

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## SOLÁRNÍ ČLÁNEK JAKO ZDROJ NAPÁJENÍ PRO MALÝ STEJNOSMĚRNÝ MOTOR RC MODELU AUTA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

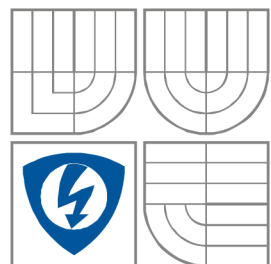
Nábělek Ondřej

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## SOLÁRNÍ ČLÁNEK JAKO ZDROJ NAPÁJENÍ PRO MALÝ STEJNOSMĚRNÝ MOTOR RC MODELU AUTA

SOLAR PANEL AS A SOURCE FOR A SMALL DIRECT CURRENT MOTOR OF RC CAR MODEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

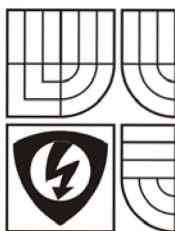
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Nábělek Ondřej

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Aleš Mikulčík

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

**Student:** Nábělek Ondřej

**Ročník:** 3

**ID:** 98437

**Akademický rok:** 2008/09

**NÁZEV TÉMATU:**

**Solární článek jako zdroj napájení pro malý stejnosměrný motor RC modelu auta**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Použijte navrženou soustavu fotovoltaických článků pro napájení stejnosměrného motoru v RC modelu auta.
2. Provedte měření na modelu RC auta se soustavou fotovoltaických článků.
3. Zhodnoťte měření.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

**Termín zadání:** 10.10.2008

**Termín odevzdání:** 29.05.2009

**Vedoucí projektu:** Ing. Aleš Mikulčík

**doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## **Abstrakt**

Cílem tohoto projektu je seznámit čtenáře s problematikou solárních článků a návrhu soustavy solárních článků pro napájení elektrického stroje nízkého výkonu. Úvodem je pojednání o energii vyrobené Sluncem dopadající na Zemi. Další kapitola obsahuje informace o principiální funkci solárního křemíkového článku a o přeměně sluneční energie na energii elektrickou. Těžiště práce je věnováno jednotlivým typům solárních článků, výrobním materiálům, struktuře článků a solárním panelům. Poslední částí je měření na soustavě solárních článků, ověření teoretických předpokladů a zhodnocení výsledků práce.

## **Abstract**

The goal of this project is to acquaint the reader with problems of solar cells and project of systems for solar cells power a small electric machine performance. Preliminary discussion of the energy produced by the Sun incident on the Earth. Another chapter contains information about the fundamental function of solar silicon cells and conversion of solar energy to electric energy. Main part of this work is devoted to various types of solar cells, production materials, the structure of cells and solar panel. The last part is a measurement system for solar cells, the verification of theoretical assumptions and evaluate the results of the work.

## **Klíčová slova**

solární článek; panel; slunce; polovodič; přechod PN; převodovka

## **Keywords**

solar cell; panel; sun; semiconductor; PN junction; transmission

## **Bibliografická citace**

NÁBĚLEK, O. *Solární článek jako zdroj napájení pro malý stejnosměrný motor RC modelu auta*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Mikulčík.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Solární článek jako zdroj napájení pro malý stejnosměrný motor RC modelu auta jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

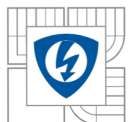
Podpis autora .....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Aleši Mikulčíkovi a jeho kolegovi Ing. Jiřímu Vondrušovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych tímto chtěl poděkovat mým rodičům za finanční, materiální a psychickou podporu.

V Brně dne .....

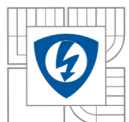
Podpis autora .....



## Obsah

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>13</b>
<b>2. SOLÁRNÍ ENERGIE</b> .....	<b>14</b>
<b>3. FYZIKÁLNÍ PODSTATA FOTOVOLTAICKÉ PŘEMĚNY ENERGIE</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1. NEVLASTNÍ POLOVODIČ</b> .....	<b>18</b>
3.1.1. POLOVODIČ TYPU N .....	18
3.1.2. POLOVODIČ TYPU P .....	19
3.1.3. PŘECHOD PN .....	19
3.1.4. PRINCIP FOTOVOLTAICKÉ PŘEMĚNY ENERGIE.....	20
<b>4. CHARAKTERISTIKY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ</b> .....	<b>22</b>
<b>5. VÝROBA A TYPY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ</b> .....	<b>24</b>
<b>5.1. KŘEMÍKOVÉ MONOKRYSTALICKÉ ČLÁNKY</b> .....	<b>25</b>
<b>5.2. ČLÁNKY Z POLYKRYSALICKÉHO KŘEMÍKU</b> .....	<b>25</b>
<b>5.3. STRUKTURA KRYSTALICKÝCH SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ</b> .....	<b>26</b>
<b>5.4. ČLÁNKY Z AMORFNÍHO KŘEMÍKU</b> .....	<b>28</b>
<b>5.5. DALŠÍ FOTOVOLTAICKÉ MATERIÁLY</b> .....	<b>30</b>
5.5.1. GALIUMARSENID (ARSENID GALITÝ, GAAS).....	30
5.5.2. DISELENID MĚDI A INDIA (CU <sub>2</sub> INSE <sub>2</sub> , CIS) .....	30
5.5.3. TELURID KADMIA (CADMIUM TELLURIDE, CdTe) .....	30
5.5.4. ČLÁNKY Z ORGANICKÝCH LÁTEK .....	30
5.5.5. NANOSTUKTURY .....	31
5.5.6. FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY Z VODIVÝCH POLYMERŮ.....	31
5.5.7. VÍCEPŘECHODOVÉ STRUKTURY (MULTIJECTION).....	32
<b>6. NÁVRH SOUSTAVY SOLÁRNÍCH ČLÁNKU</b> .....	<b>34</b>
<b>6.1. ZÁTĚŽ</b> .....	<b>34</b>
<b>6.2. SOUSTAVA SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ</b> .....	<b>35</b>
6.2.1. NÁVRH SOUSTAVY PRO JMENOVITÉ HODNOTY MOTORKU .....	36
6.2.2. NÁVRH SOUSTAVY PRO MINIMÁLNÍ NAPĚTÍ MOTORKU.....	37
<b>7. MĚŘENÍ NA NAVRŽENÉ SOUSTAVĚ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ</b> .....	<b>39</b>
<b>7.1. TEORETICKÝ POSTUP MĚŘENÍ</b> .....	<b>39</b>
<b>7.2. SCHÉMA ZAPOJENÍ ÚLOHY</b> .....	<b>40</b>
<b>7.3. TABULKY NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT</b> .....	<b>40</b>
7.3.1. ÚHEL $\varphi = 0^\circ$ .....	41
7.3.2. ÚHEL $\varphi = 30^\circ$ .....	42
7.3.3. ÚHEL $\varphi = 60^\circ$ .....	43
<b>7.4. GRAFICKÉ ZÁVISLOSTI NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT:</b> .....	<b>44</b>





7.4.1.	V-A CHARAKTERISTIKA PANELU .....	44
7.4.2.	GRAF ZÁVISLOSTI VÝKONU NA NAPĚTÍ PV PANELU .....	45
7.4.3.	GRAF ZÁVISLOSTI ÚČINNOSTI NA NAPĚTÍ PV PANELU .....	45
7.5.	SEZNAM POUŽITÝCH STROJŮ A PŘÍSTROJŮ .....	46
7.6.	ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	46
<b>8.</b>	<b>MĚŘENÍ NA MODELU RC AUTA – ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA.....</b>	<b>47</b>
8.1.	PARAMETRY POUŽITÉHO MOTORU:.....	47
8.2.	POSTUP MĚŘENÍ.....	47
8.3.	SCHÉMA ZAPOJENÍ .....	49
8.4.	TABULKY NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT .....	49
8.4.1.	URČENÍ ZTRÁT MOMENTU VLIVEM DYNAMA .....	49
8.4.2.	ZMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY PRO ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKU .....	49
8.5.	GRAFY NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT .....	50
8.5.1.	GRAF ZÁVISLOSTI OTÁČEK MOTORU NA MOMENTU MOTORU.....	50
8.5.2.	GRAF ZÁVISLOSTI VÝKONU MOTORU NA MOMENTU MOTORU .....	51
8.5.3.	V-A CHARAKTERISTIKA NAPÁJENÍ MOTORU .....	51
8.6.	SEZNAM POUŽITÝCH STROJŮ A PŘÍSTROJŮ .....	52
8.7.	ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	52
9.	NÁVRH ROTAČNÍ PŘEVODOVKY PRO RC MODEL AUTA .....	53
10.	ZÁVĚR.....	56

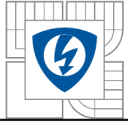


## Seznam obrázků

<i>Obrázek 1.1 Přeměna sluneční energie na energii chemickou.....</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 3.1 Izolovaný atom křemíku.....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 3.2 Kovalentní vazba.....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 3.3 Energetické pásy polovodiče.....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 3.4 Vlastní polovodič.....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 3.5 Polovodič typu N.....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 3.6 Polovodič typu P.....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 3.7 Struktura článku s rovinným povrchem.....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 3.8 Model energetických hladin osvětleného fotovoltaického článku.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 4.1 Náhradní schéma solárního článku.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 4.2 Voltampérová charakteristika solárního článku při různých osvětleních.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 4.3 Pracovní bod MPP.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 4.4 Voltampérová charakteristika solárního článku při konstantním osvětlení.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 5.1 Monokrystalický modul.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 5.2 Polykrystalický modul.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 5.3 Struktura jednoduchého modelu solárního článku.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 5.4 Struktura solárního článku.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 5.5 Mikroskopické snímky struktury vzniklé leptáním.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 5.6 Amorfni modul.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 5.7 Struktura amorfniho křemíku.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 5.8 Struktura článku s oxidem titaničitým a organickým barvivem.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 5.9 Vícepřechodové struktury.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 6.1 Návrh bez řídicí jednotky.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 6.2 Návrh s řídicí jednotkou.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 6.3 Řízený motor firmy Megamotor E2430.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 6.4 Navržená soustava článků pro jmenovité hodnoty motoru.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 6.5 Navržená soustava článků pro optimální napájení modelu.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 7.1 Schéma zapojení pyranometru.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 7.2 Princip měření úhlu odklonu od slunce.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 7.3 Schéma zapojení úlohy pro měření V-A charakteristiky PV článku.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 7.4 Změřená V-A charakteristika navržené soustavy článků.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 7.5 Graf závislosti výkonu na napětí navržené soustavy článků.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 7.6 Graf závislosti účinnosti na napětí navržené soustavy článků.....</i>	<i>45</i>

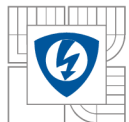


<i>Obrázek 8.1</i>	<i>Princip měření zatěžovací charakteristiky .....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 8.2</i>	<i>Měření momentu dynamometrem .....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 8.3</i>	<i>Schéma zapojení úlohy .....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 8.4</i>	<i>Momentová charakteristika motoru.....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 8.5</i>	<i>Graf závislosti výkonu na momentu motoru .....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 8.6</i>	<i>V-A charakteristika navrženého PV článku při zatížení motorem.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 9.1</i>	<i>Návrh převodovky pro pohon auta .....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 9.2</i>	<i>Rozložení sil při pohonu auta na nakloněné rovině .....</i>	<i>54</i>



## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 7.1</i> Měření $V$ - $A$ charakteristiky při $\varphi=0^\circ$ .....	41
<i>Tabulka 7.2</i> Měření $V$ - $A$ charakteristiky při $\varphi=30^\circ$ .....	42
<i>Tabulka 7.3</i> Měření $V$ - $A$ charakteristiky při $\varphi=60^\circ$ .....	43
<i>Tabulka 7.4</i> Seznam použitých strojů a přístrojů pro měření $VA$ charakteristiky.....	46
<i>Tabulka 8.1</i> Měření ztrát momentu dynama .....	49
<i>Tabulka 8.2</i> Měření momentové charakteristiky .....	49
<i>Tabulka 8.3</i> Seznam použitých strojů a přístrojů pro měření momentové charakteristiky .....	52

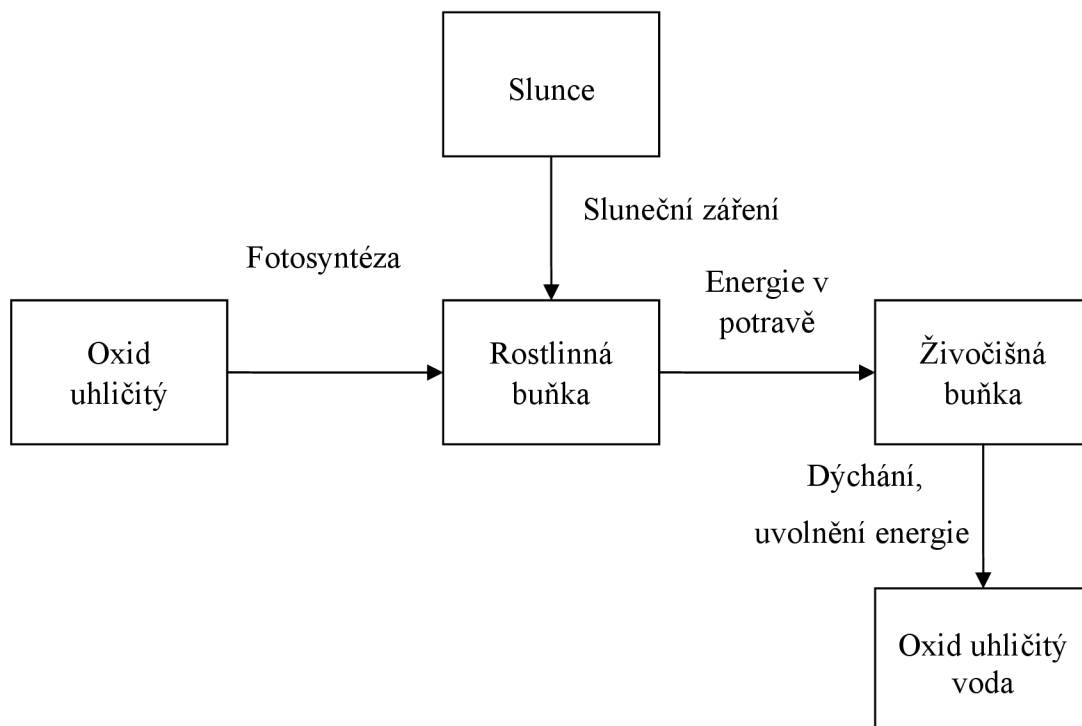


## Seznam symbolů a zkratek

$c$	rychlost světla
$c\Phi$	napěťová konstanta motoru
$f$	frekvence
$h$	Planckova konstanta
$I$	proud dodávaný soustavou solárních článků
$I_M$	proud motoru
$i$	převod převodovky pohonu
$k$	konstanta měřicího přístroje
$E$	energie
$F$	síla
$M_A$	moment na hřídeli auta
$M_M$	moment motoru
$M_O$	změřený moment dynamem
$M_Z$	ztrátový moment dynama
$m$	hmotnost
$N$	počet článků
$n_M$	otáčky motoru
$n_A$	otáčky hřídele auta
$P$	výkon dodávaný soustavou solárních článků
$P_{GZ}$	výkon globálního záření
$P_1$	sluneční výkon dopadající na soustavu solárních článků
$P_M$	výkon motoru
$P_A$	výkon auta
$S$	plocha článků
$U$	napětí soustavy článků
$U_{CC}$	napájecí napětí
$U_D$	prahové napětí
$U_M$	napětí motoru
$U_P$	napětí pyranometru
$\alpha$	úhel natočení dynama
$\alpha_R$	úhel nakloněné roviny
$\beta$	konstanta způsobující ztráty momentu vlivem tření
$\eta$	účinnost
$\lambda$	vlnová délka
$\varphi$	úhel svírající sluneční paprsek a osa kolmosti na panel
$\omega$	úhlová rychlost

## 1. Úvod

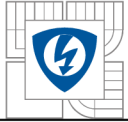
Veškerý život, činnost a pohyb je provázen přeměnami energie z jedné formy na formu druhou. Aby nedošlo k vyčerpání této energie, je nutné ji neustále doplňovat. Biosféra již mnoho milionů let funguje na principu spotřebovávání sluneční energie a ukládání formou organických sloučenin (chemická energie). Ty poté slouží jako potrava (zisk energie) pro ostatní živočišné druhy i člověka. Přeměnu popisuje Obrázek 1.1 [1].



**Obrázek 1.1** Přeměna sluneční energie na energii chemickou [1]

Rostliny vytvářejí z oxidu uhličitého a slunečního záření organické molekuly. Tento děj se nazývá fotosyntéza. Opačným procesem je uvolňování energie (rozklad na oxid uhličitý a vodu), což může být například hoření. Tímto způsobem může existovat biosféra neomezeně dlouho, dokud se podmínky na Zemi příliš nezmění [1].

Jednou z nejdůležitějších energií je pro náš život bez pochyby energie elektrická, protože ji lze snadno přeměnit na jinou energii (např. mechanickou) a lze ji snadno rozvádět. Modernizace vede ke stále větší spotřebě elektřiny. Většinu elektrické energie zatím získáváme z fosilních paliv, jež tady rostliny vytvářely miliony let, které jsou mnohonásobně rychleji spotřebovávány než vytvářeny a tudíž zanedlouho již nebudou existovat. Navíc těžba ropy a spalování fosilních paliv způsobuje stále větší hrozbu ze strany životního prostředí, vzniká metan a oxid uhličitý jehož obsah stále stoupá. Tyto plyny patří do skupiny skleníkových plynů, které pozvolna naši planetu oteplují a tím hrozí riziko globálních problémů. Tento fakt vede k hledání nevyčerpatelných (alternativních) zdrojů elektřiny [1].



Jedním z alternativních zdrojů je sluneční záření dopadající na Zemi, které je univerzálně dostupné a neprodukuje žádný ze škodlivých plynů. Na plochu zabírající běžný dům dopadne za rok ze Slunce 100 MWh energie a přitom roční spotřeba v takovém domě elektrické energie je 4MWh a tepelné 20-30 MWh. Teoreticky je tedy možné ekologicky pokrýt pomocí sluneční energie spotřebu tohoto domu. Pro přímé využití této sluneční energie je zapotřebí vhodné zařízení, které je schopné ji přeměnit na elektřinu. V dnešní době je jím fotovoltaický článek. Takto vyrobená elektřina není jen záležitost technická, ale i ekonomická. Zařízení musí být levné a účinné, aby mohlo konkurovat ceně energie vyrobené ve velkých elektrárnách [1].

