníku při rekuperačním brzdění (bez vlivu jízdních odporů)

Rychlost [km/h]	Energie potřebná pro rozjezd – E_{KIN} [kWh]	Energie rekuperovaná - E_{REK} [kWh]
10	0,10	0,08
20	0,41	0,30
30	0,92	0,69
40	1,63	1,22
50	2,55	1,90
60	3,67	2,74

V Tabulka 11 jsou popsány parametry rozjezdu železničního vozidla. V prvním sloupci je rychlost, na kterou se železniční vozidlo rozjíždí z rychlosti nulové. Ve druhém sloupci je průměrné zrychlení, v tabulce je dále vypočítán čas, jaký bude potřebný pro rozjezd na danou rychlost a jaká bude ujetá vzdálenost. Ve sloupci Kinetická energie potřebná pro rozjezd je vypočítané množství energie, které bude potřebné pro urychlení na danou koncovou rychlost. Při rozjíždění jsou také překonávány jízdní odpory. To je vypočítané ve sloupci Energie k překonání jízdních odporů. V posledním sloupci Energie potřebná pro rozjezd je součet energie potřebné pro urychlení vlaku a energie potřebné pro překonání odporových sil. U obou výpočtů energie se uvažuje i se ztrátami v pohonu, měniči a zásobníku.

V Tabulka 12 jsou parametry brzdění vozidla. Stejně jako u rozjezdu je zde rychlost, z které se brzdí na rychlost nulovou. Průměrné zpomalení a k nim příslušné časy a délka ujeté dráhy. Ve sloupci Kinetická energie uvolněná při brzdění je kinetická energie, která se uvolní při brzdění (při zmenšování kinetické energie železničního vozidla). Od ní se odečte energie potřebná pro překonání jízdních odporů, která je ve sloupci Energie k překonání jízdních odporů. Rozdíl těchto energií se pak uloží do zásobníku. Množství uložené energie je závislé na účinnosti trakčního motoru a účinnosti měniče. Tato energie je ve sloupci Energie rekuperovaná.

Hodnoty v obou tabulkách byly vypočítány numerickou integrací v tabulkovém procesoru.

Tabulka 11 - Parametry rozjezdu železničního vozidla

Rychlost [km/h]	Průměrné zrychlení [m/s ²]	Čas pro zrychlení [s]	Ujetá dráha [m]	Kinetická energie potřebná pro rozjezd [kWh]	Energie k překonání jízdnicích odporů [kWh]	Energie potřebná pro rozjezd - E _{PPR} [kWh]
0 - 10 km/h	0,60	4,6	6,4	0,10	0,00	0,10
0 - 20 km/h	0,49	11,4	35,7	0,41	0,01	0,42
0 - 30 km/h	0,36	22,8	116,4	0,92	0,03	0,95
0 - 40 km/h	0,28	39,7	282,0	1,63	0,10	1,73
0 - 50 km/h	0,22	62,7	569,8	2,55	0,23	2,78

Tabulka 12 - Parametry brzdění železničního vozidla

Rychlost	Průměrné zpomalení [m/s ²]	Čas pro zpomalení [s]	Ujetá dráha [m]	Kinetická energie uvolněná při brzdění [kWh]	Energie k překonání jízdnicích odporů [kWh]	Energie rekuperovaná E _{REK} [kWh]
50 - 0 km/h	0,22	62,7	569,8	2,09	0,19	1,73
40 - 0 km/h	0,28	39,7	282,0	1,34	0,08	1,15
30 - 0 km/h	0,36	22,8	116,4	0,75	0,03	0,66
20 - 0 km/h	0,49	11,4	35,7	0,33	0,01	0,30
10 - 0 km/h	0,60	4,6	6,4	0,08	0,00	0,08

Mezi stanicemi jede železniční vozidlo pod výkonem. Musí překonávat jízdnicí odpory, které na něj působí.

Potřebná energie pro jízdu mezi stanicemi bez rozjezdu a brzdění:

$$E_{JIZDA} = \frac{[l - (s_{roz} + s_{brz})] \cdot F}{3600} \quad [\text{Wh}] \quad (41)$$

kde l – vzdálenost stanic [m]
 s_{roz} – délka dráhy rozjezdu [m]
 s_{brz} – délka dráhy brzdění [m]
 F – tažná síla [N].

$$E_{JIZDA} = \frac{[l - (s_{roz} + s_{brz})] \cdot F}{3600} = \frac{[l - (s_{roz} + s_{brz})] \cdot (a + c \cdot v^2) \cdot m \cdot g}{3600} =$$

$$= \frac{[5000 - (569,8 + 569,8)] \cdot (1 + 0,00586 \cdot (50/3,6)^2) \cdot 72 \cdot 9,81}{3600} = 1,61 \text{ kWh} \quad (42)$$

Potřebná energie pro jízdu ze stanice 1 do stanice 2 je:

$$E_{POT} = E_{PPR} + E_{JIZDA} \quad [\text{Wh}] \quad (43)$$

kde E_{POT} – energie potřebná pro jízdu ze stanice 1 do stanice 2 [Wh]
 E_{PPR} – energie potřebná pro rozjezd [Wh]
 E_{JIZDA} – energie potřebná pro jízdu [Wh]

$$E_{POT} = E_{PPR} + E_{JIZDA} = 2,78 + 1,61 = 4,39 \text{ kWh}$$

Při rekuperaci se následně ještě část energie vrátí do zásobníku při brzdění:

$$E_{REK} = 1,73 \text{ kWh} \quad (44)$$

Celková spotřebovaná energie pro jízdu mezi stanicemi 1 a 2 je rozdíl energie potřebné a rekuperované:

$$E_{SPOT} = E_{POT} - E_{REK} = 4,39 - 1,73 = 2,66 \text{ kWh} \quad (45)$$

Toto je pro jízdu ze stanice 1 do stanice 2. Pro následnou jízdu platí ty samé závislosti. Energetická náročnost jízdy ze stanice 1 do stanice 3 bude tedy dvojnásobná, než jízda ze stanice 1 do stanice 2.

Energie potřebná pro jízdu je:

$$\begin{aligned} E_{POT2} &= E_{PPR} + E_{JIZDA} - E_{REK} + E_{PPR} + E_{JIZDA} = \\ &= 2,78 + 1,61 - 1,73 + 2,78 + 1,61 = 7,05 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (46)$$

Celková spotřebovaná energie pro jízdu je:

$$E_{SPOT2} = E_{POT2} - E_{REK} = 7,05 - 1,73 = 5,32 \text{ kWh.} \quad (47)$$

Úspora celkové spotřebované energie při rekuperačním brzdění:

$$u = \frac{E_{REK}}{E_{POT}} = \frac{1,73}{4,39} \cong 39 \% \quad (48)$$

Železniční vozidlo před jízdou ze stanice 1 do stanice 3 musí mít v zásobníku nejméně množství energie rovnající se hodnotě E_{POT2} . I když celková spotřebovaná energie na jízdu je menší, je to z toho důvodu, že část energie kinetické se na konci jízdy vrátí zase zpět do zásobníku. Během jízdy je však využita i tato energie.

Jak bylo zmíněno, při rekuperaci se zpět do zásobníku vrací kinetická energie železničního vozidla. Ta je však menší než energie, která byla při rozjezdu dodaná.

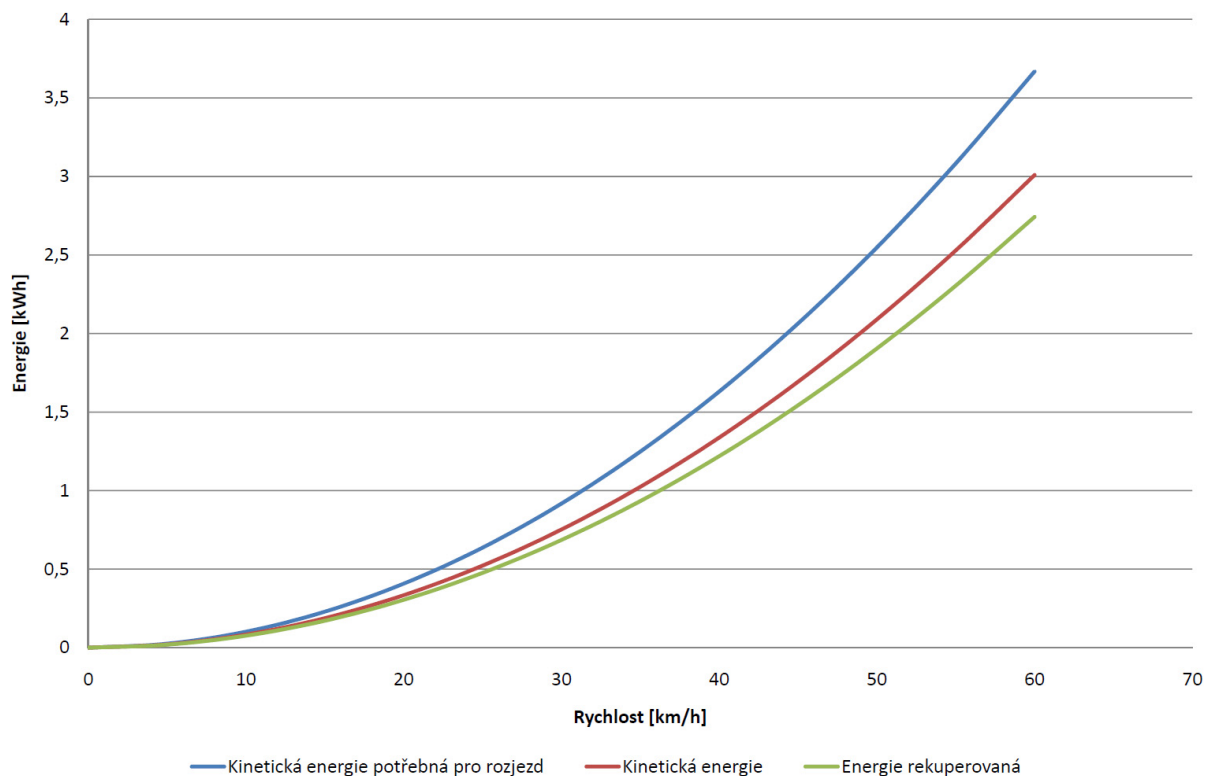
Zde jsou ještě vyjádřeny měrné hodnoty jízdy.