## 2. Solární energie

Většina energie na Zemi pochází ze Slunce. Zdrojem energie ve Slunci je tzv. jaderná fúze, neboli spojování jader vodíku a elektronů za vzniku hélia a fotonů. Elektrony na Slunci se pohybují určitou kinetickou energií a tuto energii také odevzdají fotonu při fúzi. Hmotnost vzniklého hélia je o něco menší než hmotnost vstupního vodíku a tento rozdíl se dá pomocí Einsteinova zákona  $E = mc^2$  přepočítat na energii. Energie ze Slunce je na Zemi přenášena formou elektromagnetického záření [1].

Před průchodem atmosférou je dopadající energie (solární konstanta) asi  $1,4\text{kW/m}^2$ . Část této energie je průchodem atmosférou rozptýlena a odražena a na Zemi dopadá již méně než  $1\text{kW/m}^2$  a při zatažené obloze pouze desítky wattů. Přicházející záření na zemský povrch se nazývá globální záření a dělí se na přímé a difuzní. Při zatažené obloze se uplatňuje pouze difuzní záření [1].

Chceme-li využívat sluneční energii k výrobě elektřiny musí nás zajímat, jak velký je energetický potenciál tohoto zdroje, kolik jsme schopni získat energie za určitou dobu. Pokud je solární energie využívána k provozu družic na oběžné dráze naší planety, dopadá na panely stálá energie o přibližné velikosti solární konstanty. Pokud získáváme energii na Zemi tak dochází ke spoustě problémům, které ovlivňují výkon panelů. Příchozí energie je totiž ovlivňována aktuálním počasím, znečištěním, měnící se polohou Slunce. Nejpodstatnější vliv mají na velikost záření mraky, ty jej odrazí a zbytek rozptýlí tak, že se z nich stane pouze difuzní záření o malé intenzitě. Na stránkách Českého hydrometeorologického ústavu se nachází informace o tom kolik sluneční energie za jistou dobu dopadlo na určité místo. Při výběru lokality, kde chceme fotovoltaický systém provozovat je vhodné k těmto informacím přihlížet [1].

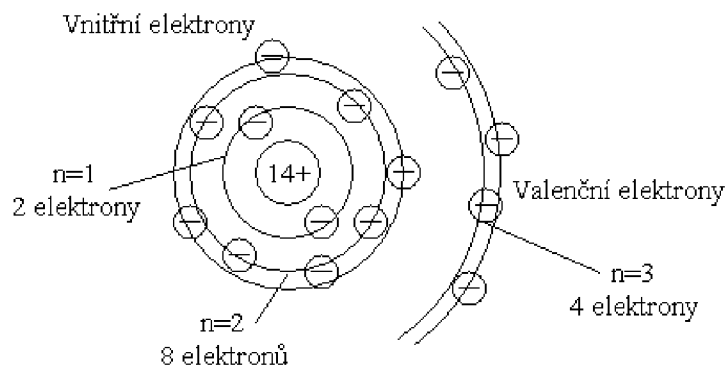
### 3. Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny energie

Rozeznáváme dva typy fotoefektu:

- Vnější fotoelektrický jev - záření způsobuje emisi elektronů z povrchu ozářené látky (pro výrobu elektrické energie nemá význam)
- Vnitřní fotoelektrický jev - elektrony vybuzené zářením neopouštějí látku, ale fungují jako nosič elektrického náboje [2]

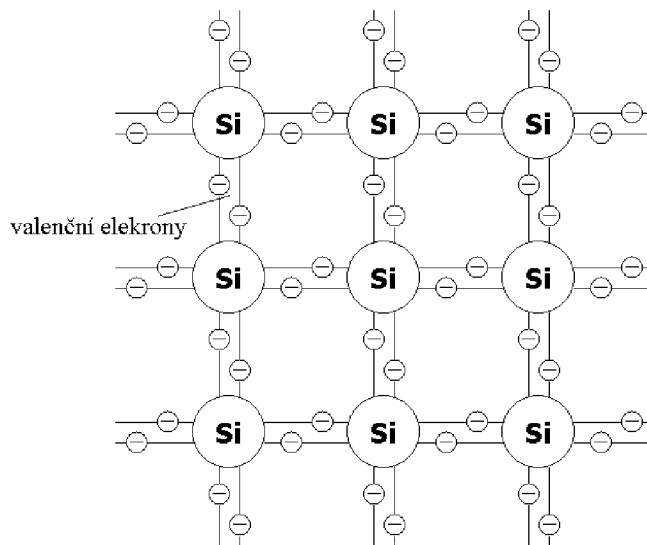
K fotovoltaické přeměně slunečního elektromagnetického záření na energii elektrickou dochází v polovodičových fotovoltaických (PV) člancích. Nejběžnější polovodičový materiál je křemík, proto si podstatu fotovoltaického jevu vysvětlíme právě na něm, u ostatních polovodičových materiálů je podstata podobná [3].

Atom křemíku obsahuje ve svém elektronovém obalu 14 elektronů (Obrázek 3.1) a každý atom je obklopen čtyřmi nejbližšími sousedy. Poslední 4 elektrony (valenční) s těmito sousedními atomy tvoří kovalentní vazby (Obrázek 3.2), 10 zbylých elektronů je pevně vázaných k atomu, které se nepodílí na chemických reakcích. Energie elektronu v atomu křemíku může nabývat pouze určitých hodnot. Tyto hladiny energie jsou rozděleny do pásů tzv. pásů dovolené energie a hladiny, které elektron nabývat nemůže, se nazývají pásy zakázané energie [3].



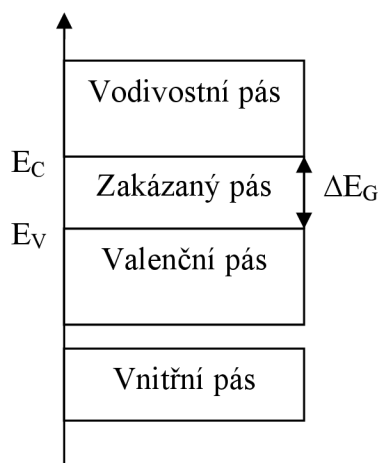
Obrázek 3.1 Izolovaný atom křemíku [1]





**Obrázek 3.2** Kovalentní vazba [9]

Valenční pás obsahuje energetické stavy valenčních elektronů. Neboť těchto energetických stavů je stejný počet jako valenčních elektronů v celém krystalu, budou všechny tyto stavy za velmi nízké teploty plně obsazené. Dále následuje pás zakázané energie, kterou žádný z elektronů nabývat nemůže. Poté pás vodivostní, jehož energetické stavy nejsou za velmi nízkých teplot obsazené. Vnitřní pásy jsou obsazené elektrony pevnou vazbou a pro přenos náboje nemají význam (Obrázek 3.3) [3].



**Obrázek 3.3** Energetické pásy polovodiče [9]

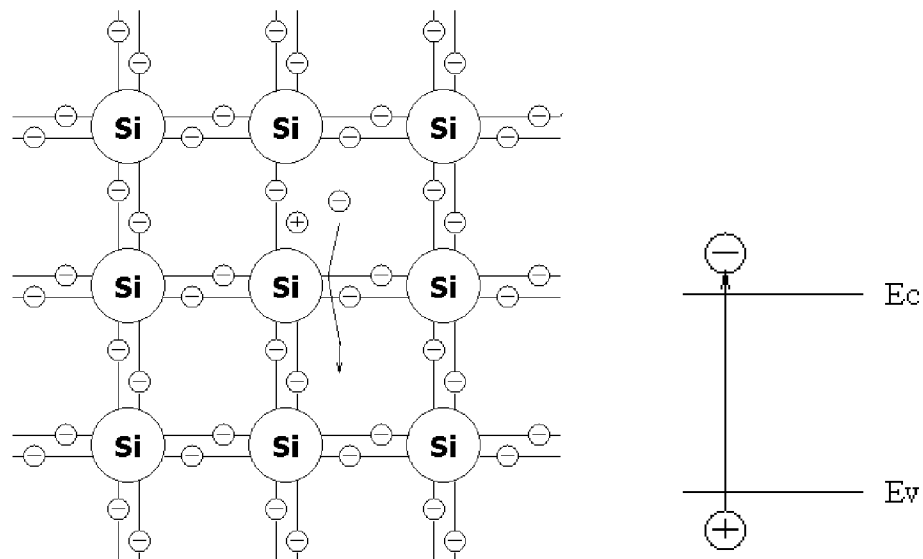
Uvnitř pásů dovolených energií jsou rozdíly mezi hladinami neměřitelně malé. Nejvyšší hladina valenčního pásu se zpravidla označuje  $E_V$  a nejnižší hladina vodivostního pásu se značí  $E_C$ . Je tedy zřejmé, že šířka zakázaného pásu [3]:

$$\Delta E_G = E_C - E_V \quad (2.1)$$

Důležitou energetickou hladinou je i tzv. Fermiho energie  $E_F$ , která leží u čistého křemíku uprostřed zakázaného pásu. Elektrony ve valenčním pásu se nemohou podílet na vedení elektrického proudu. Dodáním energie buď tepelné nebo světelné, mohou přejít některé elektrony do vodivostního

pásu. Dojde tedy k přechodu elektronu z hladiny ve valenčním pásu do vyšší energetické hladiny vodivostního pásu. Tyto elektrony s vyšší energií jsou tedy schopné se podílet na vedení elektrického proudu. Tím v některých atomech vzniknou prázdna místa. Tato prázdna místa se označují jako díra. Díra může přitáhnout elektron zpět, což je zpětný přestup elektronu z hladiny vodivostního pásu do hladiny valenčního pásu, nebo může díra přitáhnout elektron z nějakého jiného atomu, který také získal energii potřebnou pro přechod do vodivostního pásu. Tím se díry vytvoří i u ostatních atomů a mohou se zde podobnými přeskoky dále posunovat. Působí-li na volný elektron elektrické pole, dochází k posouvání těchto elektronů proti směru intenzity pole, protože mají záporný náboj. Díra se pohybuje ve směru intenzity pole, protože má náboj kladný [3].

Ve vlastním polovodiči (intrinsickém) uvolnění jednoho elektronu znamená uvolnění jedné díry, tzn. počet elektronů a děr je stejný (Obrázek 3.4).



Obrázek 3.4 Vlastní polovodič [9]

Krystal jako celek se chová jako elektricky neutrální. Je-li vytvořen pár elektron-díra dopadem fotonu, musí být jeho energie větší než je šířka zakázaného pásma polovodiče. Jestliže je jeho energie nižší dojde k průchodu fotonu polovodičem, fotony s větší energií vygenerují pár elektron-díra a tím se foton pohltí. Křemík má šířku pásma  $\Delta E_G = 1,1eV$  [3]. Energie fotonu je dána vztahem:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.2)$$

E...energie fotonu

h...Planckova konstanta ( $h = 4,135 \cdot 10^{-15} eV$ )

f...frekvence

c...rychlost světla ( $c = 300 \cdot 10^6 m \cdot s^{-1}$ )

$\lambda$ ...vlnová délka slunečního záření

Vyjádříme, li z rovnice ( 2.2 ) vlnovou délku a dosazením získáme:

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{4,135 \cdot 10^{-15} \cdot 300 \cdot 10^6}{1,1} = 1127nm \quad (2.3)$$

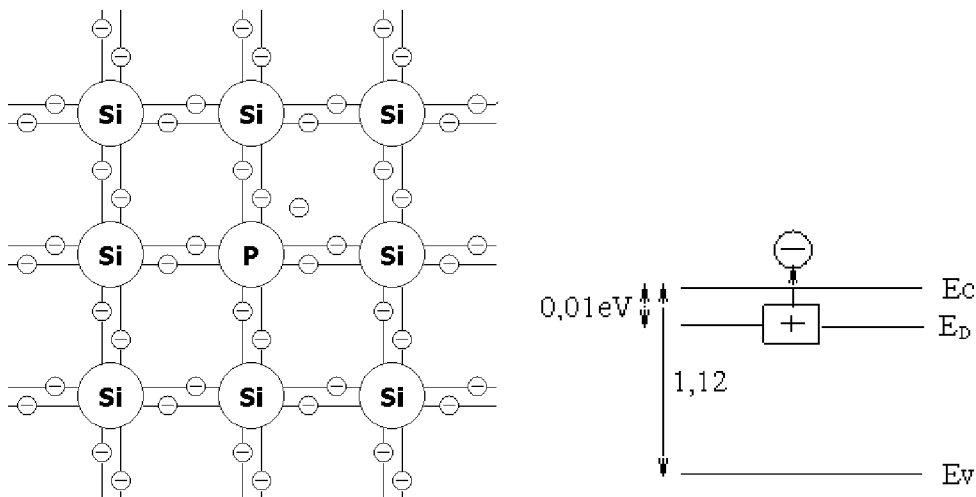
Z výsledku ( 2.3 ) plyne, že pro uvolnění elektronu z kovalentního pásu musí mít dopadající foton vlnovou délku  $\lambda \leq 1127nm$  [3].

### 3.1. Nevlastní polovodič

Na elektrické vlastnosti krystalu mají významný vliv atomy cizích prvků, které jsou v reálném krystalu vždy přítomny. Jestliže chceme ovlivnit vlastnosti polovodiče, musíme do něj vhodným technologickým postupem zavádět uměle cizí prvky. Tento postup se nazývá dotování nebo legování [1].

#### 3.1.1. Polovodič typu N

Jestliže nějaký atom v krystalu křemíku nahradíme atomem nějakého prvku V. skupiny Mendělejevovy periodické tabulky prvků (As,P,Sb), které mají ve svém elektronovém obalu 5 valenčních elektronů, budou 4 z nich tvořit kovalentní vazbu se svými nejbližšími atomy křemíku. Pátý elektron bude jen slabě vázaný k atomu příměsi a již při malé energii (přibližně 0,01 eV) dojde k odtržení elektronu a tím přejde do vodivostního pásu (Obrázek 3.5) [3].



Obrázek 3.5 Polovodič typu N [9]

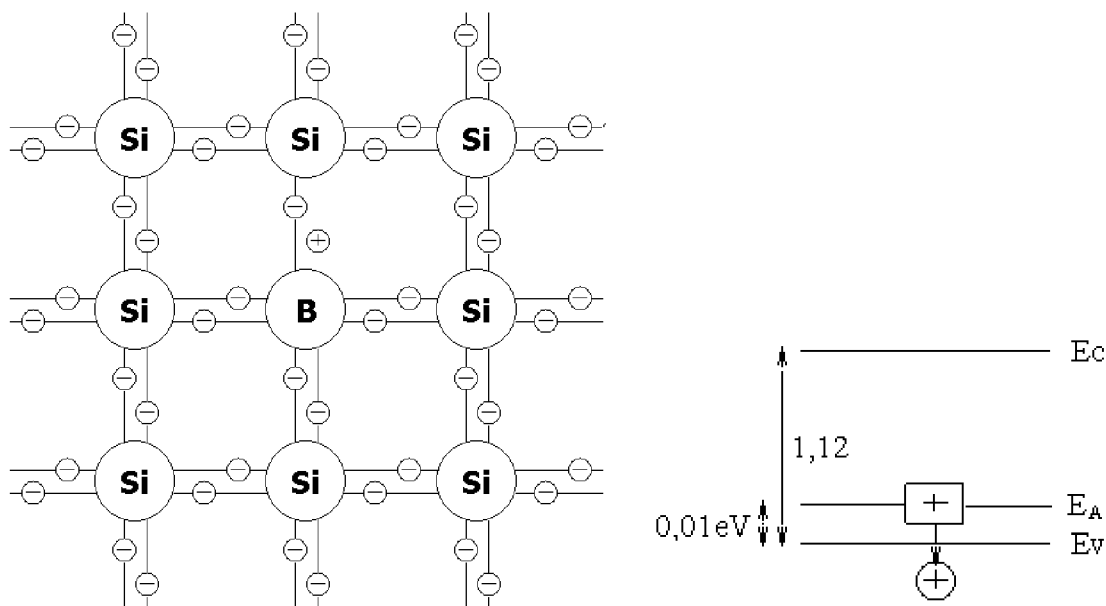
Příměsové atomy se jmenují donory, protože dodávají volné elektrony. V pásovém diagramu přítomnost donoru vytvoří pod dnem vodivostního pásu donorovou hladinu  $E_D$ .

Při pokojové teplotě (tepelná energie  $kT = 0,025eV$  ) může elektron snadno přejít do vodivostního pásu a jsou tedy všechny donorové atomy ionizovány, tvoří kladný prostorový náboj. Koncentrace elektronů ve vodivostním pásu je tedy větší než koncentrace děr ve valenčním pásu. Proto jsou v polovodiči typu N elektrony označovány jako majoritní nosiče náboje a díry jako minoritní nosiče náboje [3].

### 3.1.2. Polovodič typu P

Nahradíme-li v krystalu křemíku atom křemíku nějakým trojmocným prvkem

(B, Ga, In) z Mendělejevovy periodické soustavy prvků, které mají 3 elektrony, budou vytvářet vazbu mezi sousedními atomy a do úplné vazby bude chybět jeden elektron. Na místě chybějícího elektronu vznikne kladná díra (Obrázek 3.6) [3].



Obrázek 3.6 Polovodič typu P [9]

Dodáme-li polovodiči energii (tepelnou), může do nezaplněné vazby přeskočit elektron a díra se bude pohybovat krystalem. Trojmocné příměsi nazýváme akceptory. V energetickém pásu se akceptory projeví vznikem akceptorové energetické hladiny  $E_A$ , která se nachází nad stropem valenčního pásma. Dodání velmi malé energie způsobí, že se na této hladině mohou zachytit elektrony přeskokem z valenčního pásma, kde po nich zůstane díra. Atom akceptoru má poté o elektron navíc a chová se jako záporně nabitý, tvoří záporný náboj. V polovodiči typu P je koncentrace děr mnohem větší než koncentrace elektronů, proto se díry nazývají jako majoritní nosiče náboje a elektrony jako minoritní nosiče náboje [3].

### 3.1.3. Přechod PN

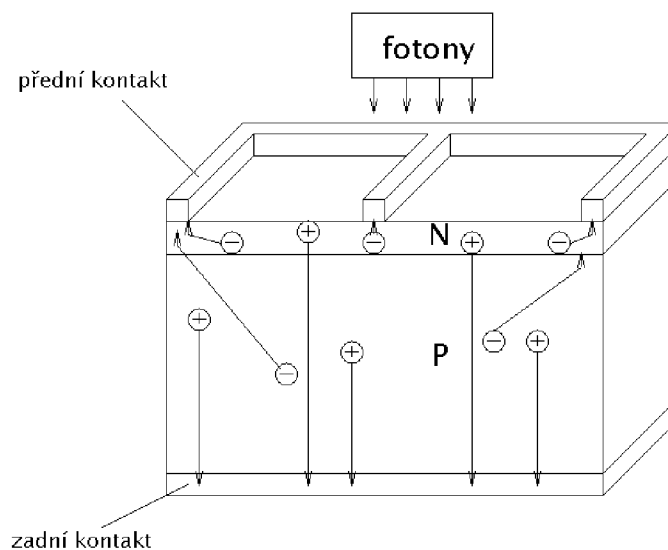
Vzniká, jestliže část krystalu dopujeme jako polovodič typu P a další část je dopována jako typ N. Část volných elektronů přejde z oblasti typu N do oblasti typu P a část děr z oblasti typu P do oblasti typu N. Pevně vázané náboje ionizovaných příměsí vytvoří oblasti prostorového náboje a mezi nimi vznikne elektrické pole, které brání dalšímu toku volných nosičů [3].

Přechod PN je jednoduchou polovodičovou diodou. Při teplotě  $T > 0K$  dochází neustále ke generaci a rekombinaci elektronů a děr. Přes PN přechod tedy tečou neustále elektrické proudy oběma směry. Některé elektrony mohou mít větší energii, než která odpovídá potenciálové bariéře difuzního napětí, tyto

elektrony mohou přecházet přes přechod PN a zde rekombinují s volnými dírami (rekombinační proud). Současně ale dochází v polovodiči typu P ke generaci volných párů elektron-díra a tyto elektrony jsou urychlovány přes přechod PN do polovodiče typu N (termální nebo-li difuzní proud). Bez přiloženého vnějšího napětí se tyto proudy vyrovnají a na venek se neprojeví [3].

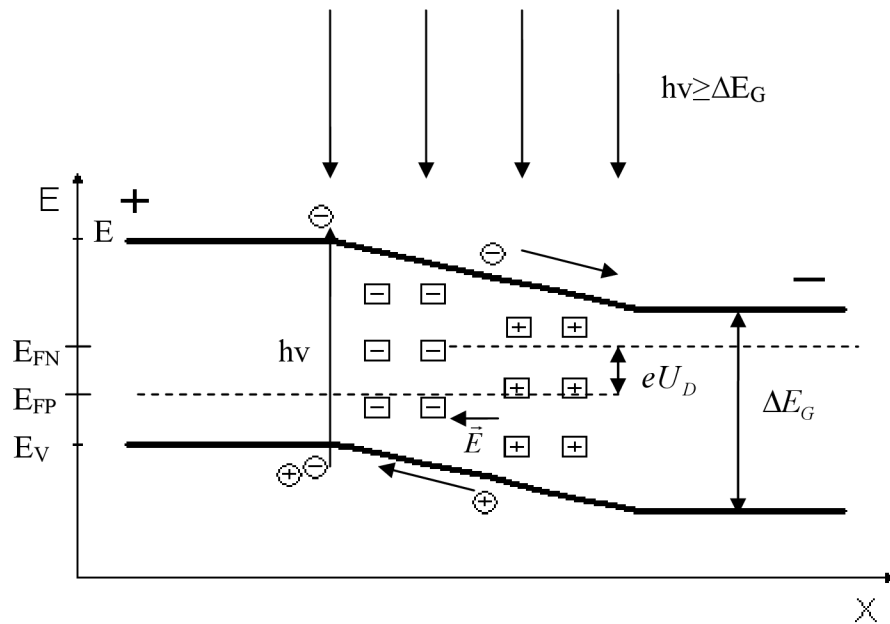
### 3.1.4. Princip fotovoltaické přeměny energie

K přeměně energie fotonů na energii elektrickou dochází v polovodičových fotovoltaických článcích. Jedná se v podstatě o velkoplošnou diodu, kde přechod je orientován kolmo na čelní plochu (Obrázek 3.7). Dopadají-li na tento fotovoltaický článek fotony s větší energií než je šířka zakázaného pásma, dochází ke generaci páru elektron a díra a tím se foton pohltí. Přebytek energie se mění na teplo kmitáním mřížky krystalu a tím se fotovoltaický článek zahřívá. Páry elektron a díra jsou od sebe odděleny elektrickým polem mezi vázanými prostorovými náboji. Díry jsou urychleny ve směru elektrického pole a elektrony opačným směrem a tím se vytvoří na kontaktech polovodiče elektrické napětí a po zapojení do obvodu teče tímto obvodem stejnosměrný elektrický proud [3].



**Obrázek 3.7** Struktura článku s rovinným povrchem [1]

Ve tmě se fotovoltaický článek chová jako dioda. Obrázek 3.8 zobrazuje situaci při osvětlení článku, který není zapojen do obvodu. Dopadající fotony poruší rovnováhu v krystalu a dojde ke zvýšení generace páru elektron-díra, v oblasti přechodu PN jsou elektrony a díry urychlovány ve směru elektrického pole  $\vec{E}$  ve směru šipek. Strana typu P se nabíjí kladně a strana N záporně. Fermiho hladina se rozdělí v oblasti typu P na  $E_{FP}$  a v oblasti typu N na  $E_{FN}$  a rozdíl mezi nimi odpovídá fotovoltaickému napětí  $U_D$ . U křemíkových článků bývá  $U_D \cong 0,6V$ . Větší zvýšení intenzity slunečního záření již nezpůsobí zvětšení napětí na prázdno, protože fotovoltaické napětí se vykompenzuje s opačným napětím prostorových nábojů na přechodu PN a již nedochází k oddělování směru pohybu generovaných elektronů a děr v oblasti PN přechodu [3].



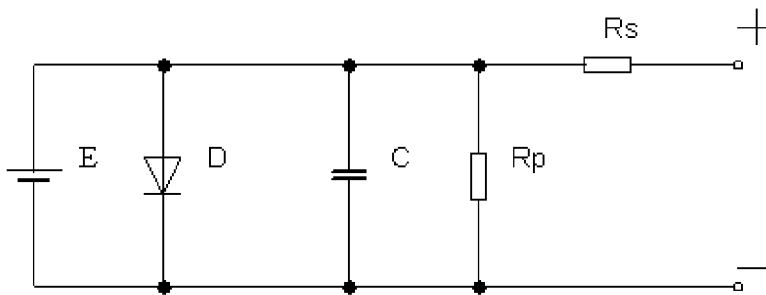
**Obrázek 3.8** Model energetických hladin osvětleného fotovoltaického článku [3]

Zapojíme-li osvětlený PV článek do uzavřeného elektrického obvodu, dojde ke snížení fotovoltaického napětí  $U_D$ . Dojde ke snížení rekombinačního proudu a ke zvýšení termálního proudu v důsledku generace elektronů a děr v elektrickém poli  $\vec{E}$  mezi vázanými prostorovými náboji. Rozdíl těchto proudů bude výsledný proud dodávaný fotovoltaickým článkem do obvodu [3].

Napětí na kontaktech článku udává materiál použitého polovodiče, u křemíku je to přibližně 0,6 V a při zatížení klesá. Aby se získalo využitelné napětí, je nutné tyto články spojit do série, zpravidla se vyrábějí moduly s 36 nebo 72 články, což vytvoří napětí 18 nebo 36 V [3].

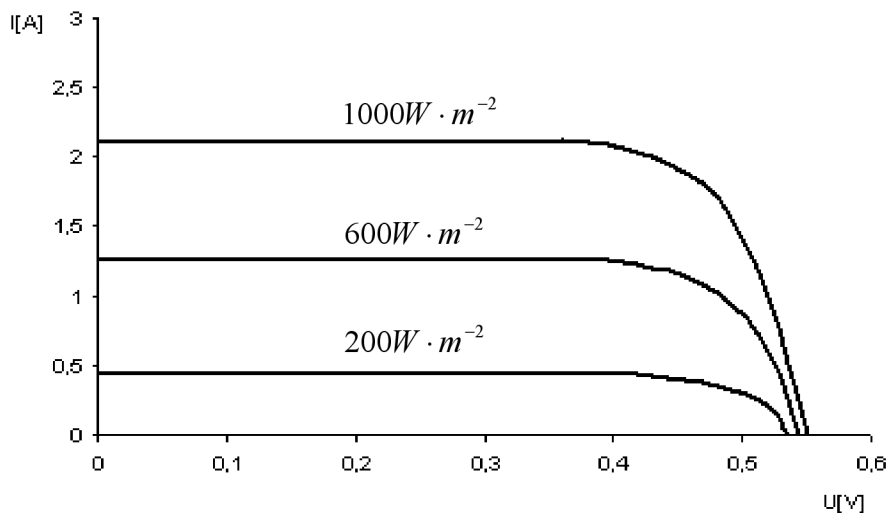
## 4. Charakteristiky fotovoltaických článků

Solární články jsou tedy v podstatě polovodičové diody zvláštního charakteru, které s nimi vykazují určité podobnosti. Náhradní schéma solárního článku je na Obrázku 4.1. Baterie E představuje to, že článek se sám o sobě chová jako zdroj napětí. Dioda D zastupuje usměřovací účinek jako každá jiná dioda. Kondenzátor C reprezentuje její vnitřní kapacitu přechodu a kapacitu přívodních kontaktů. Odpory  $R_S$  a  $R_P$  jsou ohmické ztráty v článku a na přívodech. Náhradní schéma pomáhá lépe pochopit vlastnosti článku zapojeného do obvodu zejména, když je více článků pospojováno do modulů a když jsou články spojovány kratším nebo delším vedením [2].



Obrázek 4.1 Náhradní schéma solárního článku [2]

Údaje výrobce se vztahují k intenzitě osvětlení  $1\text{ kW/m}^2$ . Jestliže se nám bude intenzita záření snižovat, bude klesat proud i napětí naprázdno při konstantní teplotě (Obrázek 4.2). Dále je zřejmé, že napětí na prázdno, již při nízkém osvětlení ( $200\text{ Wm}^{-2}$ ), je téměř maximální [2].

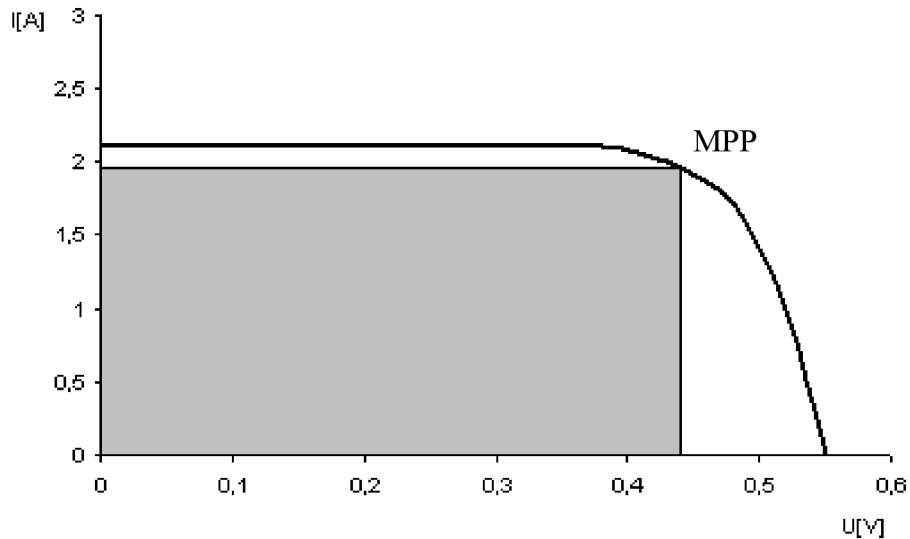


Obrázek 4.2 Voltampérová charakteristika solárního článku při různých osvětleních [2]

Při návrhu solárního zdroje je nutné vědět, kdy takový zdroj pracuje optimálně a dodává maximální výkon do zátěže. Jelikož výkon je součinem napětí a proudu

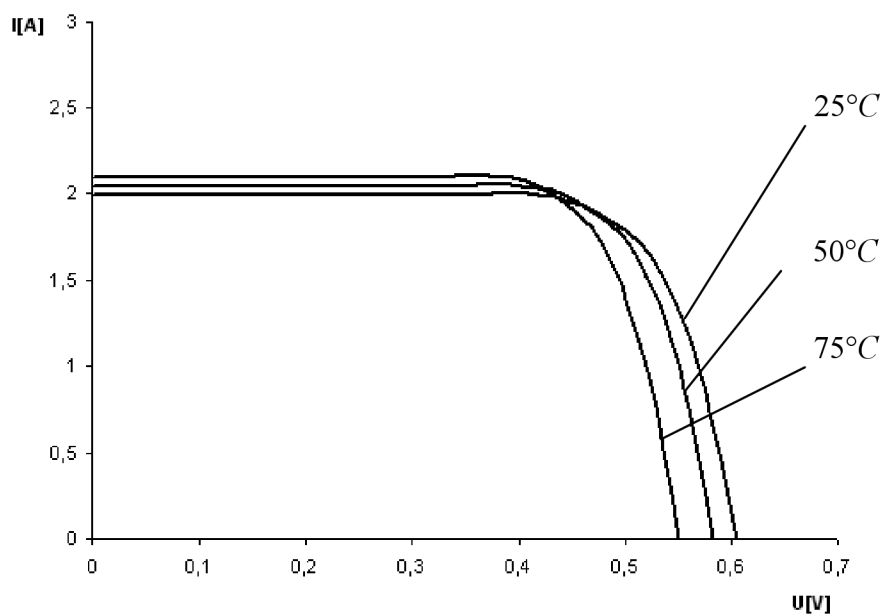
$$P = U \cdot I, \quad (4.1)$$

musí se na charakteristice vyskytovat bod, v němž tento součin bývá maximální (MPP – Maximum Power Point). Tento bod se vyskytuje v ohybu voltampérové charakteristiky, protože právě zde bude mít obdélník  $U \cdot I$  největší plochu (Obrázek 4.3). Chceme-li dodat do zátěže maximální výkon, musíme zvolit právě tento bod jako bod pracovní [2].



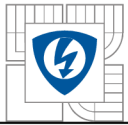
**Obrázek 4.3** Pracovní bod MPP [2]

Napětí a proud fotovoltaického článku jsou závislé na teplotě. Se zvyšující teplotou se mírně zvedá proud, ale mnohem rychleji klesá napětí článku. Při rostoucí teplotě tedy klesá maximální výkon dodávaný fotovoltaickým článkem při konstantní intenzitě osvětlení a tím klesá i účinnost fotovoltaické přeměny energie (Obrázek 4.4) [2].



**Obrázek 4.4** Voltampérová charakteristika solárního článku při konstantním osvětlení [3]





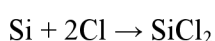
## 5. Výroba a typy fotovoltaických článků

Téměř všechny solární články (90%) se vyrábějí z křemíku. Výhoda je v tom, že se nejedná o vzácný prvek, v zemské kůře je obsažen 26-28% a právě proto je velice levný a snadno dostupný, není jedovatý a je i nejlépe prozkoumaným polovodičem. Vysoká cena je dána tím, že vyrobený polovodič musí mít velmi vysokou čistotu, až 99,9999999 % ale tato technologie je již dobře zvládnutá. Podle použité technologie výroby rozeznáváme [3]:

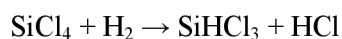
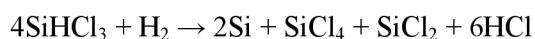
- Články z monokrystalického křemíku
- Články z polykrystalického křemíku
- Články a amorfního křemíku (tenkovrstvá technologie)

Do obloukové pece se shora vpravuje písek promíchaný s mletým karbonizovaným uhlím. Směrem ke dnu pece se zvyšuje teplota a v jednotlivých výškách probíhají chemické reakce. U dna s teplotou  $T \cong 2000^{\circ}\text{C}$  dochází k hromadění roztaveného křemíku, který se v pravidelných intervalech odlévá. Tímto postupem získáme křemík o hutní kvalitě a má čistotu 99%, kde 1% je tvořeno směsí Fe, Al a C. Pro technické využití je ale zapotřebí mnohem větší čistota. Je tedy nutné surový křemík dále vyčistit a vytvořit tím polotovar pro technické využití v polovodičové výrobě. K tomuto účelu existují další technologie, kde jednou z nejběžnějších je převod na kapalnou fázi a její destilací lze získat polotovar až čistoty tzv. ppb (nečistoty  $10^{-9}$ ), která je vhodná pro použití do integrovaných obvodů. Pro výrobu fotovoltaických článků je postačující nižší čistota, tzv. ppm (nečistoty  $10^{-6}$ ) [3].

Nejpoužívanější technologií je dnes Simens s chlórovým cyklem. Nejprve se převede křemík na těkavou sloučeninu tzv. trichlórorgan, která se čistí destilací podle zjednodušených rovnic [3]:



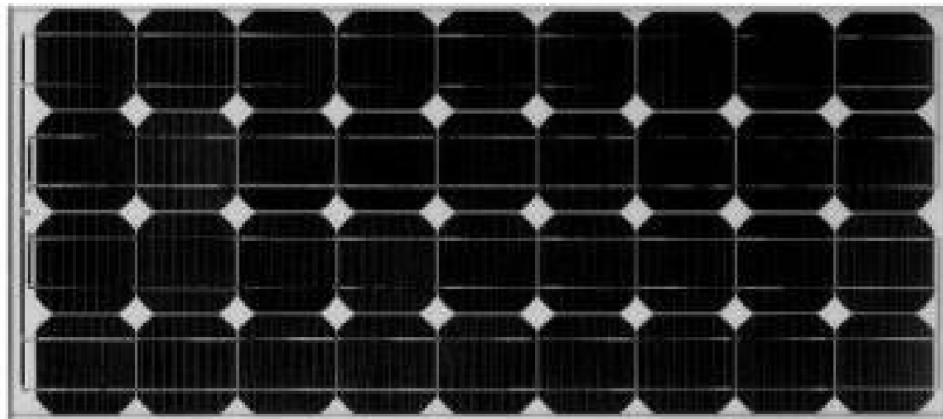
Nyní se z trichlórorganu vyredukuje křemík podle rovnic:



Tento chlórový výrobní proces je náročný na spotřebu energie, ochranu obsluhy i životní prostředí. V současné době se pracuje na dalších technologických postupech, které nepoužívají chlórový cyklus a tím tyto problémy odstraní. Pokud se tyto nové technologie osvědčí, podstatně sníží energetickou náročnost výroby čistého křemíku a tím i jeho cenu. Po tomto čistícím procesu dojde k vytvoření hrudek čistého křemíku, což je polotovar pro výrobu polykrystalických nebo monokrystalických ingotů [3].