Gradient spotřeby energie:

$$W = \frac{E}{L} = \frac{5,32}{10} = 0,53 \text{ kWh/km} \quad (49)$$

Měrná spotřeba energie:

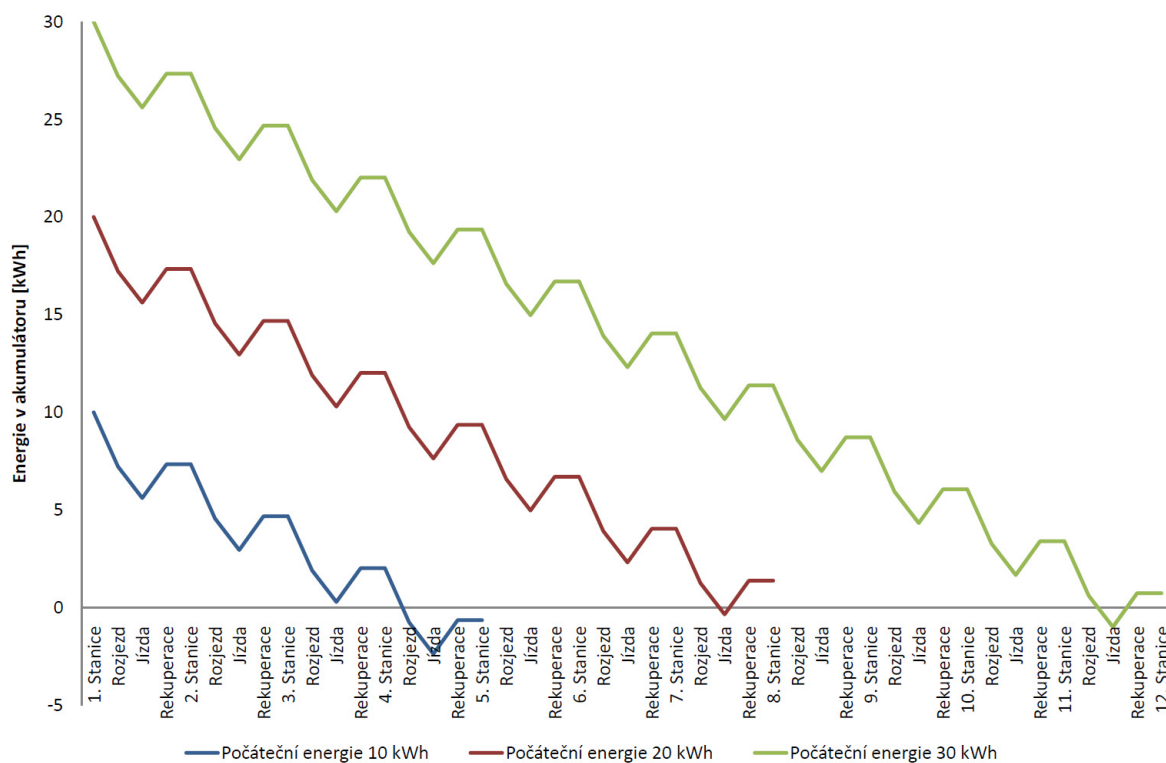
$$w = \frac{E}{L \cdot m} = \frac{5,32}{10 \cdot 72} = 7,2 \text{ Wh/tkm} \quad (50)$$



Obr. 4-5 – Kinetická energie potřebná pro rozjezd, energie kinetická a energie rekuperovaná

Mezi jednotlivými energiemi jsou rozdíly. Ty jsou způsobeny ztrátami. V Obr. 4-5 jsou tři průběhy v závislosti na rychlosti. Modrý průběh značí kinetickou energii, která je potřebná pro rozjezd železničního vozidla. Při rozjezdu se musí překonávat jízdní odpory a hradit ztráty. Červený průběh ukazuje kinetickou energii železničního vozidla. Zelený průběh značí energii, která se při rekuperaci vrátí zpět do zásobníku. Ta je menší než kinetická energie železničního vozidla o ztráty v trakčním motoru a v měniči u trakčního pohonu.

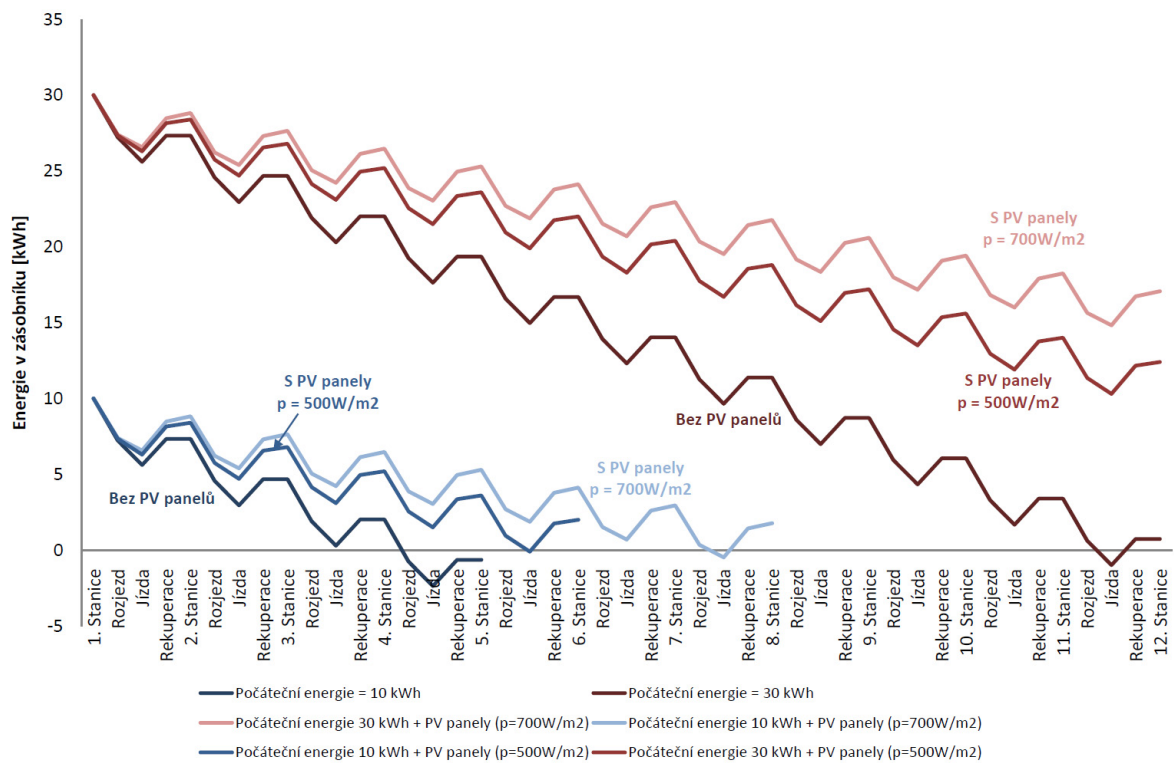
Výsledek předchozího vypočítaného příkladu je graficky vyneseno do grafu na Obr. 4-6.



Obr. 4-6 - Energie v zásobníku v závislosti na jízdě bez využití PV panelů

Modrý průběh značí množství energie v zásobníku v závislosti na místě jízdy. Je vidět, že železniční vozidlo v případě, že má v zásobníku na začátku jízdy 10 kWh, dojde až do 3. stanice. Na další jízdu už mu nezbývá energie. V případě, že má na začátku jízdy v zásobníku 20 kWh, dojde až do 7. stanice. Při 30 kWh dojde až do 11. stanice. V tomto případě se neuvažuje, že během jízdy je využívána energie z PV panelů.

Využívání energie z PV panelů je na Obr. 4-7. Modré průběhy jsou pro počáteční energii 10 kWh v zásobníku, červené průběhy jsou pro počáteční energii 30 kWh v zásobníku. Nejtmavší průběhy jsou stejné jako na obrázku Obr. 4-6. Ty jsou bez využití PV panelů, pro srovnání s dalšími dvěma. Další dva průběhy jsou závislé na velikosti intenzity dopadajícího záření. Jeden průběh je při intenzitě 500 W/m² druhý průběh je při intenzitě 700 W/m². Je vidět, že v případě vyšší intenzity dopadajícího záření je dojezd vozidla delší. To je proto, že se využívá i energie, která dopadá na železniční vozidlo v průběhu jízdy. V závislosti na intenzitě dopadající energie se prodlužuje nebo naopak zmenšuje dojezd.



Obr. 4-7 - Energie v zásobníku v závislosti na jízdě s využitím PV panelů

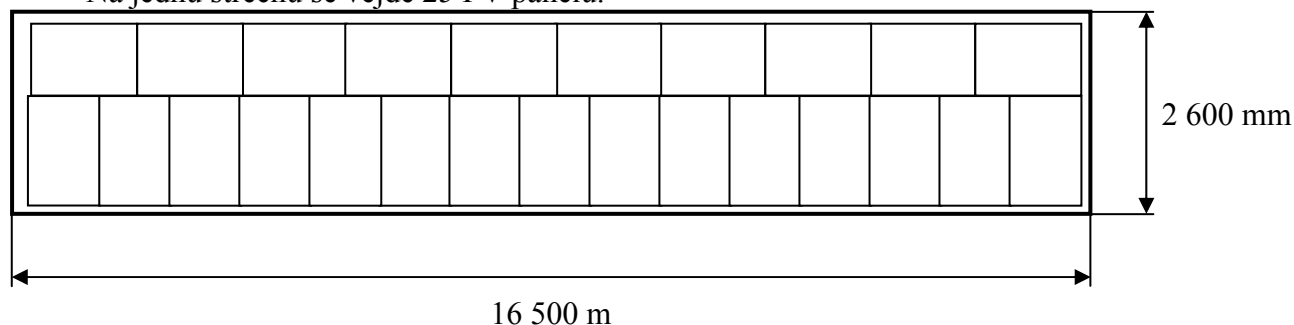
5. Uspořádání trakčního pohonu železničního vozidla s nepřímým solárním zdrojem elektrické energie

Nepřímým solárním zdrojem elektrické energie bude vybaveno vozidlo DESIRO Classic DMU. Sestava je složena ze dvou vozů. Délka jednoho vozu je 20 850 mm, šířka je 2 830 mm a výška je 3 819 mm.

Jako solární zdroj elektrické energie budou na střeše umístěny PV panely Sun Power 318 E. Jejich popis a charakteristika je v kapitole 2.

Rozměry jednoho panelu jsou 1 046 x 1 559 mm. Rozměry střechy kam lze umístit PV panely jsou 16 500 x 2 600 mm. Panely budou rozmístěny na střeše dle obrázku Obr. 5-1.

Na jednu střechu se vejde 25 PV panelů.



Obr. 5-1 - Střecha železničního vozidla a rozmístění PV panelů

Parametry jednoho PV panelu jsou:

Jmenovité napětí - $U_{mpp} = 54,7 \text{ V}$

Jmenovitý proud - $I_{mpp} = 5,82 \text{ A}$

Napětí naprázdno - $U_{oc} = 64,7 \text{ V}$

Maximální systémové napětí - $U_L = 64,7 \text{ V}$

Panely budou zapojeny do série a přes DC/DC měnič následně do ss meziobvodu. Jelikož je na jedné střeše 25 panelů, nelze je všechny zapojit do série přes jeden měnič. Zapojení by přesáhlo maximální systémové napětí.

$$U_{CELK} = n \cdot U_{mpp} = 25 \cdot 54,7 = 1\,367,5 \text{ V} > U_L = 600 \text{ V} \quad \text{- nepřípustné} \quad (51)$$

Maximální počet do série zapojených panelů může být:

$$n \leq \frac{U_L}{U_{OC}} = \frac{600}{64,7} = 9,27 \quad (52)$$

V jedné sérii může být tedy zapojeno maximální 9 PV panelů. Jelikož je na střeše jednoho vozidla panelů 25, zbylo by po zapojení 9 a 9 PV panelů ještě 7 PV panelů. Proto nebudou panely zapojeny takto, ale budou zapojeny do sérií tak, aby měla všechna zapojení stejné parametry. Bude tedy vytvořeno 5 sérií po 5 PV panelech.

Výstupní jmenovité napětí jedné série bude:

$$U_{SER} = n \cdot U_{mpp} = 5 \cdot 54,7 = 273,5 \text{ V} \quad (53)$$

Výstupní jmenovitý proud, jelikož jsou všechny zapojeny v sérii, bude odpovídat jmenovitému proudu jednoho PV panelu:

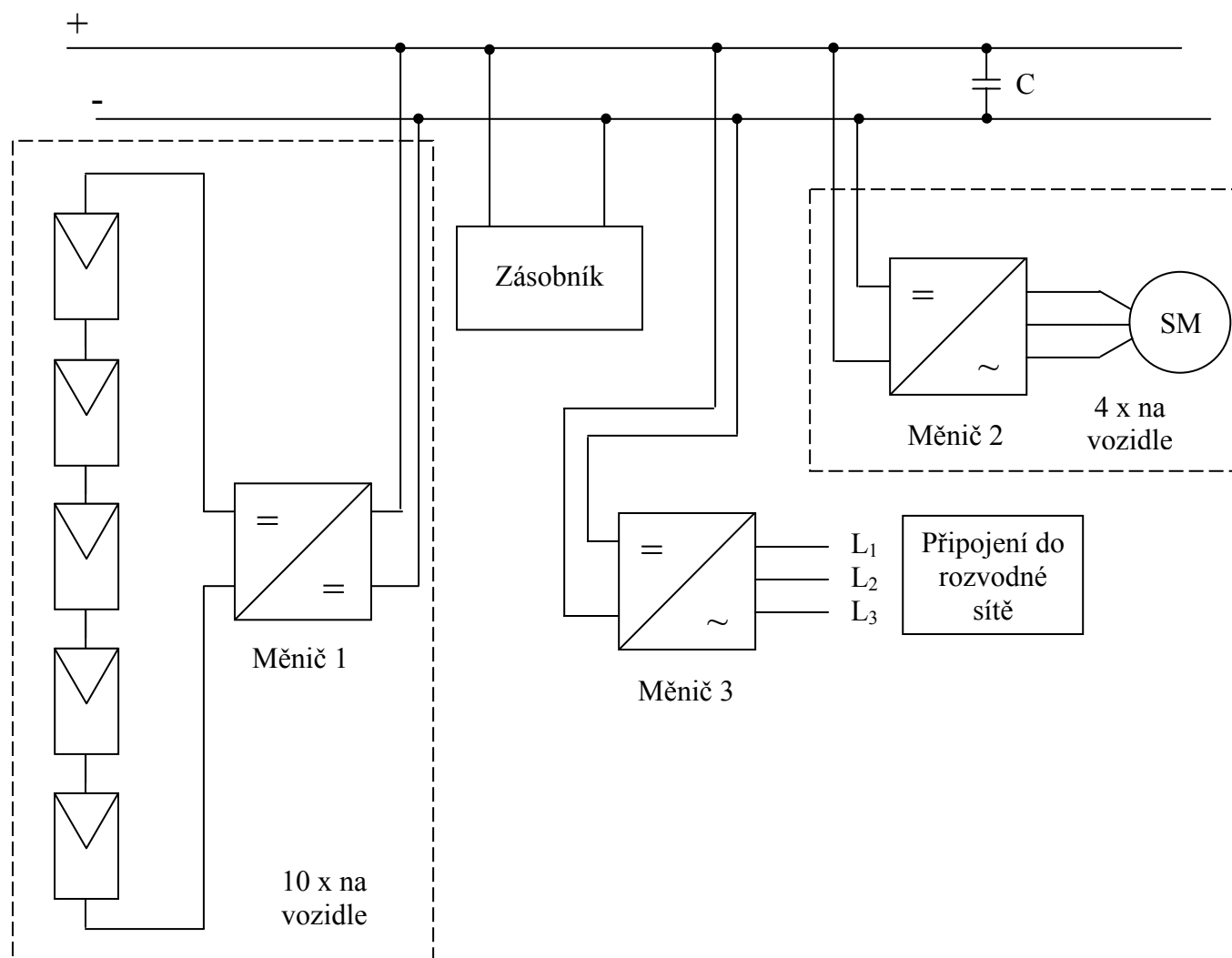
$$I_{SER} = I_{mpp} = 5,82 \text{ A} \quad (54)$$

Celkový výkon jedné série tedy bude:

$$P_{CELK} = U_{SER} \cdot I_{SER} = 273,5 \cdot 5,82 \approx 1\,592 \text{ W} \quad (55)$$

5.1. Blokové schéma železničního vozidla

Na Obr. 5-2 je blokové schéma zapojení elektrických zařízení v železničním vozidle.



Obr. 5-2 - Blokové schéma železničního vozidla

V jednom železničním voze je do ss meziobvodu zapojeno pět sériových spojení PV panelů. Do ss meziobvodu je dále zapojen zásobník energie (ten je umístěn jen v jednom voze), dva synchronní motory s permanentními magnety s měniči a ještě je zde připojeno vnější napájení z rozvodné sítě přes měnič. Ve ss meziobvodu je připojen kondenzátor pro vyrovnávání proudových špiček.

Měnič 1 je DC/DC měnič. Velikost vstupního napětí se mění od 0 V do 273,5 V. Velikost výstupní napětí je řízena měničem v závislosti na nabití akumulátoru. Při nabíjení použitého akumulátoru se totiž musí řídit velikost napětí. Měnič je tedy jednokvadrantový, zvyšující DC/DC měnič. Napětí meziobvodu, které je dáno velikostí napětí zásobníku musí být vždy vyšší než napětí sériově zapojených PV panelů.