### 5.1. Křemíkové monokrystalické články

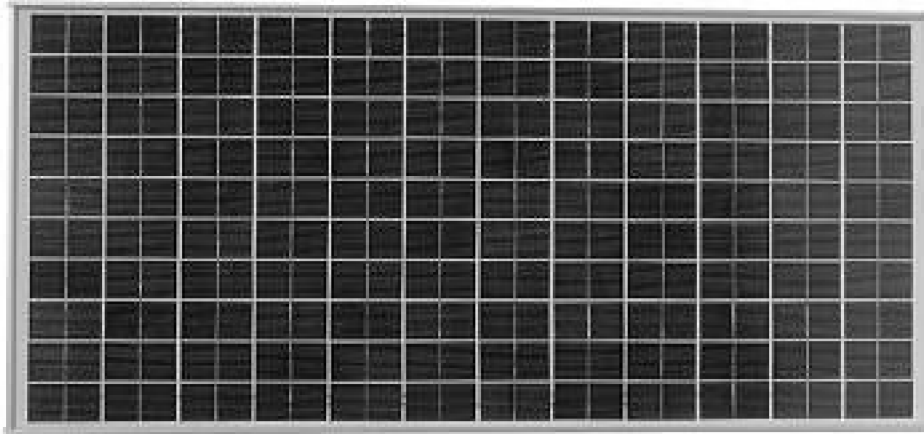
Jedná se o nejstarší typ fotovoltaického článku, vyznačují se dobrou účinností okolo 20% a dlouhodobou stabilitou. Výroba monokrystalických ingotů probíhá tzv. Czochralskiho metodou. Do taveniny o teplotě  $T \cong 1415^{\circ}\text{C}$  se ponoří malý monokrystal jako zárodek, který se velmi pomalu z taveniny vytahuje a přitom se otáčí kolem své osy. Takto vyrobené monokrystalické ingoty se řežou speciální drátovou pilou na plátky tenké 0,25-0,35 mm a teď i už 0,1 mm. Spolu s tloušťkou plátek se zmenšil i průřez. Plátky se zarovnají na rovnoměrnou tloušťku, vyleští a odleptají aby se odstranily nečistoty. Přechod P-N se na destičce vyrobí přidáním fosforu, který vytvoří vrstvu typu n. Existuje způsob jak tuto technologii výroby zlevnit, možností je rovnou táhnout z taveniny tenký monokrystalický pásek, který se řeže snadněji při menším odpadu křemíku. Takto se dá vyrobit dvakrát větší plocha článků, ale s nižší účinností (Obrázek 5.1) [3].



Obrázek 5.1 Monokrystalický modul [4]

### 5.2. Články z polykrystalického křemíku

Je dnes nejběžněji používaným článkem. Výrobní proces je mnohem jednodušší než u monokrystalu. Materiál se roztaví a poté nalévá do formy, kde se nechá pomalu chládnout. Chladicí proces musí být pomalý, aby se vytvořila co největší monokrystalická zrna a aby bylo v materiálu co nejmenší množství dislokací, pnutí apod. Takto vyrobený ingot se řeže podobně jako monokrystal. Odlévání je výhodnější metoda než tažení z důvodu nižší spotřeby materiálu, jelikož lze připravit bloky se čtvercovým nebo obdélníkovým rozměrem. Vyznačují se nižší účinností okolo 13 až 16 %, protože na styku jednotlivých krystalových zrn je větší odpor. Výsledkem je ale mnohem levnější článek a lze ji vyrábět ve větších velikostech a obdélníkových tvarů. Jejich hlavní nevýhodou je menší účinnost a nižší dlouhodobá stabilita (Obrázek 5.2) [3].



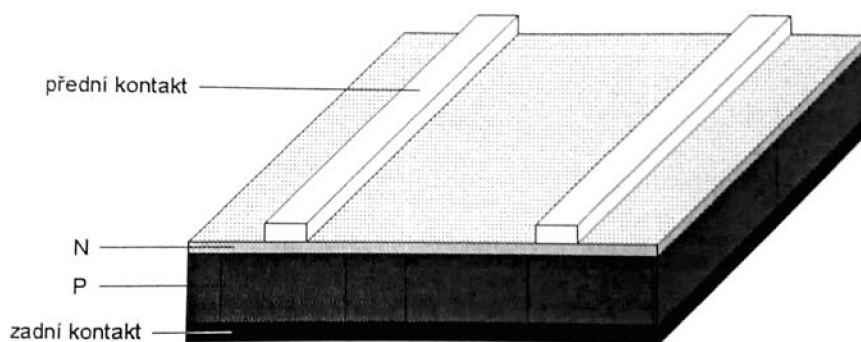
Obrázek 5.2 Polykrystalický modul [4]

### 5.3. Struktura krystalických solárních článků

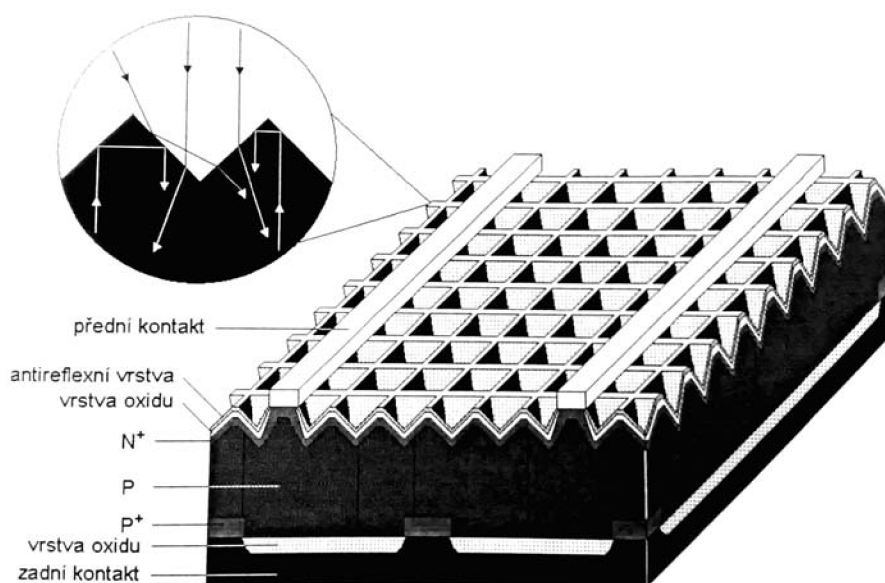
Již dříve bylo řečeno, že solární článek je velkoplošnou diodou s přechodem PN orientovaný kolmo k čelní ploše. Difúze příměsí pro vytvoření PN přechodu probíhá v tzv. difuzních pecích. Na přední stranu bývá nanесena antireflexní vrstva pro omezení odrazu, aby došlo k využití co největšího množství záření a proto se články s největší účinností jeví jako černé. Přední kontakt se vyrábí tvaru mřížky nebo hřebínku tak, aby zakrýval co nejmenší plochu článku, zadní kontakt bývá většinou celoplošný. Kontakty se vytvářejí sítotiskovou technologií nebo náročnějšími postupy jako je vakuové napařování. Existují i speciální články, které mají kontakty vnořené do materiálu polovodiče [3].

Jednoduchý model solárního článku je na Obrázku 5.3. Konstrukce takto vytvořeného článku sice bude fungovat, ale bude mít také nízkou účinnost v důsledku rekombinačních ztrát. Proto je nutné použít jistá konstrukční zdokonalení, která jsou zřejmá z Obrázku 5.4 [3].

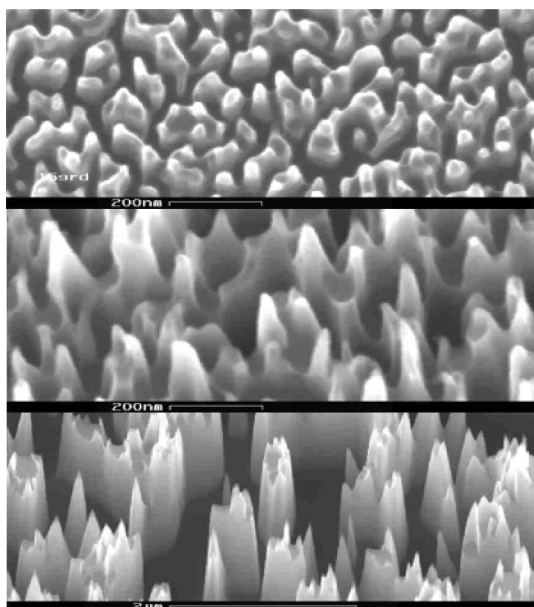
Materiál fotovoltaických článků má poměrně značně velký index lomu, dochází tudíž k odrazu části dopadajícího záření zvláště, jestliže paprsek dopadá pod malým úhlem. Na přední straně je vytvořena antireflexní vrstva, aby nedošlo k odrazu dopadajícího záření mimo článek do prostoru. Tím je zajištěno, že maximum fotonů se dostane do oblasti přechodu PN. Vrstvy nevodivého oxidu  $\text{SiO}_2$  chemicky pasivují povrch a jen v určitých místech dochází k odvádění náboje. Vyleptáním jehlanovité struktury na přední straně článku způsobí, že fotony snadněji vstoupí dovnitř článku (Obrázek 5.4) (Obrázek 5.5). Pokud ale projdou, aniž by vyvolaly fotovoltaickou přeměnu energie, odrazí se od zadní elektrody a nemohou na přední straně vystoupit z článku a jsou totálním odrazem vráceny zpět. Znovu tedy fotony procházejí přes přechod PN a tím zvyšují pravděpodobnost fotovoltaické přeměny energie [3].



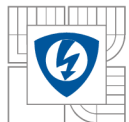
Obrázek 5.3 Struktura jednoduchého modelu solárního článku [3]



Obrázek 5.4 Struktura solárního článku [3]



Obrázek 5.5 Mikroskopické snímky struktury vzniklé leptáním [5]



Další zvýšení účinnosti článku je dosaženo oboustrannou texturací povrchu článku. Znamená to, že mají PV články na přední i na zadní straně stejnou strukturu, fotony tedy mohou dopadat současně z obou stran (na zadní stranu např. od odrazu podlahou) a tím získává článek mnohem větší účinnost. Nicméně je množství energie vyrobené dopadem ze zadní strany větší než strany přední, protože fotony kratších vlnových délek jsou pohlcovány už v silnější vrstvě polovodiče a nedorazí až k přechodu PN. Pokud je panel nainstalován na bílé nebo stříbrně natřené střeše, je množství dopadajícího záření ze zadní strany velice významné, uvádí se zvýšení produkce energie až o 30% [3].

Průhledné kontakty jsou také řešením pro vyšší účinnost panelu. Odvod elektrického proudu ze zadního kontaktu nepředstavuje žádný problém, mřížka na vrchní straně ale brání průchodu fotonů do PN přechodu proto se někdy používají průhledné kontakty zpravidla z oxidu cínu [1].

#### 5.4. Články z amorfního křemíku

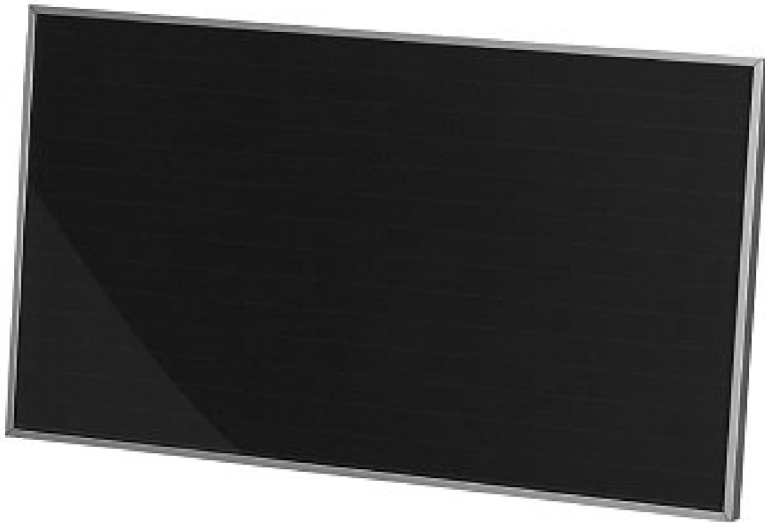
Amorfni křemík se používá relativně krátkou dobu, přibližně od roku 1985 ale samotná technologie je známá již mnohem dříve, kdy jsme se s ním mohli setkat jako se zdrojem pro napájení kalkulaček. Amorfni látky jsou látky pevné, které nemají pravidelnou strukturu jako křemík. Uspořádání částic je zcela náhodné, určité zákonitosti existují pouze v polohách navzájem sousedních atomů. Přestože jsou to látky pevné, je možné je považovat za kapaliny s velmi vysokou viskozitou. V přírodě vznikají při rychlém ochlazení taveniny, kdy částice nemají dostatek času vytvořit krystalickou strukturu [2].

Výhodou je, že při sériové výrobě jsou znatelně levnější, protože se na výrobu spotřebuje menší množství materiálu. Má větší absorpci slunečního záření a tudíž se mohou vyrábět podstatně tenčí, amorfni křemík je nanášen do vrstev nepřesahujících 0,001 mm. Jsou vyráběny ve vakuové komoře při teplotách 200°C, kdy napařováním se nanáší malá vrstva amorfniho křemíku na podkladový materiál [2].

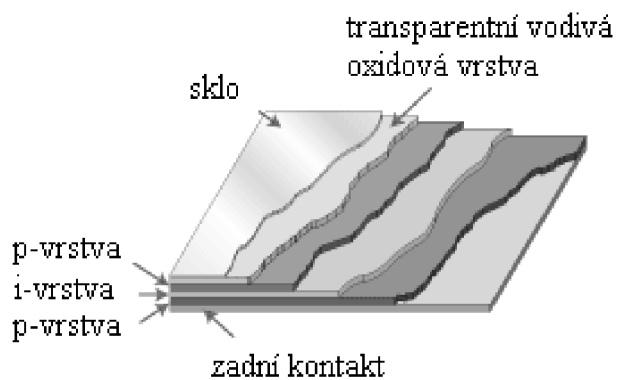
Takto se dají připravit tenké vrstvy křemíku, které se mohou nanášet na skleněné, platové nebo nerezové podložky. Tím dochází k využívání např. k výrobě fotovoltaických článků jako součást oblečení nebo batohu ve vojenské technice k napájení elektroniky. Vyrobený materiál je amorfni, to znamená, že nemá pravidelnou krystalickou mřížku a obsahuje částečně i vodík. Obsahuje velké množství poruch a některé atomy kolem sebe nemají potřebné sousedy se kterými by mohli vytvořit vazbu a na těchto místech dochází k rekombinaci a snižování účinnosti. Částečně jde tento problém odstranit nanášením vodíku na tyto volné vazby. Účinnost těchto článků časem klesá a ustálí se asi na 80% původní účinnosti, protože je nestabilita způsobená vodíkem, který se reaguje s kyslíkem oxidací [1]. Amorfni křemíkové látky produkují prvních 60 hodin asi o 30% více energie než je jejich jmenovitý výkon. Poté je pak výkon o 15% vyšší, ale během následujícího roku se ustálí na jmenovitém výkonu (jev nazývaný jako Staebler-Wronski efekt). Oproti krystalickému křemíku má amorfni nižší teplotní součinitel výkonu, jeho účinnost tedy s rostoucí teplotou klesá podstatně pomaleji [6].

Složení tohoto článku je poněkud atypické. Mezi velmi tenkou horní vrstvou typu P a vrstvou N je vrstva vlastního polovodiče I, ve které dochází k pohlcení většiny záření a vytvoření volných elektronů a

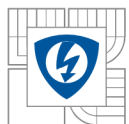
děr (Obrázek 5.7). Elektrické pole zasahuje přes vrstvu v níž byly vytvořeny díry a elektrony způsobuje okamžitou separaci a tím se snižuje pravděpodobnost rekombinace. Účinnost je tedy pouze okolo 7% [1].



Obrázek 5.6 Amorfni modul [4]



Obrázek 5.7 Struktura amorfniho křemíku [7]



## 5.5. Další fotovoltaické materiály

### 5.5.1. Galiumarsenid (arsenid galitý, GaAs)

Jedná se o monokrystalické tenkovrstvé články, jejichž vlastnosti je možné měnit dle potřeby. Dá se u nich měnit poměr Ga/As a také použít různé dopující látky (Al, P, Sb, In). Vyznačují se vysokou absorpcí slunečního záření, tudíž stačí jen malá tloušťka (několik mikrometrů) k tomu, aby zachytil téměř všechny fotony a přeměnil je v energii elektrickou. Mají menší teplotní součinitel než křemíkové materiály, tudíž se používají v tepelných instalacích např. v systémech s koncentrátory záření. Díky těmto vlastnostem mají tedy vyšší účinnost než křemíkové materiály. Galiumarsenid se také používá pro vícepřechodové články. Nevýhodou je že galium je poměrně vzácně se vyskytující kov (vzácnější než zlato) a arsen je značně jedovatý prvek [1].

### 5.5.2. Diselenid mědi a india (CuInSe<sub>2</sub>, CIS)

Tyto prvky se vyznačují vysokou absorptivitou pro sluneční záření a vyrábějí se tedy velmi tenké, až 99% fotonů se pohltí v prvním mikrometru. Dosahují velice slušné účinnosti, v laboratořích až 18%, což je s ohledem na to, že se jedná o tenkovrstvé články, poměrně dost. Na trhu již existují články typu CIS, používá se i varianta obsahující navíc i galium (copper indium gallium diselenide, Cu(InGa)Se<sub>2</sub>, CIGS) [1].

### 5.5.3. Telurid kadmia (cadmium telluride, CdTe)

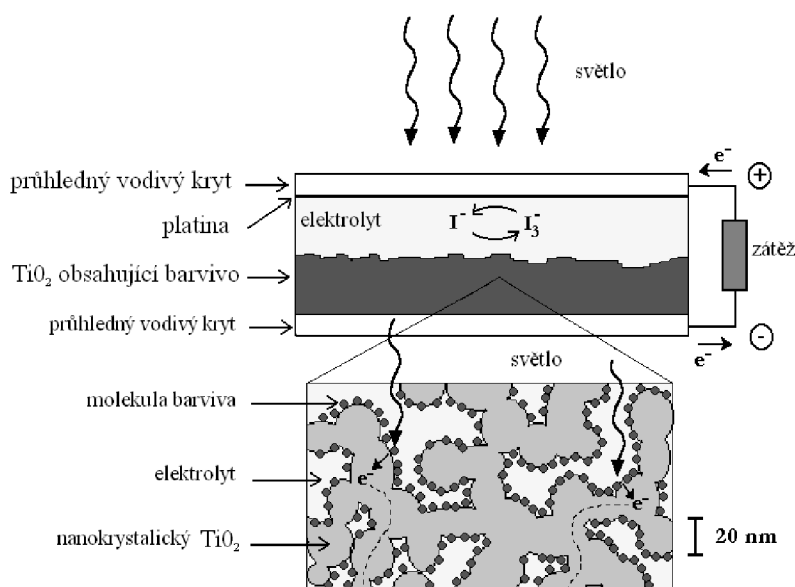
Tento materiál má ideální vzdálenost mezi valenčním a vodivostním pásem 1,44eV a velkou absorptivitu slunečního záření, ale není lepší než křemík. Články z CdTe lze podobně jako CIS vyrábět nízkonákladovými technologiemi [1].