Jako trakční motory jsou použity synchronní motory s permanentními magnety (PMSM). Výhod tohoto motoru oproti asynchronnímu motoru je několik. Při stejném výkonu a otáčkách je PMSM až dvakrát menší a lehčí než již zmíněný asynchronní motor. PMSM je svou velikostí vhodný pro bezpřevodkové pohony. Při volbě mezi pomaluběžným a rychloběžným PMSM motorem musí být zváženy výhody a nevýhody jednotlivých motorů.

Výhodou u pomaluběžného je absence převodovky, nevýhodou však jsou větší rozměry a menší účinnost.

Zatím co u rychloběžného musí být převodovka použita, má však jiné výhody a to menší rozměry a vyšší účinnost.

Účinnost pomaluběžného motoru je přibližně 92 %.

Účinnost rychloběžného motoru je přibližně 95 % a účinnost převodovky je asi 98 %.

Celková účinnost soustrojí se tedy pohybuje okolo:

$$\eta_{Soustr} = \eta_{PMSM} \cdot \eta_i \cdot 100 = 0,95 \cdot 0,98 \cdot 100 \cong 93 \quad \% \quad (56)$$

kde η_{Soustr} – celková účinnost soustrojí [-]

η_{PMSM} – účinnost PMSM motoru [-]

η_i – účinnost převodovky [-]

Použit bude synchronní motor pomaluběžný. Velkou výhodou je, že není zapotřebí převodovka. Je to hlavně z toho důvodu, že celková konstrukce bez převodovky je jednodušší a odpadá kontrola a údržba převodovky. Další velkou výhodou je absence kontroly a výměny oleje v převodovce.

V každém voze budou použity motory dva. Na každém hnaném dvojkolí je umístěn jeden trakční motor. Každý trakční motor má svůj měnič.

Měnič 2 je DC/AC měnič neboli střídač. Ten slouží k napájení trakčního synchronního motoru. PMSM je nutné napájet z třífázového můstkového střídače IGBT s napětovým výstupem. Výstupní napětí je řízeno šířkově pulzní modulací. V případě lineární regulace musí být k řízení měniče ještě přidána další logika, která bude řídit výstupní napětí v závislosti na požadovaném momentu.

Při brzdění pracuje PMSM jako generátor. Energie z trakčního motoru se tedy bude ukládat do zásobníku energie. Z toho vyplývá, že měnič musí být schopen přenést energii i ze strany PMSM do zásobníku. Stejně jako měnič 1 musí být velikost výstupního stejnosměrného napětí řízeno v závislosti na nabití akumulátoru. PMSM generuje třífázové sinusové napětí a proud. Na výstupní straně je napětí a proud stejnosměrný.

Měnič 2 je tedy obousměrný, dvoukvadrantový, snižovací střídač DC/AC a zvyšující usměrňovač AC/DC měnič.

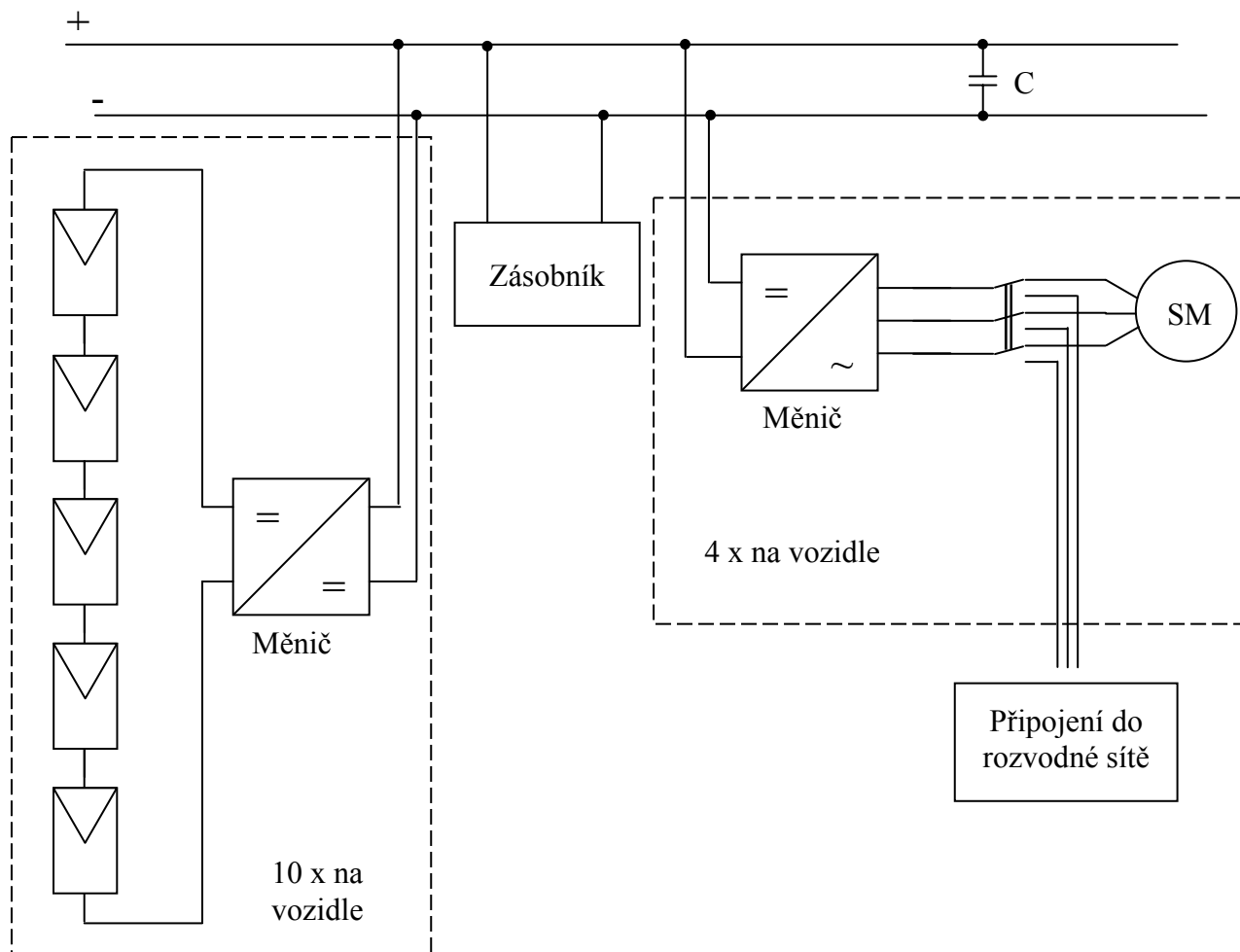
Měnič 3 je pro nabíjení akumulátoru v případě, že PV panely nedodávají dostatečné množství energie. Nabíjení probíhá z elektrické rozvodné sítě. Na vstupu měniče je třífázové střídavé napětí 400 V. Měnič je tedy zvyšující usměrňovač AC/DC. To znamená, že ss meziobvod musí mít vyšší napětí než usměrněné třífázové napětí.

$$U_{usm} = U_{3f} \cdot \sqrt{2} = 400 \cdot \sqrt{2} \cong 566 \quad \text{V} \quad (57)$$

kde U_{usm} – usměrněné napětí [V]

U_{3f} – střídavé 3fázové napětí (efektivní hodnota) [V]

Tuto funkci již zajišťuje měnič 2, který je umístěn u PMSM. Trakční motor je ve fázi provozu pouze při jízdě. Při stání ve stanici v provozu není. V provozu tedy není ani měnič 2. Proto ho můžeme využít pro napájení z elektrické rozvodné sítě. Takto upravené blokové schéma je na Obr. 5-3.



Obr. 5-3 - Upravené blokové schéma železničního vozidla

Třífázový přepínač nemusí být výkonový, jelikož k přepínání nedochází pod výkonem. K výkonovému odpojení dochází v měniči 2 pomocí polovodičových prvků.

Volba napětí ss meziobvodu

a) podmínka měniče 1

napětí musí být větší než maximální napětí PV panelů

$$U_{ss} > 273,5 \text{ V}$$

(58)

b) podmínka měniče 2

napětí musí být větší než usměrněné 3fázové napětí

$$U_{ss} > 566 \text{ V}$$

(59)

Volba velikosti napětí ve ss meziobvodu:

Velikost napětí ve ss meziobvodu musí být vyšší než 566 V. Aby byl tento požadavek zajištěn, bude velikost napětí ve ss meziobvodu ještě o něco vyšší. Napětí ve ss meziobvodu je voleno 750 V.

Z velikosti napětí ss meziobvodu se bude vycházet při návrhu akumulátoru. Aby byla zajištěna potřebná velikost napětí, musí být do série spojeno dostatečné množství akumulátorových článků. Použit bude typ TS-LYP400AHA. Zde je vysvětleno, proč je volen tento typ akumulátoru.

Počet použitých akumulátorů:

$$n = \frac{U_{ss}}{U_{AkNom}} = \frac{750}{3,2} = 234,4$$

(60)

kde U_{ss} – napětí ss meziobvodu [V]

U_{AkNom} – nominální napětí akumulátoru [V]

Z tohoto výpočtu je patrné, že se musí použít 235 článků. Minimální napětí ss meziobvodu je pak:

$$U_{Min} = U_{AkMin} \cdot n = 2,8 \cdot 235 = 658 \text{ V} \quad (61)$$

kde U_{AkMin} – napětí vybitého akumulátoru [V].

Je tedy ještě zajištěna rezerva mezi nejmenším dovoleným napětím ss meziobvodu a nejvyšším možným napětím do měniče 2. Rezerva je přibližně 100 V.