### 5.5.4. Články z organických látek

Vývoj článků z těchto látek se zaměřuje hlavně na nízkou cenu, pružnost a ohebnost. Technologie pro výrobu fotovoltaických článků z organických materiálů se jeví jako velice slibné a je zde obrovské množství možností, ale zatím se jedná o obor velice nepřehledný a stále ještě málo využívaný [1].

Fotovoltaické články s organickým barvivem se také někdy nazývají podle Graetzela, který v 90. letech vytvořil pomocí ultrajemného TiO<sub>2</sub> na tomto principu články s obstojnou účinností. Článek se skládá z vrstvy porézního a vysoce jemného oxidu titaničitého, tzv. nanokrystalický, protože rozměry jeho krystalů jsou řádově několik desítek nanometrů, ve kterém je nasáknutý vodný roztok elektrolytu obsahující redox dvojici (např. jód/jodid) a vhodné barvivo (organický komplex ruthénia). Barvivo zachytí foton, vytvoří excitovaný stav a elektron je přenesen na TiO<sub>2</sub>, tím je barvivo převedeno na oxidový stav. Elektron projde přes strukturu TiO<sub>2</sub> na průhlednou elektrodu a je odveden do vnějšího obvodu. Obvod se uzavírá tak, že na druhé elektrodě je elektron vystupující z vnějšího obvodu na jód a je vytvořen

trijodidový anion a ten redukuje oxidovou formu barviva, které je tímto připraveno na přijetí dalšího fotonu (Obrázek 5.8) [1].



**Obrázek 5.8** Struktura článku s oxidem titaničitým a organickým barvivem [8]

Základní výhodou jsou menší nároky na čistotu výrobních materiálů. Nevýhodou jsou problémy s kapalným a korozivním elektrolytem, který musí být v článku dokonale uzavřen a se stabilitou použitého barviva, které musí vydržet dlouhou dobu pod stálým slunečním svitem a nesmí se rozkládat. Již bylo dosaženo účinnosti až 7,3% [1].

I zde se výrobci snaží o použití nanostruktur. Namísto běžného mikrokrystalického oxidu titaničitého se vytvoří na skleněné podložce pokryté vodivou vrstvou oxidu cínu tenká vrstva kovového titanu. Na něm se poté elektrolytickou oxidací vytvoří vrstva oxidu titaničitého ve formě nanotrubiček, které se zahřátím převedou do krystalické, téměř průhledné podoby. Ty se pak propojí pomocí elektrolytu s organickým barvivem [1].

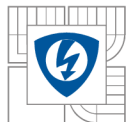
### 5.5.5. Nanostuktury

V poslední době se vyvíjejí technologie, které umožní připravit dostatečně malé struktury, tzv. kvantové tečky. V těchto strukturách se uplatňuje efekt zvaný quantum confinement, který umožňuje nastavit libovolnou šířku pásma. Výhodné je to, že takové nanostruktury by bylo možné nanášet na povrch vhodného substrátu naléváním suspenze v odstředivce. Účinnost této technologie je ještě stále nízká, asi kolem 3% [1].

### 5.5.6. Fotovoltaické články z vodivých polymerů

Jedná se o jistou analogii fotovoltaických článků s p-n přechodem. Ve směsi vodivých polymerních molekul, kde jedna má elektronakceptorové vlastnosti a druhá elektrondonorové vlastnosti, dojde pohlčením fotonu ke vzniku páru elektron-díra a za jistých podmínek dojde k přenosu náboje na





elektronakceptorovou molekulu. Elektronodonorová molekula se používá poly (3-oktyl-thiofen). Jako akceptor elektronů slouží uhlíková nanotrubička (např. komerčně dostupný carbolex). Jedná se o velice zajímavou podobu uhlíku, je to jedna vrstva grafitu svinutá do podoby duté trubice.

Nastávají zde jisté problémy s účinností. Hybnost elektronů v organických látkách je menší v látkách anorganických polovodičů. Je zde tedy větší šance k rekombinaci nábojů. Problém je v existenci kyslíku, který je jen těžko ze struktury vyloučen [1].

### 5.5.7. Vícepřechodové struktury (multijunction)

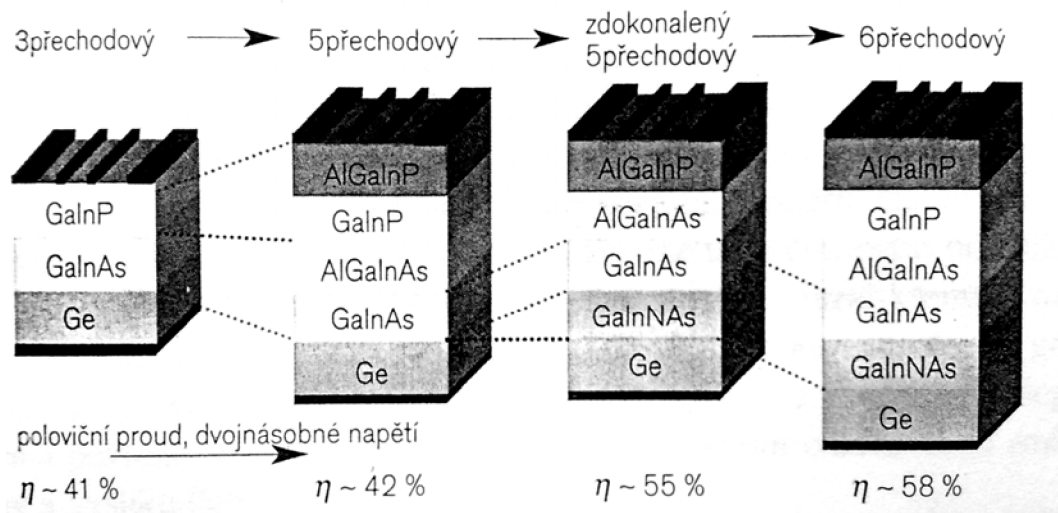
Jestliže má fotovoltaický článek pouze jeden přechod p-n, jeho účinnost je závislá na tom, jakou část spektra dokáže využívat a dále na tom, jaká část energie fotonu se přemění na elektrický proud a jaká na teplo. Pokud je šíře zakázaného pásu malá, pak skoro všechny elektrony dokážou excitovat elektron, ale na úkor nižšího napětí, které je závislé na šíři zakázaného pásu. Pokud je šíře zakázaného pásu větší, dosáhneme většího napětí článku, ale opět méně fotonů dokáže být využito. Bylo tedy zjištěno, že existuje optimální šíře zakázaného pásu, kdy je účinnost článku největší. Křemíkové články jsou velice blízko této hranice. Pro kosmické účely, kdy není hlavním parametrem cena fotovoltaického systému, se konstruují články z GaAs [1].

Pokud se ale vytvoří vícevrstvá struktura z GaAs, kdy je určitá část optimalizována pro svou část slunečního spektra, pak je možné dosáhnou lepšího využití slunečního spektra a tím i účinnosti. Tyto vícevrstvé struktury sice generují nižší proud, ale tento nedostatek je bohatě vykompenzován napětím článku [1].

Ve slunečním spektru jsou fotony o různých vlnových délkách. Fotony s nižší energií než je šířka zakázaného pásu projdou přechodem p-n bez předání energie polovodiči, fotony s vyšší energií předají pouze energii odpovídající šířce zakázaného pásu a zbytek se přemění v teplo. Vícepřechodové struktury dokáží tedy teoreticky využít plné sluneční spektrum s nižšími tepelnými ztrátami, což vede k větší účinnosti [1].

Vrstvené struktury se konstruují tak, že ve vrchní vrstvě je polovodič zachycující elektrony s vyšší energií, fotony s nižší energií propouští na další vrstvy, kde jsou poté taky zachyceny. Používané materiály pro jednotlivé vrstvy jsou intermetalické sloučeniny prvků 3. a 4. skupiny např. InP, GaSb, GaAs. Pečlivým nastavením složení lze vyladit šířku zakázaného pásu tak, aby využita téměř veškerá dopadající energie na článek [1].

V současné době jsou k dispozici třívrstvé články, pracuje se na vývoji čtyřvrstvých a šestivrstvých struktur (Obrázek 5.9).

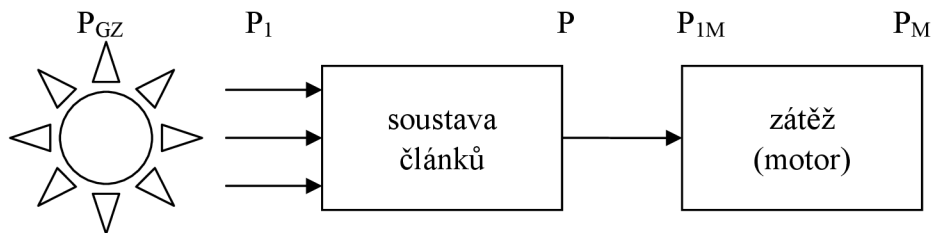


**Obrázek 5.9** Vícepřechodové struktury [1]

Podstatnou nevýhodou je cena víceřechodových struktur vzhledem ke klasickým křemíkovým článkům, proto se často používají ve spojení s vhodnými koncentrátorem, který umožní snížit plochu článku a zlepšit tím užité hodnoty k ceně [1].

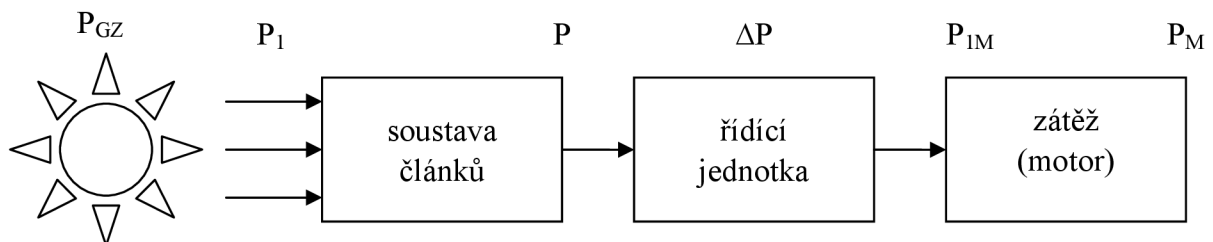
## 6. Návrh soustavy solárních článků

Princip napájení soustavou solárních článků není jednoduchý, jak se na první pohled zdá. Návrh bez řídicí jednotky je funkční a jednoduchý princip, ale jeho nedostatek nastane právě tehdy, kdy intenzita slunečního záření bude tak malá, že zátěž neprovede žádnou práci. Použité solární články totiž nedokáží vyrobit při nízké intenzitě dostatek energie pro trvalý chod motorku (Obrázek 6.1).



Obrázek 6.1 Návrh bez řídicí jednotky

Proto je vhodné akumulovat vyrobenou energii v kondenzátoru a zátěž zapínat až po nashromáždění určité energie. K tomuto účelu slouží řídicí jednotka s astatickým klopným obvodem (Obrázek 6.2). Tímto tématem vhodného obvodu by se mohla zabývat pozdější diplomová práce. Prozatím nás bude zajímat pouze návrh bez řídicí jednotky.



Obrázek 6.2 Návrh s řídicí jednotkou

$P_{GZ}$ ...výkon globálního záření

$P$ ...výkon dodávaný soustavou článků

$P_{IM}$ ...příkon zátěže

$P_M$  ... výkon zátěže

$\Delta P$ ...úbytek výkonu na řídicí jednotce

### 6.1. Zátěž

Jestliže provádíme návrh solárního napájecího systému, je nutné tento zdroj dimenzovat podle požadovaného výkonu zátěže. Napájenou zátěží je pro náš případ DC motorek s permanentními magnety nízkého výkonu. Motor vyrábí firma Jomita ([www.megamotor.cz](http://www.megamotor.cz)), typová třída E2430 a prodejní cena 212Kč. Jedná se o značně malý motor o hmotnosti 44g s průměrem pláště 24mm a délkou pláště 30,5mm.

**Katalogové hodnoty navrženého motoru:**

$$U_M = 2,5 \div 6V$$

$$U_{Mn} = 6V$$

$$I_{Mn} = 1,5A$$

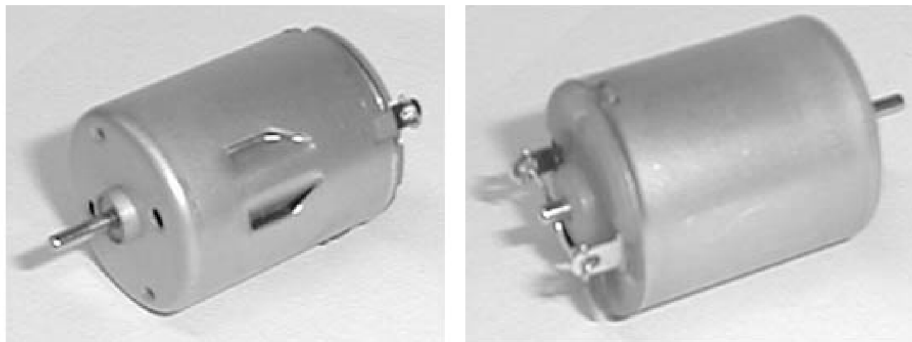
$$P_{1M} = U_{Mn} \cdot I_{Mn} = 6 \cdot 1,5 = 9W \quad (6.1)$$

$$n_M = 11950 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$P_{Mn} = 4,9W$$

$$M_{Mn} = \frac{P_n}{\omega} = \frac{P_n}{2\pi \cdot \frac{n}{60}} = \frac{4,9}{2\pi \cdot \frac{11950}{60}} = 3,9mNm \quad (6.2)$$

$$\eta = \frac{P_{Mn}}{P_{1M}} \cdot 100 = \frac{4,9}{9} \cdot 100 = 54,4\% \quad (6.3)$$

**Obrázek 6.3** Řízený motor firmy Megamotor E2430**6.2. Soustava solárních článků**

Navrhovaným zdrojem jsou monokrystalické křemíkové články firmy RoHS-Konform s technickými parametry:

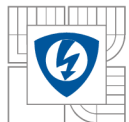
$$U_n = 0,45V$$

$$I_n = 0,77A$$

rozměr článku :  $a = b = 50mm$

$$P_n = U_n \cdot I_n = 0,45 \cdot 0,77 = 347mW \quad (6.4)$$

cena: 245 Kč s DPH



### 6.2.1. Návrh soustavy pro jmenovité hodnoty motorku

Maximální dodávaný výkon soustavou článků by neměl být větší než je maximální příkon zátěže, mohlo by dojít k poškození motoru:

$$P_{\max} < P_{M\max} \quad (6.5)$$

Budeme tedy dimenzovat soustavu solárních článků na jmenovité hodnoty motoru: výkon  $P_{1M}=9W$ , napětí  $U_{Mn}=6V$  a proud  $I_{Mn}=1,5A$ . Z technických parametrů článku již můžeme zvolit počet potřebných článků pro napájení:

$$N = \frac{P_{1M}}{P_n} = \frac{9}{0,347} = 25,9 \cong 26 \quad (6.6)$$

Je tedy zřejmé, že jestliže budeme chtít, aby motor pracoval při jmenovitém výkonu, musíme jej napájet 26ti navrhovanými články. Nyní je nutné vytvořit sérioparalelní zapojení tak, abychom dosáhli jmenovitých hodnot motoru napětí  $U_1$  a proudu  $I_1$ .

Řadíme-li  $N_S$  článků sériově, získáme napětí:

$$U_{Mn} = N_S \cdot U_n \quad (6.7)$$

$$N_S = \frac{U_{Mn}}{U_n} = \frac{6}{0,45} = 13,3 \cong 13 \quad (6.8)$$

Řadíme-li  $N_P$  článků paralelně, získáme proud:

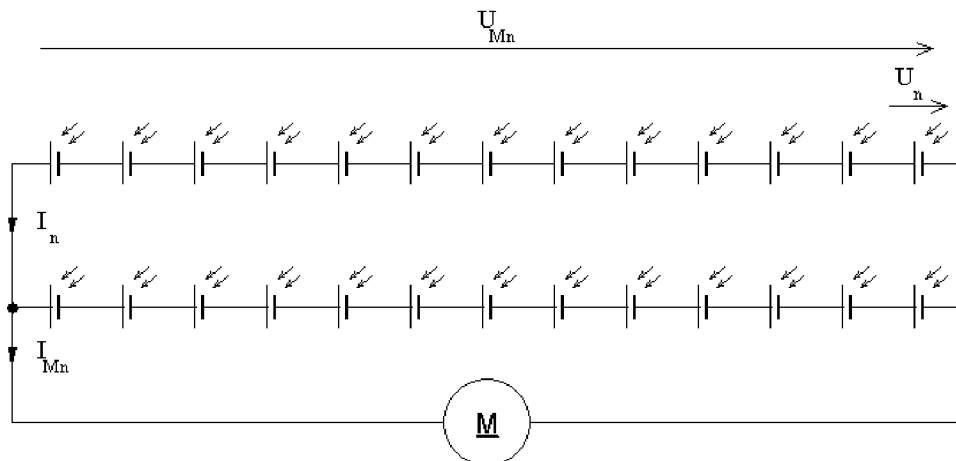
$$I_{Mn} = N_P \cdot I_n \quad (6.9)$$

$$N_P = \frac{I_{Mn}}{I_n} = \frac{1,5}{0,77} = 1,95 \cong 2 \quad (6.10)$$

Z výpočtů je tedy patrné, že návrh bude obsahovat 13 sériově zapojených článků po dvou větvích (Obrázek 6.5). Nyní ještě pro kontrolu spočítáme výkon dodávaný soustavou:

$$P = N_S \cdot N_P \cdot P_n = 26 \cdot 0,347 = 9,022W \quad (6.11)$$

Bude-li tedy na soustavu článků dopadat solární energie o intenzitě  $1000W \cdot m^{-2}$ , bude motor napájený jeho jmenovitým výkonem 9,022W.



**Obrázek 6.4** Navržená soustava článků pro jmenovité hodnoty motoru

Jelikož navrhovaná soustava má být funkční jako zdroj pro model automobilu, je dalším zásadním parametrem plocha, kterou budou panely zaujímat. Platí tedy:

$$S = N \cdot a \cdot b = 26 \cdot 0,05 \cdot 0,05 = 0,065m^2 \quad (6.12)$$

Z technických důvodů je tak velká plocha nevhodná, jestliže by se jednalo o čtvercovou plochu byla by délka strany  $\sqrt{0,065} \cong 0,26m$ . Proto se nyní pokusíme navrhnout soustavu znovu pro nižší napětí motoru než je napětí jmenovité.