Při výpočtu energetické náročnosti je uvažováno s celkovým výkonem trakčních motorů 150 kW. Při napětí akumulátoru 750 V by musel dodávat proud:

$$I = \frac{P}{U_{AkNom} \cdot n} = \frac{150000}{750} = 200 \text{ A} \quad (62)$$

Při kapacitě akumulátoru 400 Ah je to proud odpovídající hodnotě 0,5C. Což je standardní nabíjecí i vybíjecí proud použitého akumulátoru. Tím je splněna i tato podmínka.

Celková kapacita akumulátoru je pak

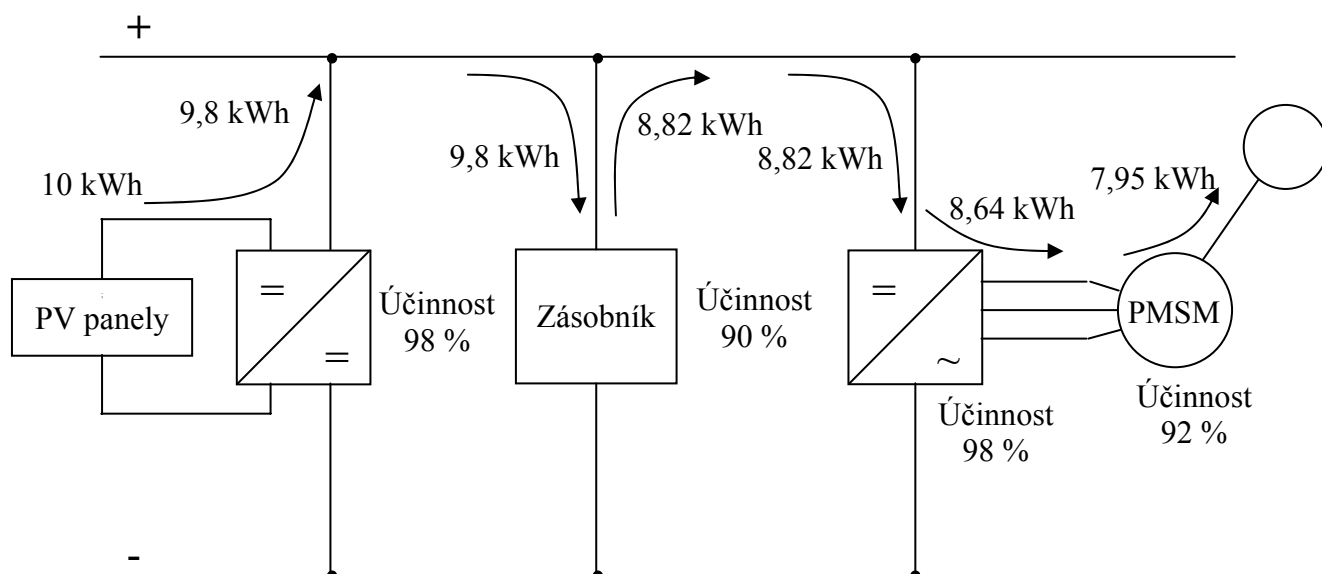
$$E_{AKU} = U_{AkMin} \cdot n \cdot C = 2,8 \cdot 235 \cdot 400 = 263,2 \text{ kWh} \quad (63)$$

kde C – jmenovitá kapacita jednoho akumulátoru [Ah]

5.2. Toky energií mezi jednotlivými elektrickými částmi

Dále jsou popsány toky energií mezi jednotlivými částmi elektrického blokového schéma.

5.2.1. Jízda – nepřímé napájení



Obr. 5-4 - Tok energie při napájení z PV panelů s využitím zásobníku

Na Obr. 5-4 je tok energie z PV panelů do zásobníku a následně do trakčního motoru. Účinnosti měničů jsou stejné a to 98 %. Účinnost zásobníku je přibližně 90 %. Jde o účinnost závislou na uchování a následném vydání energie zpět:

$$\int i_{vyst} \cdot u_{vyst} \cdot dt = \eta \cdot \int i_{vst} \cdot u_{vst} \cdot dt \quad (64)$$

kde i_{vst} – vstupní proud do zásobníku [A]
 i_{vyst} – výstupní proud ze zásobníku [A]
 u_{vst} – vstupní napětí do zásobníku [V]
 u_{vyst} – výstupní napětí ze zásobníku [V]

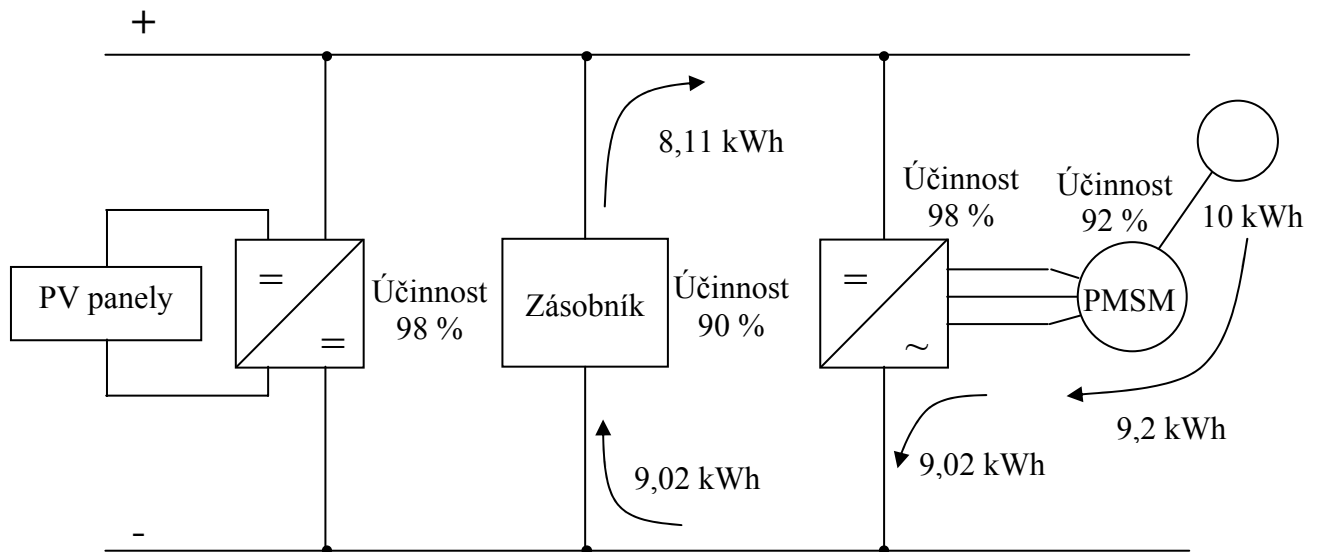
$$\eta = \frac{\int i_{vyst} \cdot u_{vyst} \cdot dt}{\int i_{vst} \cdot u_{vst} \cdot dt} \approx 90 \% \quad (65)$$

Účinnost synchronního motoru s permanentními magnety je asi 92 %. Účinnost přenosu energie z trakčního motoru na dvojkolí je 100 %. To je dosaženo tím, že rotor je s dvojkolím spojen napevno. Není použito žádné převodovky.

Pro lepší názornost je energie přenášená z PV panelů do motoru zvolena 10 kWh. Po průchodu energie celým obvodem se na dvojkolí dostane pouze 7,95 kWh. Zbylá energie se přemění na ztráty.

Stejná úvaha, i když při jiném ději, je na Obr. 5-5.