### 6.2.2. Návrh soustavy pro minimální napětí motorku

Výrobce motoru udává napájecí napětí v rozsahu  $U_M = 2,5 \div 6V$ , zvolíme tedy minimální napětí, abychom získali co nejmenší plochu a mohli umístit soustavu na model automobilu:

$$U_M = 2,5V$$

$$N = \frac{U_M}{U_n} = \frac{2,5}{0,45} = 5,55 \cong 6 \quad (6.13)$$

$$I_n = 0,77A$$

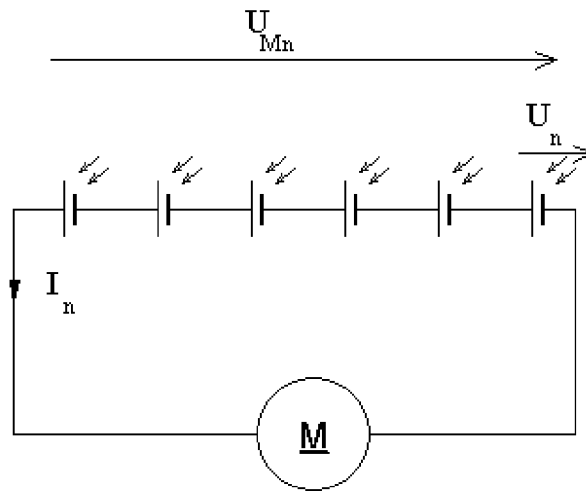
$$S = N \cdot s \cdot d = 6 \cdot 0,05 \cdot 0,05 = 0,015m^2 \quad (6.14)$$

Výkon dodávaný soustavou článků bude:

$$P = N \cdot P_n = 6 \cdot 0,347 = 2,082W \quad (6.15)$$

Navržená soustava pro napájecí napětí motoru 2,5V bude tedy složena z šesti sériově zapojených článků (Obrázek 6.6). Z finančního a konstrukčního hlediska bude tedy výhodnější použít méně článků, kde délka stran obdélníkového rozložení bude přibližně 10 a 15 cm. Samozřejmě bude mít takto napájený motor mnohem menší výkon než při jmenovitém napětí, ale jelikož model automobilu bude co nejvíce

odlehčen, bude výkon dostatečný. Pokusíme se pro takto zhotovený systém navrhnout i převodovku, která bude kompenzovat nižší výkon.



**Obrázek 6.5** Navržená soustava článků pro optimální napájení modelu

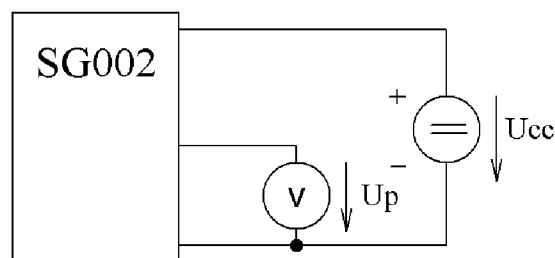
## 7. Měření na navržené soustavě solárních článků

Cílem měření bylo ověřit základní vlastnosti a funkčnost zhotoveného panelu, změřit V-A charakteristiku a porovnat tyto hodnoty s návrhem a katalogovými údaji poskytující výrobce.

### 7.1. Teoretický postup měření

Měření jsme prováděli na přímém slunečním záření, důvodem bylo co nejvíce se přiblížit provozním podmínkám solárního panelu. Měření pod umělým osvětlením by způsobilo zkreslení vlivem rozdílného spektrálního složení vzhledem ke slunečnímu záření.

1. K určení výkonu globálního záření ( $P_{GZ}$ ) jsme použili pyranometr SG002 (Obrázek 7.1). Přístroj funguje na principu teplotní difference vzniklé slunečním zářením na černé a bílé ploše. Vlivem teplotní difference vzniká na připevněných termočláncích napětí, které je po zesílení přímo úměrné intenzitě slunečního záření.



Obrázek 7.1 Schéma zapojení pyranometru

Technické parametry:

Měřicí rozsah ..... $\alpha=0\div 1200\text{Wm}^{-2}$

Výstup ..... $U_p= 0\div 2\text{V}$

Napájecí napětí ..... $U_{cc}=5\div 12\text{V}$

Časová konstanta.....50s

Přesnost měření..... $\pm 3\%$

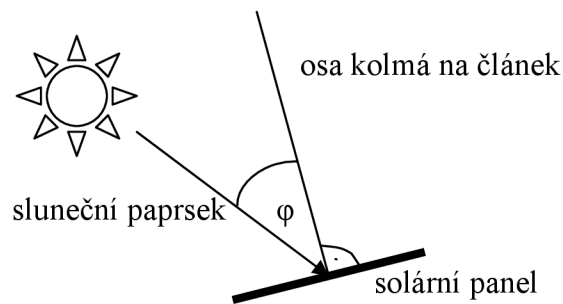
Globální záření  $P_{GZ}$  určíme:

$$P_{GZ} = U_p \cdot \frac{\alpha_{\max}}{U_{p_{\max}}} = U_p \cdot k_p \quad [\text{Wm}^{-2}] \quad (7.1)$$

$k_p$ ...konstanta pyranometru

2. Regulaci dopadajícího záření jsme prováděli natáčením solárního panelu pod různými úhly k ose dopadajícího paprsku. Pro tyto účely jsem vytvořil polohovač ze stavebnice Merkur, pomocí kterého jsme solární panel natáčely plynule na požadovaný úhel  $\varphi$  od slunečního paprsku (Obrázek 7.2).





**Obrázek 7.2** Princip měření úhlu odklonu od slunce

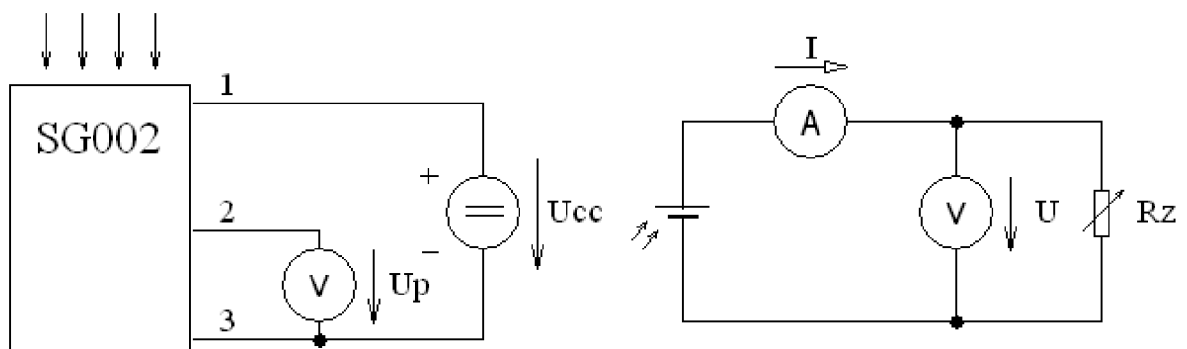
Známe-li hodnotu globálního záření a úhel  $\varphi$  pak sluneční výkon dopadající na panel  $P_1$  je:

$$P_1 = P_{GZ}(\varphi) \cdot S = P_{GZ} \cdot \cos \varphi \cdot S \quad [\text{W}] \quad (7.2)$$

$S$ ...plocha článků

Je tedy zřejmé, že pokud bude panel nakloněn od slunce pod úhlem  $\varphi$ , pak výkon dopadající na jeho plochu bude klesat s  $\cos \varphi$ .

## 7.2. Schéma zapojení úlohy



**Obrázek 7.3** Schéma zapojení úlohy pro měření V-A charakteristiky PV článku

## 7.3. Tabulky naměřených a vypočtených hodnot

Měření obsahuje tyto konstanty:

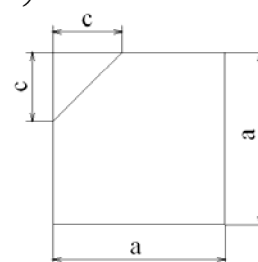
- Plocha článků  $S = N \cdot \left( a^2 - \frac{c^2}{2} \right) = 6 \cdot \left( 4,9^2 - \frac{2,2^2}{2} \right) = 129 \text{ cm}^2 = 0,0129 \text{ m}^2$  (7.3)

$N$ ...počet článků panelu

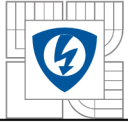
$a, c$  ...rozměry článku

- $U_p = 1,696 \text{ V}$

- $P_{GZ} = U_p \cdot \frac{\alpha_{\max}}{U_{p_{\max}}} = 1,596 \cdot \frac{1200}{2} = 957,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$



(7.4)



### 7.3.1. Úhel $\varphi = 0^\circ$

Použitím vztahu 7.2 pro výkon dopadající na panel dostaneme:

$$P_1 = P_{GZ} \cdot \cos \varphi \cdot S = 957,6 \cdot \cos 0^\circ \cdot 0,0129 = 12,35W \quad (7.5)$$

U	I		P	$\eta$	
V	$\alpha_A$	$k_A$	A	W	%
3,38	0	0,024	0,000	0	0,00
		120			
3,37	100		0,020	0,067	0,55
3,3	33	0,06	0,017	0,054	0,44
3,27	84	120	0,042	0,137	1,11
3,21	115		0,058	0,185	1,49
3,14	104	0,24	0,208	0,653	5,29
		120			
3,15	120		0,240	0,756	6,12
3,14	21		0,210	0,659	5,34
2,92	30		0,300	0,876	7,09
2,92	32		0,320	0,934	7,56
2,97	37		0,370	1,099	8,90
2,99	40		0,400	1,196	9,68
2,9	42		0,420	1,218	9,86
2,82	44		0,440	1,241	10,04
2,8	47		0,470	1,316	10,65
2,8	50		0,500	1,400	11,33
2,76	53		0,530	1,463	11,84
2,73	56		0,560	1,529	12,38
2,62	60		0,600	1,572	12,73
2,57	62		0,620	1,593	12,90
2,53	64		0,640	1,620	13,11
2,26	78		0,780	1,763	14,27
1,95	83		0,830	1,619	13,10
1,7	86		0,860	1,462	11,84
1,2	86	1,2	0,860	1,032	8,35
0,96	86	120	0,860	0,826	6,68
0	86,5		0,865	0,000	0,00

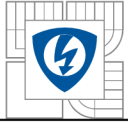
Tabulka 7.1 Měření V-A charakteristiky při  $\varphi=0^\circ$

#### Příklady výpočtů pro druhý řádek:

$$I = \alpha_A \cdot k_A = 100 \cdot \frac{0,024}{120} = 0,02A \quad (7.6)$$

$$P = U \cdot I = 3,37 \cdot 0,02 = 0,067W \quad (7.7)$$

$$\eta = \frac{P}{P_1} \cdot 100 = \frac{0,067}{12,35} \cdot 100 = 0,54\% \quad (7.8)$$

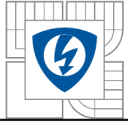


### 7.3.2. Úhel $\varphi = 30^\circ$

$$P_1 = P_{GZ} \cdot \cos \varphi \cdot S = 957,6 \cdot \cos 30 \cdot 0,0129 = 10,7W \quad (7.9)$$

U V	I			P W	$\eta$ %	
	$\alpha_A$	$k_A$	A			
3,35	0	0,024	0,000	0,000	0,00	
3,34	110	120	0,022	0,073	0,69	
3,31	32	0,06	0,016	0,053	0,49	
3,28	53		0,027	0,087	0,81	
3,26	68		0,034	0,111	1,04	
3,24	82		120	0,041	0,133	1,24
3,16	100		0,050	0,158	1,48	
3,13	67		0,24	0,134	0,419	3,92
3,11	90		120	0,180	0,560	5,23
2,99	118		1,2	0,236	0,706	6,59
2,97	28			0,280	0,832	7,77
2,85	40			0,400	1,140	10,65
2,69	50	0,500		1,347	12,58	
2,52	60	0,600		1,511	14,12	
2,23	70	0,700		1,561	14,59	
2,04	73	0,730		1,489	13,92	
1,87	75	0,750		1,403	13,11	
1,79	75	0,750		1,343	12,55	
0,97	76	120		0,760	0,737	6,89
0	77	0,770	0,000	0,000	0,00	

Tabulka 7.2 Měření V-A charakteristiky při  $\varphi=30^\circ$



### 7.3.3. Úhel $\varphi = 60^\circ$

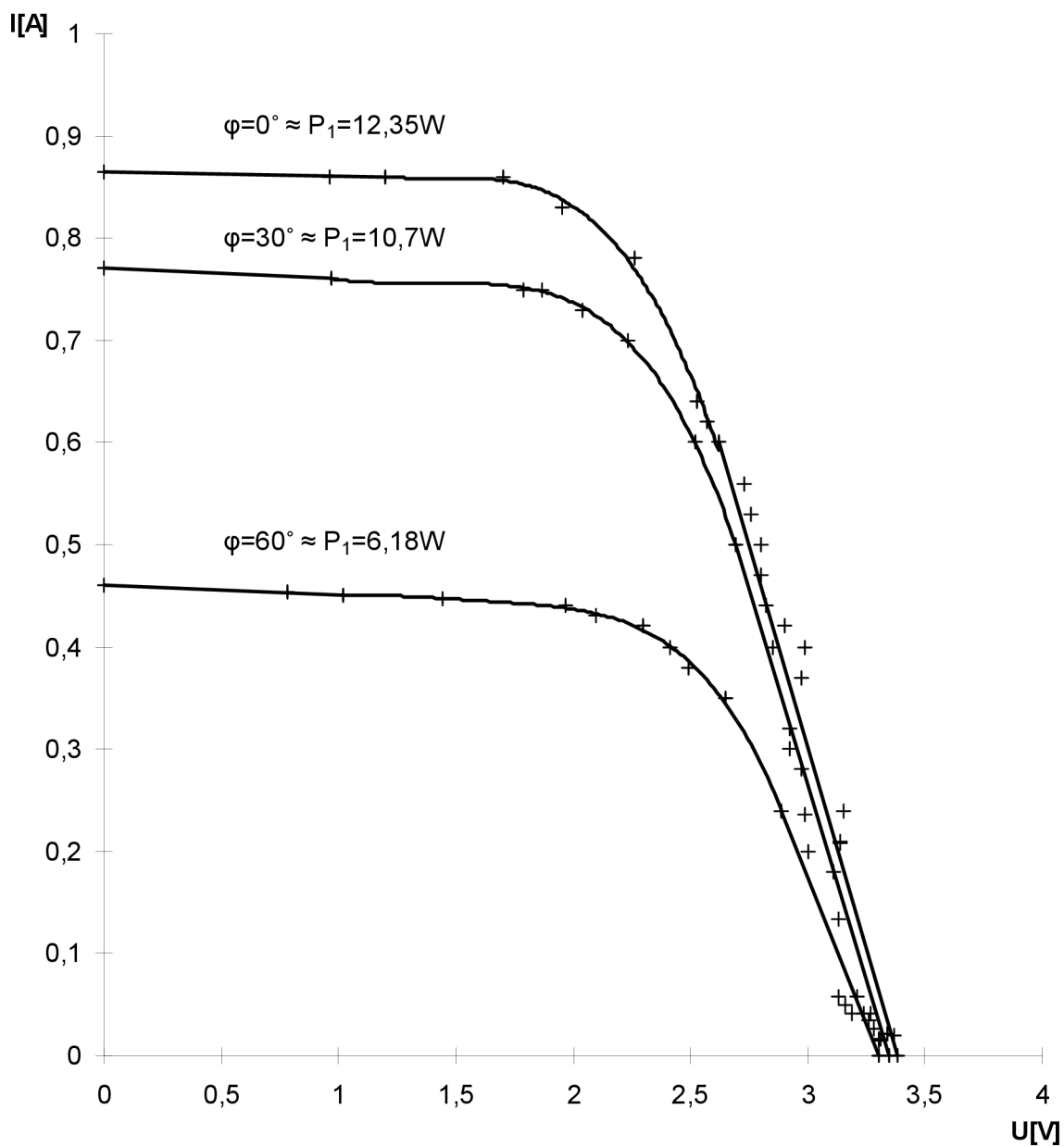
$$P_1 = P_{GZ} \cdot \cos \varphi \cdot S = 957,6 \cdot \cos 60 \cdot 0,0129 = 6,18W \quad (7.10)$$

U V	I			P W	$\eta$ %
	$\alpha_A$	$k_A$	A		
3,3	0	0,024	0,000	0,000	0,00
3,34	107	120	0,021	0,071	1,16
3,3	31	0,06	0,016	0,051	0,83
3,19	81	120	0,041	0,129	2,09
3,13	116		0,058	0,182	2,94
3	100	0,24	0,200	0,600	9,71
2,89	120	120	0,240	0,694	11,22
2,65	35		0,350	0,928	15,01
2,49	38		0,380	0,946	15,31
2,41	40		0,400	0,964	15,60
2,3	42		0,420	0,966	15,63
2,1	43		0,430	0,903	14,61
1,97	44		0,440	0,867	14,03
1,44	44,7		0,447	0,644	10,42
1,02	45	1,2	0,450	0,459	7,43
0,78	45,4	120	0,454	0,354	5,73
0	46		0,460	0,000	0,00

Tabulka 7.3 Měření V-A charakteristiky při  $\varphi=60^\circ$

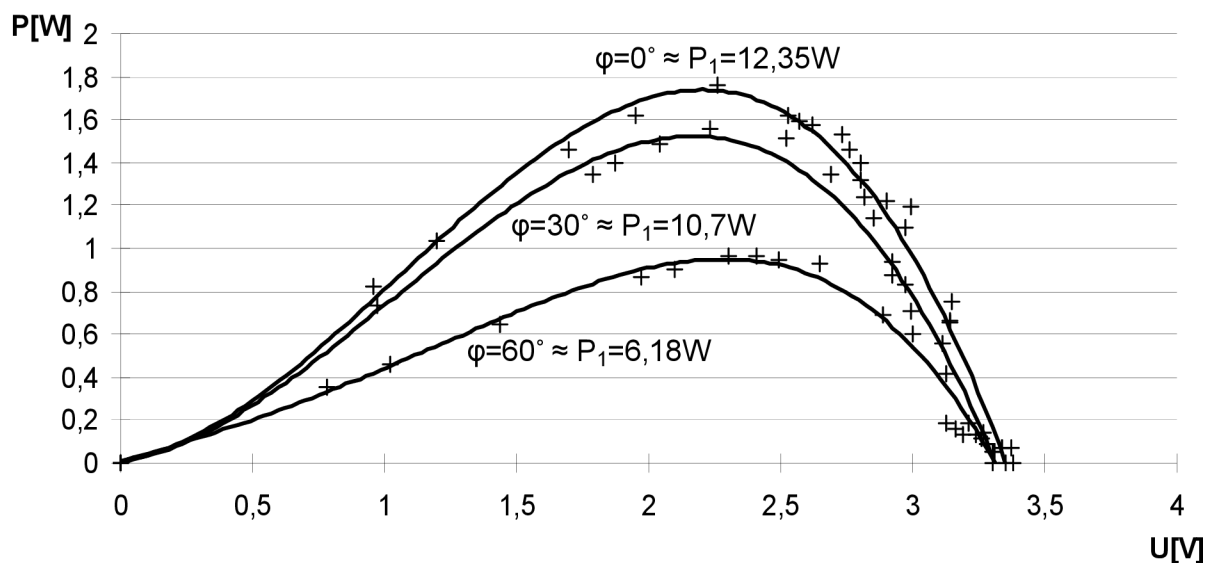
## 7.4. Grafické závislosti naměřených a vypočtených hodnot:

### 7.4.1. V-A charakteristika panelu



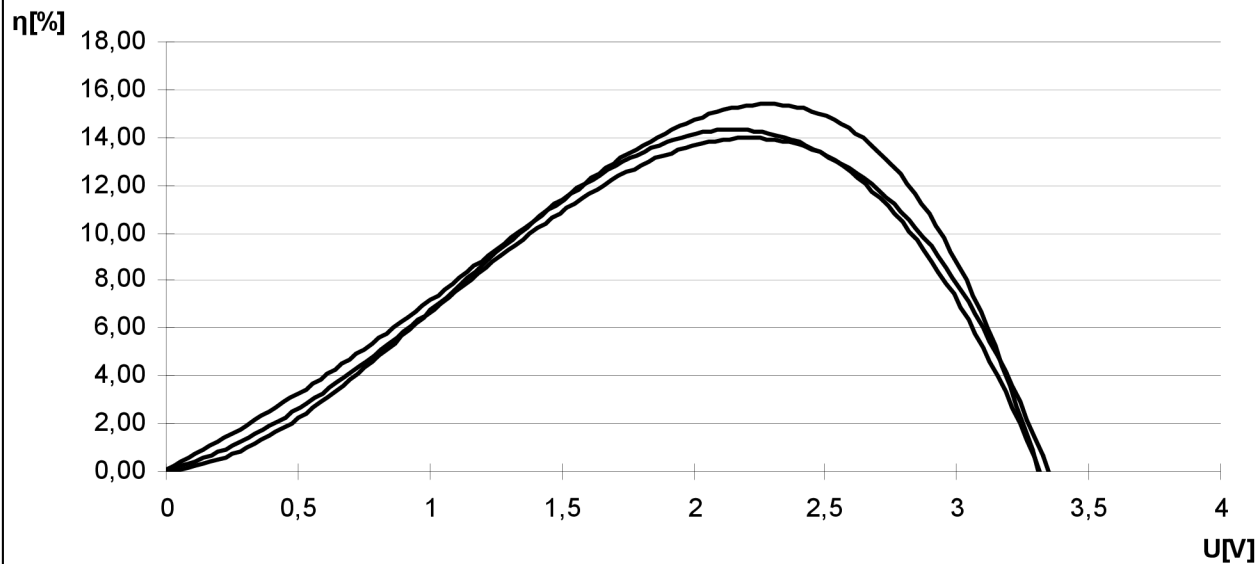
Obrázek 7.4 Změřená V-A charakteristika navržené soustavy článků

### 7.4.2. Graf závislosti výkonu na napětí PV panelu

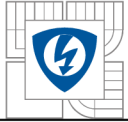


Obrázek 7.5 Graf závislosti výkonu na napětí navržené soustavy článků

### 7.4.3. Graf závislosti účinnosti na napětí PV panelu



Obrázek 7.6 Graf závislosti účinnosti na napětí navržené soustavy článků



## 7.5. Seznam použitých strojů a přístrojů

Pyranometr SG002 v.č: 002194588
Multimetr HP33120A v.č: 3146A780003
Stab. zdroj Statron NO:96020065
Vyrobená soustava solárních článků
Ampérmetr magnetoelektrický v.č:119768, 6A
Voltmetr magnetoelektrický v.č:119876, 600V
Potenciometr
Konstrukce pro polohování panelu-stavebnice Merkur

Tabulka 7.4 Seznam použitých strojů a přístrojů pro měření VA charakteristiky

## 7.6. Zhodnocení měření

Měřením jsme ověřili správnou funkci PV panelu za provozních podmínek. Vlivem povětrnostních podmínek, kdy foukal proměnlivý vítr, došlo k nepatrným chybám měření. Ochlazováním článku proudícího vzduchu dochází k mírnému snižování generovaného proudu, ale také k mnohem většímu zvýšení napětí, což má za důsledek zvýšení výkonu (Obrázek 7.4). Tyto odchylky měření jsme kompenzovali množstvím naměřených hodnot. Další chyby měření byly způsobeny třídou přesnosti měřících přístrojů, pyranometru a při nastavování úhlu svírající osa kolmosti panelu a sluneční paprsek.

Dále jsme sestrojili graf závislosti výkonu na napětí, ze kterého je zřejmé, že při napětí 2,3V dochází ke generaci maximálního výkonu, hovoříme o tzv. MPP- Maximum Power Point (viz. kapitola 4) (Obrázek 7.5).

Také jsme z vypočtených hodnot spočítali účinnost panelu, jejíž maximální hodnota byla 15,6% , což je typická hodnota pro monokrystalické články. Účinnost panelu úzce souvisí s MPP, proto hodnota maximální účinnosti nastala při 2,3V (Obrázek 7.6). Této vlastnosti se používá při výkonových aplikacích, kdy se využívají měniče napětí, které dokáží nastavit pracovní bod panelu do bodu maximálního výkonu a tím zvýší účinnost a návratnost celého systému.

## 8. Měření na modelu RC auta – Zatěžovací charakteristika

Úkolem bylo změřit zatěžovací charakteristiku pomocí dynamometru a zhodnotit naměřené hodnoty. Další částí je navrhnout vhodnou převodovku pro dosažení optimálních parametrů pohonu RC modelu auta pro dosažení požadované rychlosti auta.

Navzdory původnímu návrhu, kdy byla soustava navržena pro minimální hodnoty motoru jsme použili motor s jinými parametry firmy Megamotor, typ motoru: E2430-2865C-45C. Důvodů je hned několik. Při použití většího motoru by nemuselo docházet k dostatečnému buzení magnetického obvodu kotvy, motor by pracoval při nižší účinnosti a i celková hmotnost bude nižší.

### 8.1. Parametry použitého motoru:

$$U_M = 1,5 - 4,5V$$

$$U_{Mn} = 3V$$

$$n_{Mn} = 7000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$I_{Mn} = 1A$$

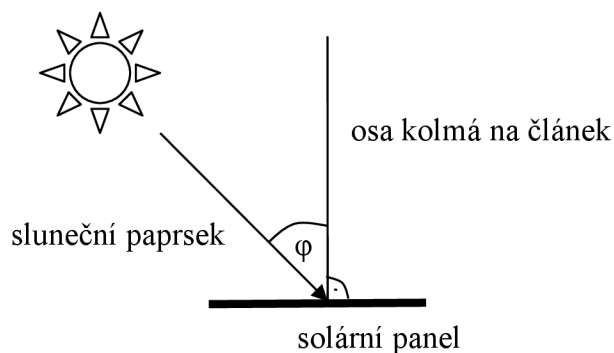
$$M_{Mn} = 2mNm$$

$$P_{Mn} = 1,4W$$

$$c\Phi_M = 1,82 \cdot 10^{-3} Vs$$

### 8.2. Postup měření

Měření jsme prováděli opět za provozních podmínek pod přímým slunečním zářením, kdy panel byl orientován ve vodorovné poloze, což pro naše sluneční podmínky znamenalo  $\varphi = 35^\circ$  (Obrázek 8.1).



Obrázek 8.1 Princip měření zatěžovací charakteristiky



Pro měření momentu a otáček jsme použili dynamo, kde otáčky spočítáme jako:

$$n_M = \frac{60 \cdot U_i}{2\pi \cdot c\Phi_D} [\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (8.1)$$

$U_i$ ... napětí na dynamu [V]

$c\Phi_D$ ... napěťová konstanta dynamu [Vs]

$$c\Phi_D = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{Vs}$$

Moment na hřídeli motoru je dán součtem změřeného momentu  $M_0$  a ztrát momentu na dynamu ( $M_Z + \beta\omega$ ):

$$M_M = M_0 + M_Z + \beta\omega = M_0 + M_Z + \beta \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60} [\text{Nm}] \quad (8.2)$$

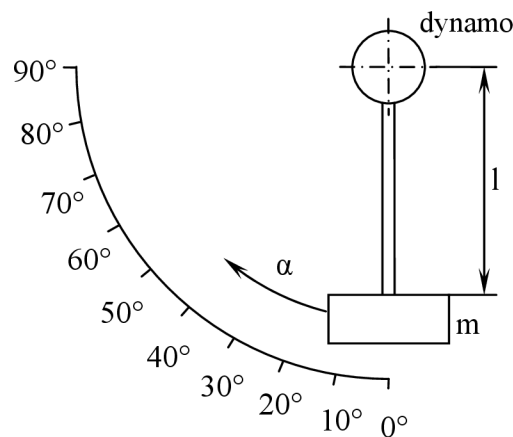
$$M_0 = \frac{m \cdot g \cdot l}{1000} \cdot \sin \alpha [\text{mNm}] \quad (8.3)$$

$m$ ... hmotnost závaží [g]

$g$ ... gravitační zrychlení [ $\text{ms}^{-2}$ ]

$l$ ... délka ramene závaží [mm]

$\alpha$ ... úhel natočení dynamu [ $^\circ$ ]



**Obrázek 8.2** Měření momentu dynamometrem

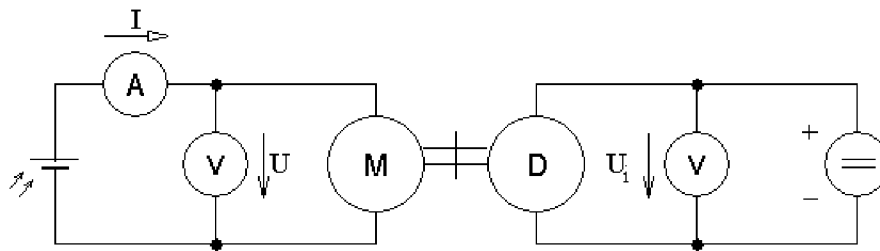
$$M_Z = c\Phi_M \cdot I_a - \beta\omega [\text{Nm}] \quad (8.4)$$

$I_a$ ... proud kotvou motoru [A]

$\omega$ ... úhlová rychlost [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$$\beta = \frac{c\Phi_M \cdot (I_{a1} - I_{a2})}{\omega_1 - \omega_2} \quad (8.5)$$

### 8.3. Schéma zapojení



Obrázek 8.3 Schéma zapojení úlohy

### 8.4. Tabulky naměřených a vypočtených hodnot

#### 8.4.1. Určení ztrát momentu vlivem dynamy

U <sub>i</sub>	n <sub>M</sub>	I		
		α <sub>A</sub>	k <sub>A</sub>	A
1,568	7649	45	1,2	0,45
0,97	4732	40	120	0,4

Tabulka 8.1 Měření ztrát momentu dynamy

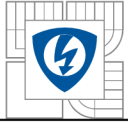
$$\beta = \frac{c\Phi_M(I_1 - I_2)}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{1,82 \cdot 10^{-3} \cdot (0,45 - 0,4)}{\frac{2\pi}{60} \cdot (7649 - 4732)} = 297,9 \cdot 10^{-6} \text{ mNms} \cdot \text{rad}^{-1} \quad (8.6)$$

$$M_Z = c\Phi_M I_a - \beta\omega = 1,82 \cdot 10^{-3} \cdot 0,45 - 297,9 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{2\pi \cdot 7649}{60} = 580,4 \cdot 10^{-3} \text{ mNm} \quad (8.7)$$

#### 8.4.2. Změřené a vypočtené hodnoty pro zatěžovací charakteristiku

U			I			U <sub>i</sub>	α	n <sub>M</sub>	M <sub>0</sub>	M <sub>M</sub>	P	P <sub>M</sub>	η
α <sub>V</sub>	k <sub>V</sub>	V	α <sub>A</sub>	k <sub>A</sub>	A								
28	12	2,8	42	1,2	0,42	1,43	0	6976	0,000	0,798	1,176	0,583	49,6
29		2,9	41		0,41	1,41	2,5	6878	0,117	0,912	1,189	0,657	55,3
28		2,8	45		0,45	1,32	5	6439	0,234	1,015	1,260	0,685	54,3
26		2,6	51		0,51	1,15	7,5	5610	0,350	1,106	1,326	0,650	49,0
25		2,5	56		0,56	1,05	10	5122	0,466	1,206	1,400	0,647	46,2
22		2,2	62		0,62	0,89	12,5	4342	0,581	1,296	1,364	0,589	43,2
22		2,2	65		0,65	0,82	15	4000	0,694	1,400	1,430	0,586	41,0
19		1,9	67		0,67	0,71	17,5	3464	0,807	1,495	1,273	0,542	42,6
14		1,4	69		0,69	0,39	18,5	1903	0,851	1,491	0,966	0,297	30,8
7		0,7	69		0,69	0	20	0	0,918	1,498	0,483	0,000	0,0

Tabulka 8.2 Měření momentové charakteristiky



**Příklady výpočtů pro druhý řádek:**

$$U = \alpha_V \cdot k_V = 29 \cdot \frac{12}{120} = 2,9V \quad (8.8)$$

$$I = \alpha_A \cdot k_A = 41 \cdot \frac{1,2}{120} = 0,41A \quad (8.9)$$

$$n_M = \frac{60 \cdot U_i}{2\pi \cdot c\Phi_D} = \frac{60 \cdot 1,41}{2\pi \cdot 1,96 \cdot 10^{-3}} = 6878 \text{ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (8.10)$$

$$M_0 = \frac{m \cdot g \cdot l}{1000} \cdot \sin \alpha = \frac{4,715 \cdot 9,81 \cdot 58}{1000} \cdot \sin 2,5^\circ = 0,117 \text{mNm} \quad (8.11)$$

$$M_M = M_0 + M_Z + \beta \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60} = 0,117 + 580,4 \cdot 10^{-3} + 297,9 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2\pi \cdot 6878}{60} = 0,912 \text{mNm} \quad (8.12)$$

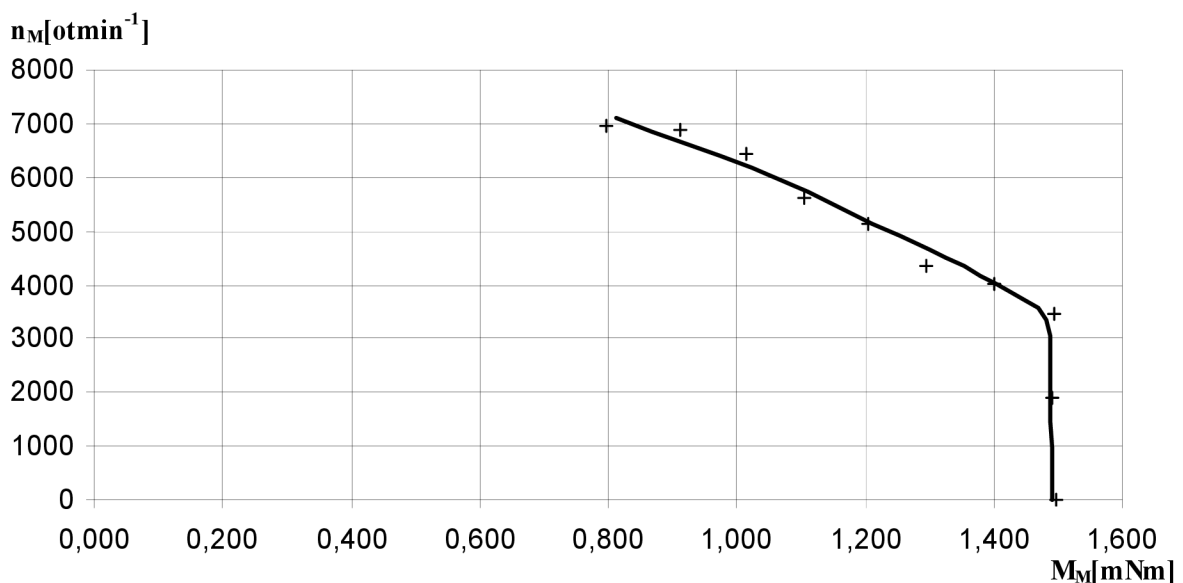
$$P = U \cdot I = 2,9 \cdot 0,41 = 1,189W \quad (8.13)$$

$$P_M = M_M \cdot \omega = M \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60} = 0,912 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2\pi \cdot 6878}{60} = 0,657W \quad (8.14)$$

$$\eta = \frac{P_M}{P} \cdot 100 = \frac{0,657}{1,189} \cdot 100 = 55,3\% \quad (8.15)$$

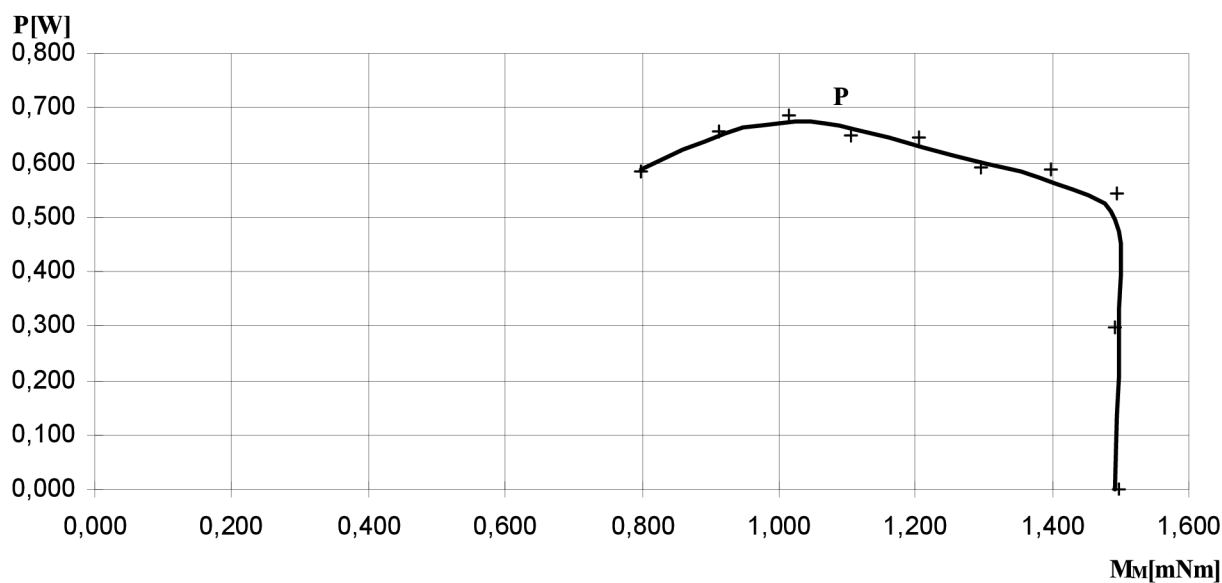
## 8.5. Grafy naměřených a vypočtených hodnot