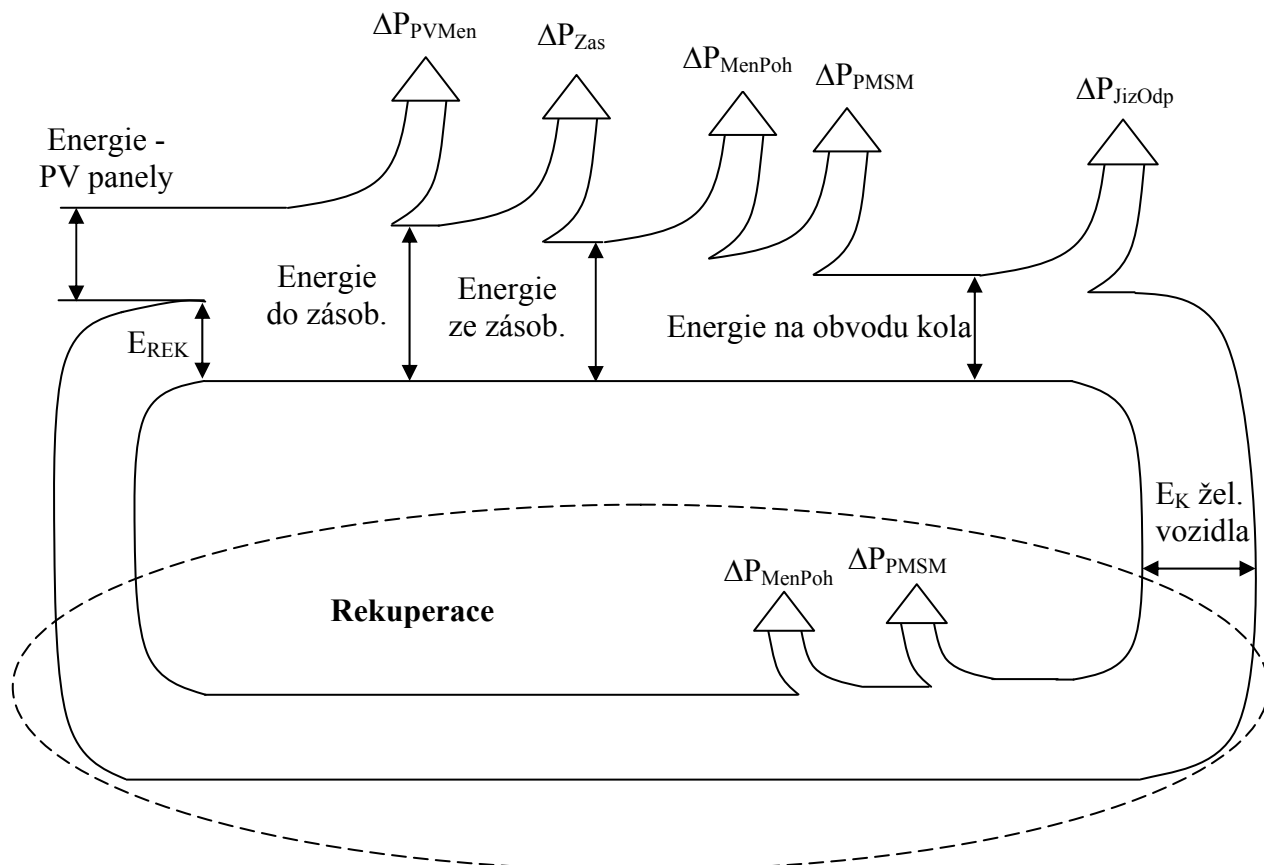
5.2.2. Brzda s rekuperací



Obr. 5-5 - Tok energie při rekuperaci

Při rekuperačním brzdění je z dvojkolí odváděna energie 10 kWh. Ta jde přes trakční motor a přes měnič do akumulátoru. V závislosti na všech účinnostech je potom výstupní energie akumulátoru zmenšena o všechny ztráty. Její velikost je přibližně 8,11 kWh.

Ze zákona zachování energie lze vyjít při vytvoření Sankeyho diagramu toku energie na Obr. 5-6.



Obr. 5-6 - Sankeyho diagram koloběhu energie

Popisky obrázku:

ΔP_{PVMen} – ztráty v měničích u PV panelů

ΔP_{Zas} – ztráty v zásobníku

ΔP_{MenPoh} – ztráty v měniči u trakčního motoru

ΔP_{PMSM} – ztráty v trakčním motoru

ΔP_{JizOdp} – ztráty způsobené jízdními odpory

E_K žel. vozidla – kinetická energie železničního vozidla

Na vstupu Sankeyho diagramu je energie z PV panelů. Ta je zmenšena o ztráty v měničích u PV panelů. Tato energie je následně ukládána do zásobníku. Energie na výstupu ze zásobníku je zmenšena o ztráty způsobené akumulováním energie v akumulátoru.

Energie z akumulátoru jde následně přes měnič trakčního pohonu do trakčního motoru. V něm se část energie přemění na teplo. Výsledná energie je přiváděna přímo na dvojkolí.

Z této energie je část odebírána na překonávání jízdních odporů. Zbytek energie je již kinetickou energií železničního vozidla. Kinetická energie železničního vozidla je v obrázku označena jako E_K žel. vozidla.

Při rekuperačním brzdění se kinetická energie zase vrací zpátky do akumulátoru. Tato energie je ale stejně jako při jízdě zmenšena o ztráty v trakčním motoru a o ztráty v měniči trakčního motoru. Při rekuperaci jde energie opačným směrem do akumulátoru. V obrázku je energie vracená do zásobníku označena jako E_{REK} .

6. Projekční studie železničního vozidla s nepřímým solárním zdrojem elektrické energie

V této části jsou shrnuty vlastnosti a parametry železničního vozidla.

6.1. Parametry železničního vozidla DESIRO Classic DMU

V Tabulka 13 jsou rozměry železničního vozidla. V Tabulka 14 jsou popsány další parametry vozidla.

Tabulka 13 - Rozměry jednoho vozu [25]

Rozměry jednoho vozu	
Obrys vozidla	UIC 505-1
Délka	20 850 mm
Výška	3 819 mm
Šířka	2 830 mm
Délka střechy	16 500 mm
Šířka střechy	2 830 mm
Rozchod	1 435 mm

Tabulka 14 - Parametry vozidla [25]

Další parametry vozidla	
Výrobní řada vozidla	DESIRO Classic DMU
Hmotnost prázdného vozidla	68 t
Maximální uvažovaná rychlost	50 km/h
Uspořádání dvojkolí	B'(2)B'
Počet sedadel 1. třída	12
Počet sedadel 2. třída	111
Míst k stání	90
Trakční výkon	4 x 37,5 kW
Maximální zrychlení	0,6 m/s ²
Celková délka přes nárazníky	41 700 mm
Maximální tažná síla	141 kN

Železniční vozidlo má čtyři poháněná dvojkolí. Na každém dvojkolí je umístěn jeden trakční motor. Trakční motor je pomaluběžný synchronní motor s permanentními magnety. Motor je přímo umístěn na dvojkolí. Není zde použita převodovka. Konstrukce je díky tomu jednodušší, odpadá kontrola a údržba převodovky a odpadá potřeba kontroly a výměny oleje v převodovce.

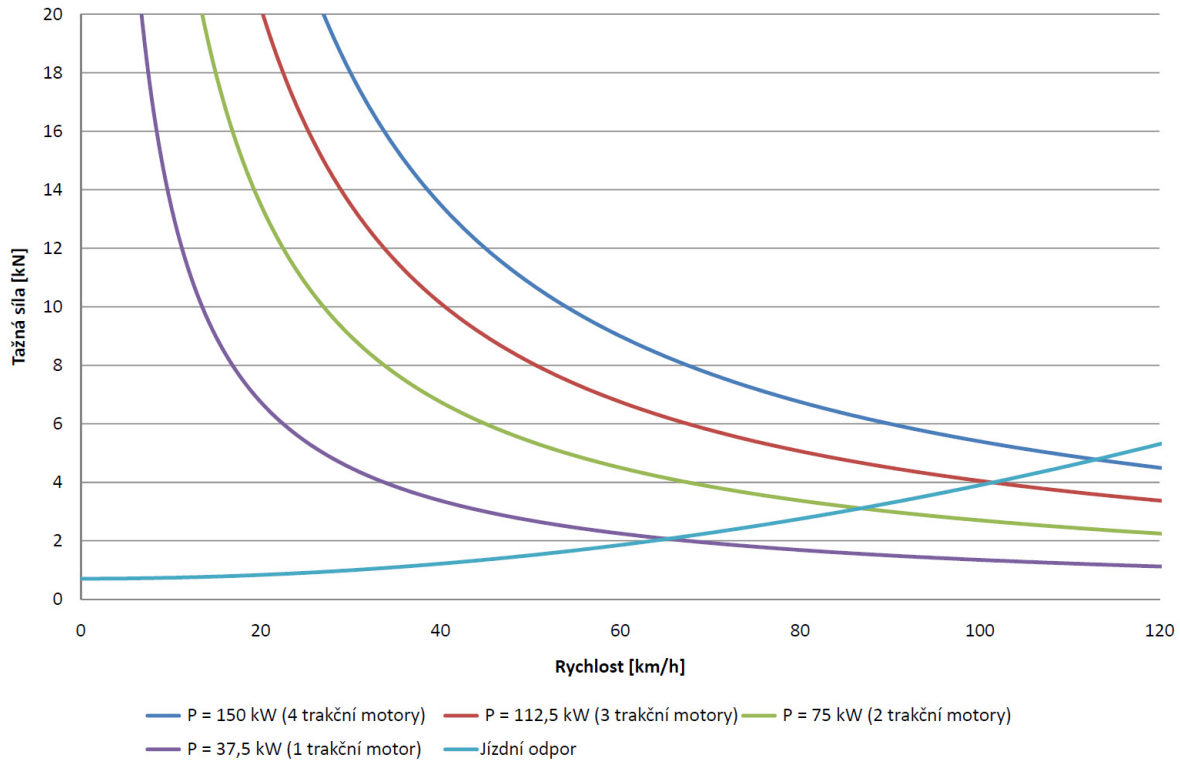
Každý trakční motor má výkon 37,5 kW. Celkový výkon je tedy 150 kW. Tento výkon je uvažován při rozjezdu a brzdění železničního vozidla. Motory však mohou být v případě nouze částečně přetíženy.

Mezi oběma vozy je umístěn Jakobův podvozek. Ten hnaný není. Hnané jsou tedy 4 dvojkolí z celkových 6 dvojkolí.

Na střeše jednoho vozu je umístěno 25 PV panelů SPR-318E-WHT-D. Dohromady je tedy použito na vozidle 50 PV panelů. PV panely jsou zapojeny v sériích po 5 PV panelech a přes měnič následně připojeny do stejnosměrného meziobvodu.

Napětí ss meziobvodu je určováno napětím zásobníku. Zásobník je tvořen sériově spojenými TS – LYP400AHA akumulátory. Jsou to Li-Ion akumulátory typu LiFeYPO₄. Je použito 235 článků. Nominální napětí zásobníku je 750 V, v případě vybití je nejmenší napětí zásobníku 658 V. Celková kapacita zásobníku je 263,2 kWh.

Na Obr. 6-1 je trakční charakteristika železničního vozidla.