### 8.5.1. Graf závislosti otáček motoru na momentu motoru



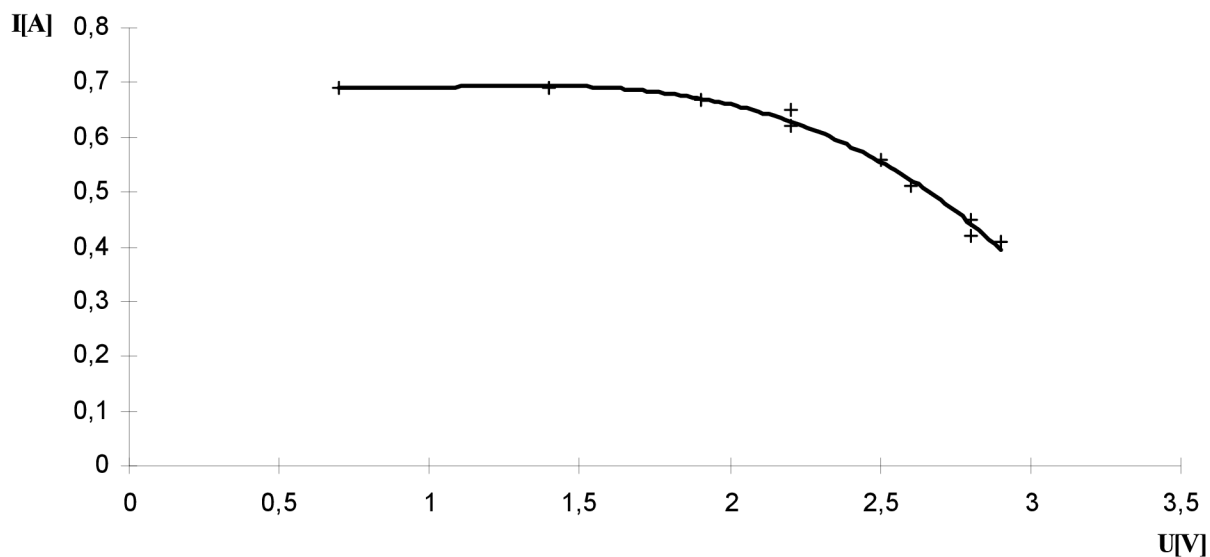
**Obrázek 8.4** Momentová charakteristika motoru

### 8.5.2. Graf závislosti výkonu motoru na momentu motoru

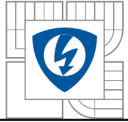


Obrázek 8.5 Graf závislosti výkonu na momentu motoru

### 8.5.3. V-A charakteristika napájení motoru



Obrázek 8.6 V-A charakteristika navrženého PV článku při zatížení motorem



## 8.6. Seznam použitých strojů a přístrojů

Vyrobená soustava solárních článků
Konstrukce pro polohování panelu-stavebnice Merkur
Ampérmetr magnetoelektrický v.č:119768, 6A
Voltmetr magnetoelektrický v.č:119876, 600V
Motor Megamotor typ: E2430-2865C-45C
Dynamometr- školní přípravek
Multimetr HP33120A v.č: 3146A780003
Stab. zdroj Statron NO:96020065

**Tabulka 8.3** Seznam použitých strojů a přístrojů pro měření momentové charakteristiky

## 8.7. Zhodnocení měření

Měřením jsme zjistili momentovou charakteristiku použitého motoru pro pohon RC modelu auta napájeného navrženou soustavou solárních článků (Obrázek 8.4). Z grafu je patrné, že vlivem velkých ztrát momentu v dynamometru jsme nemohli změřit celou charakteristiku, ale pouze její část. Maximální dosažený moment byl 1,498 mNm.

Z grafu výkonu motoru na momentu (Obrázek 8.5) jsme zjistili, že k největšímu výkonu dochází při  $M_M = 1,05mNm$ , což bude ideální bod pro návrh převodovky, kdy otáčky motoru budou přibližně  $6000ot \cdot min^{-1}$  (Obrázek 8.6).

Z V-A charakteristiky je zřejmé, že při zvyšování proudu (zatěžování motoru) dochází k velkému snižování napětí, což je dáno měkkostí PV panelu jako zdroje napětí (Obrázek 8.6).

Největší chyba měření nastala vlivem určování úhlu natočení dynama  $\alpha$ , což mělo vliv na změřený moment  $M_0$  a celkový moment  $M$ . Další nepatrné chyby vznikly třídou přesnosti měřících přístrojů, zaokrouhlováním výsledků a odečítáním hodnot z grafů.

## 9. Návrh rotační převodovky pro RC model auta

Převodovku tedy navrhujeme pro maximální dosažený výkon, který byl dosažen při momentu:

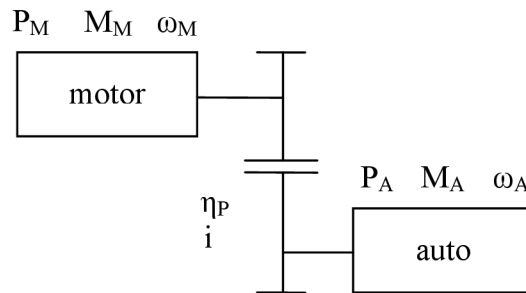
$$M_M = 1,05mNm \quad (9.1)$$

$$n_M = 6000ot \cdot \min^{-1} \quad (9.2)$$

$$\omega_M = \frac{2\pi \cdot n_M}{60} = \frac{2\pi \cdot 6000}{60} = 628,3rad \cdot s^{-1} \quad (9.3)$$

Výkon motoru spočítáme jako:

$$P_M = M_M \cdot \omega_M = 1,05 \cdot 10^{-3} \cdot 628,3 = 0,66W \quad (9.4)$$



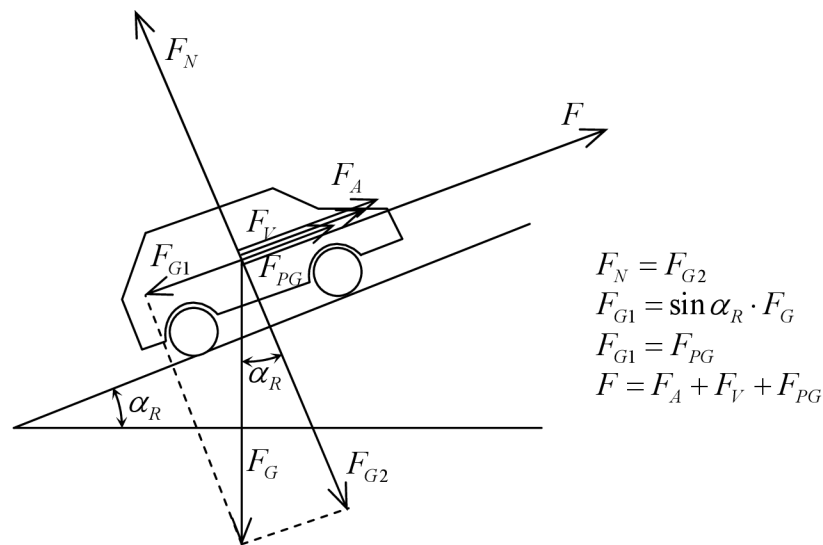
**Obrázek 9.1** Návrh převodovky pro pohon auta

Dále pomocí teoretické účinnosti převodu  $\eta_p = 0,85$  spočítáme výkon auta:

$$P_A = P_M \cdot \eta_p = 0,66 \cdot 0,85 = 0,561W \quad (9.5)$$

Nyní musíme pomocí fyzikálních zákonů nakloněné roviny, valivého odporu a akcelerační síly určit celkovou sílu nutnou k pohybu auta, pomocí které posléze určíme potřebný moment a otáčky (Obrázek 9.1).

Valivý odpor vzniká vždy, když se těleso kruhového průřezu (válec, koule) valí po pevné podložce. Příčinou tohoto jevu je neexistence absolutně tuhého tělesa, tj. tělesa, které se nedeformuje účinkem jakkoliv velké síly [11].



**Obrázek 9.2** Rozložení sil při pohonu auta na nakloněné rovině

$$F_V = k \cdot \xi \frac{F_N}{R} = k \cdot \xi \frac{m \cdot g}{R} = 4 \cdot 0,0016 \cdot \frac{0,31 \cdot 9,81}{0,0185} = 1,05N \quad (9.6)$$

k... počet koleček auta

$\xi$  ...rameno valivého odporu - součinitel valivého tření ( $\xi_{guma / asfalt} = 0,0016m$ )

m... hmotnost auta ( $m = 0,31kg$ )

R... poloměr kola auta ( $R = 0,0185m$ )

Akcelerační sílu nutnou ke zrychlení auta na požadovanou rychlost za určitý čas spočítáme jako:

$$F_A = m \cdot \frac{v}{t} = 0,31 \cdot \frac{0,5}{2} = 0,0775N \quad (9.7)$$

v... zvolená požadovaná rychlost auta

t... čas potřebný pro dosažení rychlosti v

Jelikož se auto nepohybuje pouze po vodorovné ploše, musíme také spočítat sílu nutnou k překonání nakloněné roviny. Úhel roviny  $\alpha_R$  jsem zvolil  $20^\circ$ .

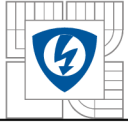
$$F_{PG} = \sin \alpha_R \cdot F_g = \sin \alpha_R \cdot m \cdot g = \sin 20^\circ \cdot 0,31 \cdot 9,81 = 1,04N \quad (9.8)$$

Dále spočítáme celkovou sílu:

$$F = F_A + F_V + F_{PG} = 0,0775 + 1,05 + 1,04 = 2,17N \quad (9.9)$$

Z výsledné síly a poloměru kola auta určíme potřebný moment a otáčky hřídele auta:

$$M_A = F \cdot R = 2,17 \cdot 0,0185 = 40,14mNm \quad (9.10)$$



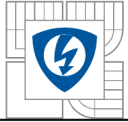
$$\omega_A = \frac{P_A}{M_A} = \frac{0,561}{40,14 \cdot 10^{-3}} = 13,97 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (9.11)$$

Nyní můžeme spočítat převod  $i$ :

$$i = \frac{\omega_M}{\omega_A} = \frac{628,3}{13,97} = 45 \quad (9.12)$$

Pro takto navrženou převodovku se bude pracovní bod na momentové charakteristice pohybovat přibližně na momentu motoru 1,05mNm, takže nám zde vzniká stále ještě momentová rezerva např. pro odklon panelu od slunce nebo změnu povrchu plochy. Bude-li se auto pohybovat po rovině  $\alpha < 20^\circ$ , nebo se bude snižovat síla  $F$ , bude se pracovní bod posunovat do oblasti vyšších otáček a nižšího momentu. Naopak bude-li auto stoupat do kopce, kdy  $\alpha > 20^\circ$ , bude se zvyšovat moment a snižovat otáčky, v tomto případě může nastat situace, že auto nakloněnou rovinu nepřekoná.





## 10. Závěr

Cílem tohoto projektu je seznámit čtenáře s problematikou solárních článků a návrhu soustavy solárních článků pro napájení elektrického stroje nízkého výkonu.

Úvodem je pojednání o energii vyrobené Sluncem dopadající na Zemi. Energetický potenciál solárního záření je totiž dostatečně veliký, aby dokázal zastoupit veškeré doposud používané zdroje. Technologický vývoj neustále přispívá ke stále levnějším řešením přeměny solární energie na elektrickou energii a tudíž vede i k častějšímu využívání těchto zdrojů.

Další kapitola obsahuje informace o principiální funkci solárního křemíkového článku a o přeměně sluneční energie na energii elektrickou. Jelikož se jedná v podstatě o velkoplošnou diodu, jsou základní principy funkce přechod PN a generace volných nosičů náboje a tím po připojení do obvodu vzniká elektrický proud.

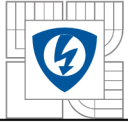
Těžišť práce je věnováno jednotlivým typům solárních článků, výrobním materiálům, struktuře článků a jejich elektrickým vlastnostem. Je zde také popsána výrobní technologie i technologie zabývající se zvýšením účinnosti např. zavedením texturace povrchu nebo vícepřechodových struktur.

Návrh soustavy solárních článků pro napájení malého stejnosměrného motoru byl proveden několika způsoby. Nejdříve byl proveden návrh pro jmenovité hodnoty napájeného stroje, ale z technologického a finančního hlediska by byl velice nevýhodný pro značně velkou plochu článků ( $0,065\text{m}^2$ ). Proto byla soustava navržena na nejnižší napájení udávané výrobcem  $U_{\min} = 2,5V$ .

Dalším úkolem práce bylo provést měření na navržené soustavě článků a pohonu RC modelu auta. Bylo prováděno za provozních podmínek auta pod přímým slunečním zářením.

Měření V-A charakteristiky proběhlo zcela dle teoretického předpokladu, kdy byla sestrojena typická charakteristika pro různé hodnoty světelného výkonu. Dále jsme z charakteristiky závislosti výkonu panelu na napětí zjistili, ve kterém místě se nachází bod maximálního výkonu (MPP).

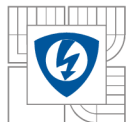
Namísto měření na modelu RC auta jsme provedli měření pomocí dynamometru. Navzdory původnímu návrhu jsme pro měření na modelu auta použili motor jiný. Důvodem byla možnost nedostatečného buzení magnetického obvodu kotvy, zhoršení účinnosti motoru a nižší hmotnost celého pohonu. Postup je popsán v kapitole 8. Z grafů je patrné, že vlivem velkých ztrát momentu na dynamu se nám nepodařilo proměřit celou charakteristiku, ale pouze její část, což pro naše účely bylo dostatečné. Výstupem tohoto měření byly vstupní hodnoty pro návrh převodovky pro pohon RC auta. Z grafu závislosti výkonu na momentu motoru (8.5.2) jsme v bodě maximálního výkonu odečetli moment a z grafu závislosti otáček na momentu (8.5.1) jsme určili otáčky při maximálním výkonu, což je ideální bod pro práci motoru z hlediska výkonu a také nám zde vzniká stále ještě dostatečná momentová rezerva pro případné ztráty třením, které byly nepatrné, proto jsme je zanedbali.



Návrhem převodovky se zabývá poslední kapitola 9. Vstupními hodnotami pro návrh pohonu jsou tedy parametry motoru  $M_m = 1,05mNm$  a  $n_m = 6000ot \cdot \min^{-1}$ . Pomocí fyzikálních zákonů nakloněné roviny, valivého odporu, akcelerační síly a parametrů auta jsme určili potřebnou sílu pro pohon auta a moment na hřídeli auta. Poté jsme byli schopni spočítat převod  $i = \frac{\omega_M}{\omega_A} = 45$ . Pro experimentální účely by mohl postačit gumíčkový převod, který bude mít zřejmě účinnost nižší.

Poslední částí bylo fyzické zhotovení auta a otestování při různých podmínkách. O průběhu testu vypovídá přiložené video. I navzdory amatérskému vyrobení pohonu jsme dosáhli výborného výsledku.

Při použití účinnější a dražší technologie by zcela jistě mohl být použit solární panel jako zdroj pro přepravu osob a věcí v oblastech s větším slunečním potenciálem, jako jsou třeba pouštní státy. Pro naše podmínky by bylo vhodnější použít solární článek pouze jako doplňkový zdroj součástí karoserie elektromobilu pro delší dojezd, kdy primárním zdrojem by byly baterie nebo ultrakapacitory. Jsem si jistý, že solární článek se v budoucnosti, díky stálému vývoji, stane nezanedbatelným zdrojem elektrické energie, který spolu s ostatními alternativními zdroji zachrání globální ekosystém Země.



## Literatura:

- [1] Fotovoltaika, elektrina ze slunce / Karel Murtinger, Jiří Beranovský, Milan Tomeš. -- 1. vyd.. -- Brno : ERA, 2007. -- vii, 81 s. : . ISBN: 978-80-7366-100-7 (brož.)
- [2] Sluneční energie: východisko z ekologicko-energetické krize / Stratis Karamanolis; [němčiny].. -- Praha : Sdružení MAC, 1996. -- 238 s. : . ISBN: 80-86015-02-5
- [3] Solární energie : fotovoltaika - perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti / Milan Libra, Vladislav Poulek. -- 2., dopl. vyd.. -- V Praze : ČZU, 2006. -- 149 s. : . ISBN: 80-213-1488-5 (váz.)
- [4] Electro24.cz, e-shop, aktualizace: 10.9. 2008, cit: 15.11. 2008  
Dostupné na WWW: <http://www.electro24.cz/solarni-panely/>
- [5] Chemnitz University of Technology – Faculty of Electrical Engineering and Information Technology - Center for Microtechnologies, aktualizace: 3.3. 2003  
Dostupné na WWW: [http://www.zfm.tu-chemnitz.de/pdf/annual\\_report\\_2002/special\\_report\\_17.pdf](http://www.zfm.tu-chemnitz.de/pdf/annual_report_2002/special_report_17.pdf)
- [6] SOLARENVI, s.r.o. , aktualizace: 19.1. 2009  
Dostupné na WWW: <http://www.solarencvi.cz/show.php?ida=24&ids=6&par=>
- [7] U.S. Department of Energy – Solar Energy Technologies Program, aktualizace: 12.23. 2005  
Dostupné na WWW: <http://www1.eere.energy.gov/solar/silicon.html>
- [8] Helsinky University of Technology – Department of Engineering Physics Mathematics, aktualizace: 12.2. 2002, cit: 3.4. 2009  
Dostupné na WWW: <http://www.tkk.fi/Units/AES/studies/dis/halme.pdf>
- [9] Skripta Elektronické součástky – VUT - Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně / Prof. Ing. Jaromír Brzobohatý, CSc. ; Prof. Ing. Vladislav Musil, CSc. ; Doc. Ing. Arnošt Bajer, CSc. ; Ing. Jaroslav Boušek, CSc. ; Ing. Roman Prokop
- [10] JOMITA s.r.o. e-shop, aktualizace: 19. 11. 2008, cit: 10.12. 2008  
Dostupné na WWW: <http://www.megamotor.cz/>
- [11] Wikipedie, aktualizace: 22.3. 2009, cit: 2.5. 2009, Dostupné na WWW:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Rameno\\_valiv%C3%A9ho\\_odporu#Rameno\\_valiv.C3.A9ho\\_odporu](http://cs.wikipedia.org/wiki/Rameno_valiv%C3%A9ho_odporu#Rameno_valiv.C3.A9ho_odporu)