Obr. 6-1 - Trakční charakteristika

V grafu jsou čtyři trakční charakteristiky, v závislosti na počtu využitých trakčních motorů. V trakční charakteristice je také průběh jízdního odporu železničního vozidla. Při menším výkonu trakčních motorů bude při rozjezdu menší zrychlení, ale maximální rychlost je u všech čtyř možných výkonových bilancí vyšší než 50 km/h.

Tabulka 15 - Množství dopadající energie a počet ujetých stanic – ideální den bez mraků

Den v roce	Energie za den na plochu 1 m ² [kWh]	Energie za den na plochu PV panelů [kWh]	Energie uložená v zásobníku [kWh]	Počet ujetých stanic bez rekuperace	Počet ujetých stanic s rekuperací
15. leden	1,18	96,21	16,55	3	6
15. únor	2,17	177,10	30,46	6	11
15. březen	3,91	318,64	54,80	12	20
15. duben	6,69	545,15	93,76	21	35
15. květen	8,01	652,94	112,30	25	42
15. červen	8,35	681,07	117,14	26	44
15. červenec	8,01	652,94	112,30	25	42
15. srpen	6,69	545,15	93,76	21	35
15. září	3,91	318,64	54,80	12	20
15. říjen	2,17	177,10	30,46	6	11
15. listopad	1,18	96,21	16,55	3	6
15. prosinec	0,96	78,11	13,43	3	5

V Tabulka 15 je volen vždy 15. den v měsíci. Ve sloupci Energie za den na plochu 1 m² je množství energie, které dopadne na plochu 1 m² za tento den. V dalším sloupci je energie, která dopadne na plochu, která je stejně velká jako plocha PV panelů, které jsou umístěny na střeše železničního vozidla.

Plocha PV panelů je:

$$S_{50PV} = S_{PV} \cdot n = 1,63 \cdot 50 \approx 81,5 \text{ m}^2 \quad (66)$$

kde S_{50PV} – plocha 50 PV panelů [m²]
 S_{PV} – plocha jednoho PV panelu [m²]
 n – počet PV panelů [-]

Ve čtvrtém sloupci je energie, která je uchována v zásobníku energie, ta je závislá na účinnosti PV panelů, účinnosti měniče a účinnosti zásobníku. Všechny tyto hodnoty jsou pro ideální dny, kdy není na obloze jediný mrak, který by zastínil PV panely na střeše železničního vozidla. To je ale velmi zidealizováno. Hlavně v podzimních, zimních a jarních měsících se toto nestává.

V posledních dvou sloupcích je počet stanic, které by železniční vozidlo bylo schopno ujet za jeden den, v případě že by bylo v zásobníku akumulováno množství energie vyznačené ve čtvrtém sloupci.

Z posledních dvou sloupců je patrné, jak velký vliv na celkovou spotřebu energie má rekuperační brzdění. Při rekuperačním brzdění je dojezd vozidla mnohem větší. Z hodnot vyplývá, že se dojezd zvětší skoro o dvě třetiny.

Také je zřejmé, že v zimních měsících není napájení z PV panelů příliš vhodné. Dojezd vozidla je malý. V letních měsících je ale dojezd železničního vozidla značně větší.

Je to však jen předpoklad závislý na jasném počasí.

Závěr

Železniční vozidlo je vybaveno fotovoltaickými panely, kterými je ve stanici napájen zásobník. Za jízdy jsou z PV panelů napájeny trakční motory. Ty jsou za jízdy napájeny i ze zásobníku. Zásobník vozidlu dává mnohem lepší vlastnosti z hlediska jízdy jako je maximální rychlost a dojezd. Navíc může být zásobník napájen ve stanici v případě nedostatečného výkonu PV panelů (vlivem počasí) z rozvodné sítě.

Jelikož jsou PV panely zapojeny v jednotlivých sériích a přes měniče je přenášena energie do zásobníku, je v každém okamžiku využívána veškerá energie, kterou jsou panely schopny dodávat.

Zásobník je tvořen LiFeYPO₄ akumulátory spojenými do série. Tyto akumulátory mají v případě šetrného zacházení (při hloubce vybití do 70 %) dlouhou životnost, až několik tisíc cyklů. Při porovnání vlastností jednotlivých akumulátorů vycházejí jako nejhodnější. Vzhledem k počtu cyklů by byl vhodnější superkapacitor, ale ten nemohl být použit, protože aby pojal stejné množství energie jako použitý akumulátor, musel by mít hmotnost několik desítek tun.

Při výpočtu energetické náročnosti bylo vypočítáno, že pro překonání dráhy ze stanice 1 do stanice 2 je zapotřebí energie asi 4,39 kWh. Avšak spotřebovaná energie na ujetí této dráhy je přibližně 2,66 kWh. To je zapříčiněno tím, že je využíváno rekuperačního brzdění. Úspora celkové elektrické energie díky rekuperaci je asi 39 %.

Železniční vozidlo je vybaveno čtyřmi trakčními motory o celkovém výkonu 150 kW. Trakční motory jsou synchronní motory s permanentními magnety. Jsou konstruovány jako pomaluběžné. Odpadá tedy nutnost převodovky mezi trakčním motorem a dvojkolím.

Železniční vozidlo je složeno ze dvou vozů. Na konci každého vozu jsou dvě hnaná dvojkolía. Uprostřed vozů je Jakobito podvozek. Vozidlo má tedy celkem šest dvojkolía, z toho jsou čtyři hnaná.

Vozidlo by bylo vhodné využívat na tratích do vzdálenosti několika desítek kilometrů při malém počtu opakovacích cyklů. V případě většího počtu opakovacích cyklů se musí zkrátit délka tratě.

Dále by bylo vodné vozidlo využívat hlavně v oblastech blízkých rovníku, kvůli větší intenzitě dopadajícího záření.

Používání vozidla v České republice by bylo vhodné patrně jen v letních měsících.

Největším nedostatkem železničního vozidla napájeného z fotovoltaických panelů je zatím stále malá účinnost PV panelů. Ve chvíli, kdy by účinnost panelů rapidně stoupla, by se mohlo uvažovat o jejich použití, jako jediném zdroji energie pro železniční vozidlo.

V této době se však tato technologie jeví spíše jako doplňkový zdroj elektrické energie.

Použitá literatura

- [1] HORÁK, Zdeněk; KRUPKA, František. *Fyzika : příručka pro vysoké školy technického směru*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1981. 1129 s. ISBN 04-017-81
- [2] ŠAVEN, Josef. *Elektrotechnologie : materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. Praha: BEN- technická literatura, 2004. 299 s. ISBN 80-7300-154-3.
- [3] LIBRA, Martin; POULEK, Vladislav. *Fotovoltaika : teorie i praxe využití solární energie*. Praha: Ilsa, 2010. 165 s. ISBN 978-80-904311-5-7.
- [4] MURTINGER, Karel; BERANOVSKÝ, Jiří; TOMEŠ, Milan. *Fotovoltaika : elektřina ze slunce*. Praha: EkoWATT, 2008. 81 s. ISBN 978-80-7366-133-5.
- [5] *JRC European commission* [online]. 2008 [cit. 2011-05-16]. Solar radiation maps European countries. Dostupné z WWW: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmaps/eur.htm>>
- [6] *Meteonorm* [online]. [cit. 2011-05-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.meteonorm.com/pages/en/downloads/maps.php>>
- [7] LIBRA, Martin; POULEK, Vladislav. Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny solární energie. *Odborné časopisy* [online]. 2005, 1, [cit. 2011-02-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/sv010532.pdf>>
- [8] *Fyzikální ústav AV* [online]. 2009 [cit. 2011-02-27]. Přeměna sluneční energie v energii elektrickou. Dostupné z WWW: <<http://www.fzu.cz/popularizace/premena-slunecni-energie-v-energii-elektrickou>>.
- [9] LIBRA, Martin; POULEK, Vladislav. Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů. *Odborné časopisy* [online]. 2010, 3, [cit. 2011-02-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40646.pdf>>
- [10] *NREL* [online]. 2010 [cit. 2011-02-28]. National Renewable Energy Laboratory. Dostupné z WWW: <<http://www.nrel.gov/>>.
- [11] *Posharp* [online]. 2011 [cit. 2011-03-05]. SPR 318E WHT D. Dostupné z WWW: <http://www.posharp.com/spr-318e-wht-d-solar-panel-from-sunpower_p1460953191d.aspx>.
- [12] *Battery University* [online]. 2004 [cit. 2011-03-11]. Dostupné z WWW: <<http://batteryuniversity.com/>>.
- [13] *Cetra* [online]. 2008 [cit. 2011-03-11]. Jak na baterie NiCd a NiMH. Dostupné z WWW: <<http://www.cetra.cz/vysilacky-radiostanice/MOTOROLA/Baterie-NiCd,-NiMH-.../Jak-na-baterie/20>>.
- [14] *Battex* [online]. 2010 [cit. 2011-03-11]. Abeceda baterií a akumulátorů. Dostupné z WWW: <<http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nicd-akumulatory/zakladni-charakteristiky>>.
- [15] *Bateria* [online]. 2008 [cit. 2011-03-11]. Niklmetalhydridový akumulátor. Dostupné z WWW: <<http://www.bateria.cz/stranky3/zabava--pouceni/jak-to-funguje-/niklmetalhydridovy-akumulator-nimh.htm>>.
- [16] *Belza* [online]. 2001 [cit. 2011-03-11]. Akumulátory Li-Ion a jejich nabíjení. Dostupné z WWW: <<http://www.belza.cz/charge/liion1.htm>>.

- [17] *Cetra* [online]. 2008 [cit. 2011-03-11]. Lithiové akumulátory. Dostupné z WWW: <<http://www.cetra.cz/vysilacky-radiostanice/MOTOROLA/Informace-o-radiostanicich-vysilackach/Co-s-Li-Ion-clanky/22>>.
- [18] MAŠEK, Zdeněk. GREGORA, Stanislav. MICHL, Jan. DVOŘÁK, Karel. Superkapacitory v dopravní technice. *Vědeckotechnický sborník ČD* [online]. Duben 2008, č. 25/2008, [cit. 2011-03-11]. Dostupný z WWW: <http://www.cdmail.cz/VTS/CLANKY/vts25/2511.pdf>
- [19] Superkapacitory MAXWELL. [cit. 2011-03-12]. Dostupný z WWW: <http://www.ecom.cz/katalog_pdf/maxwell.pdf>
- [20] *Everspring* [online]. [cit. 2011-03-12]. LYP-400AHA. Dostupné z WWW: <<http://www.everspring.net/product-battery-LYP400AHA.htm> >.
- [21] *Motorová jednotka DESIRO Classic DMU*. Praha : Siemens s.r.o., 4 s.
- [22] *Webak.Upce* [online]. 2005 [cit. 2010-11-20]. Základy dopravní techniky. Dostupné z WWW: http://webak.upce.cz/~lata/ZDT_e-learning/ZDT_kap_4.htm
- [23] DAŠEK, Petr. *Analýza dopadajícího slunečního záření a jízdních odporů pro využití fotovoltaických článků u železničních vozidel - nepřímý pohon*. Pardubice, 2011. 31 s. Ročníkový projekt II. Univerzita Pardubice
- [24] PLOCEK, Ondřej. *Akumulátory vhodné pro trakční účely*. Pardubice, 2009. 55 s. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [25] Firemní dokumenty. Siemens s.r.o.

Seznam obrázků

Obr. 1-1 - Průběh výkonu v závislosti na čase	11
Obr. 1-2 – Množství dopadající energie na území ČR za jeden rok [5].....	12
Obr. 1-3 – Množství dopadající energie na území Evropy za jeden rok [6]	13
Obr. 1-4 – Množství dopadající energie na území celého světa za jeden rok [6]	13
Obr. 1-5 – Množství dopadající energie v průběhu jednoho roku na 50. rovnoběžce na podložku rovnoběžnou se zemí – v ideálním případě bez mraků na obloze.....	14
Obr. 1-6 - Intenzita záření v průběhu celého dne - libovolné dny v roce, na 50. rovnoběžce, na podložku rovnoběžnou se zemí, v ideální den bez mraků.....	14
Obr. 1-7 - Reálný průběh dopadajícího záření na podložku rovnoběžnou se zemí na 50. rovnoběžce v den 15.6. – s uvažovaným vlivem mraků	15
Obr. 1-8 - Závislost doby akumulace na intenzitě dopadajícího záření na podložku rovnoběžnou se zemí na 50. rovnoběžce v den 15.6 v ideální den bez mraků.....	17
Obr. 2-1 - Model elektronů a děr - vlastní polovodič [7].....	20
Obr. 2-2 - Model elektronů a děr - polovodič typu N [7].....	21
Obr. 2-3 - Model - přechod PN [7].....	22
Obr. 2-4 - Model fotovoltaiické přeměny energie [7].....	24
Obr. 2-5 - Závislost napětí PV panelu na intenzitě záření [7].....	25
Obr. 2-6 - Spektrum slunečního záření [8].....	25
Obr. 2-7 - VA charakteristika PV článku - optimální pracovní bod - při teplotě 50°C	26
Obr. 2-8 - VA charakteristika – závislost výstupního výkonu na teplotě [3].....	27
Obr. 2-9 - Jednoduchý PV článek a článek s vysokou účinností [9].....	29
Obr. 2-10 - Řez PV panelem [9]	30
Obr. 2-11 - Účinnost PV článků různých technologií [10]	32
Obr. 2-12 - SPR-318E-WHT-D - Vzhled PV panelu [11]	33
Obr. 2-13 - SPR-318E-WHT-D - VA charakteristika - závislost výkonu na intenzitě dopadající energie	34
Obr. 2-14 - SPR-318E-WHT-D - Technické provedení a rozměry PV panelu [11].....	35
Obr. 2-15 - Schematická značka PV panelu.....	36
Obr. 2-16 - Zapojení PV článků v PV panelu	37
Obr. 2-17 - PV panel s vlastním měničem	38
Obr. 2-18 - Sériové řazení PV panelů	39
Obr. 2-19 - VA charakteristika při celém a částečném ozáření PV panelu a součet napětí obou PV panelů při sériovém spojení	39
Obr. 2-20 - Paralelní zapojení PV panelů bez diod.....	40
Obr. 2-21 - VA charakteristika při celém a částečném ozáření panelů - paralelní spojení bez diod.....	41
Obr. 2-22 - VA charakteristika při celém ozáření panelu a při velkém zakrytí panelu - paralelní spojení bez diod.....	41
Obr. 2-23 - Paralelní zapojení PV panelů s diodami.....	42
Obr. 2-24 - VA charakteristika při celém a částečném ozáření panelu - paralelní spojení s diodami.....	42
Obr. 2-25 - Sérioparalelní zapojení PV panelů bez diod.....	43
Obr. 2-26 - Sérioparalelní zapojení PV panelů s diodami.....	44
Obr. 2-27 - Sériové spojení přes měniče	45
Obr. 2-28 - Napěťové hladiny sériově spojených PV panelů a ss meziobvodu.....	46
Obr. 3-1- Přehled akumulátorů elektrické energie [12]	47
Obr. 3-2 - Řez NiCd akumulátorem [13]	48
Obr. 3-3 - Vybíjecí křivky NiCd akumulátoru [14]	49

Obr. 3-4 - Řez NiMH akumulátorem [15].....	49
Obr. 3-5 - Vybíjecí charakteristika Li-Ion akumulátorů [16].....	50
Obr. 3-6 - Řez Li-Ion akumulátorem [17].....	51
Obr. 3-7 - Křivky nabíjení Li-Ion akumulátoru [16].....	51
Obr. 3-8 - Řez Li-Pol akumulátorem [17].....	53
Obr. 3-9 – Elektrolytický kondenzátor (vlevo), Superkapacitor (vpravo) [18]	53
Obr. 3-10 - Superkapacitorový blok [19]	54
Obr. 3-11 - Rozměry akumulátoru TS-LYP400AHA [20]	58
Obr. 3-12 - Vybíjecí křivky akumulátoru TS-LYP400AHA [20].....	58
Obr. 4-1 - Hodnota Cx podle tvaru čela [22]	61
Obr. 4-2 – Jízdní odpor železničního vozidla DESIRO Classic DMU v závislosti na rychlosti	63
Obr. 4-3 – Měrná spotřeba energie vozidla DESIRO Classic DMU pro jízdu rovnoměrnou rychlostí.....	64
Obr. 4-4 - Závislost rychlosti jízdy na čase.....	65
Obr. 4-5 – Kinetická energie potřebná pro rozjezd, energie kinetická a energie rekuperovaná	68
Obr. 4-6 - Energie v zásobníku v závislosti na jízdě bez využití PV panelů	69
Obr. 4-7 - Energie v zásobníku v závislosti na jízdě s využitím PV panelů	70
Obr. 5-1 - Střecha železničního vozidla a rozmístění PV panelů.....	71
Obr. 5-2 - Blokové schéma železničního vozidla	72
Obr. 5-3 - Upravené blokové schéma železničního vozidla.....	74
Obr. 5-4 - Tok energie při napájení z PV panelů s využitím zásobníku	75
Obr. 5-5 - Tok energie při rekuperaci	76
Obr. 5-6 - Sankeyho diagram koloběhu energie	77
Obr. 6-1 - Trakční charakteristika	79

Seznam tabulek

Tabulka 1 - SPR-318E-WHT-D - Elektrické parametry PV panelu [11]	33
Tabulka 2 - SPR-318E-WHT-D - Technické parametry [11]	33
Tabulka 3 - SPR-318E-WHT-D - Testované provozní podmínky [11]	34
Tabulka 4 - SPR-318E-WHT-D - Záruky a certifikace [11]	34
Tabulka 5 - Parametry superkapacitorového bloku [19]	55
Tabulka 6 - Hrubé porovnání parametrů elektrochemických akumulátorů, klasického kondenzátoru a superkapacitoru	55
Tabulka 7 - Parametry akumulátoru TS-LYP400AHA [20]	57
Tabulka 8 - Měrná spotřeba energie vozidla DESIRO Classic DMU v závislosti na rychlosti... ..	64
Tabulka 9 - Energetická náročnost na ujetí dané dráhy cestovní rychlostí	66
Tabulka 10 - Energie potřebná pro urychlení na danou rychlost a energie vrácená do zásobníku při rekuperačním brzdění (bez vlivu jízdních odporů)	66
Tabulka 11 - Parametry rozjezdu železničního vozidla	67
Tabulka 12 - Parametry brzdění železničního vozidla	67
Tabulka 13 - Rozměry jednoho vozu [25]	78
Tabulka 14 - Parametry vozidla [25]	78
Tabulka 15 - Množství dopadající energie a počet ujetých stanic – ideální den bez mraků	80