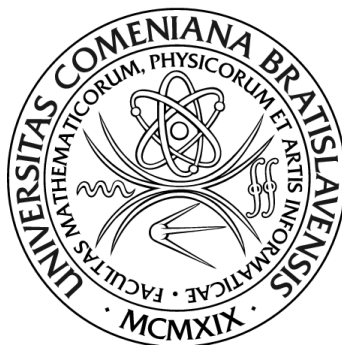


UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

VPLYV ZMENY CIEN VYKUROVANEJ ELEKTRICKEJ
ENERGIE Z OBNOVITELNÝCH ZDROJOV NA CELKOVÚ
CENU ELEKTRICKEJ ENERGIE PRE DOMÁCNOSTI

Diplomová práca

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY



VPLYV ZMENY CIEN VYKUROVANEJ ELEKTRICKEJ
ENERGIE Z OBNOVITEĽNÝCH ZDROJOV NA CELKOVÚ
CENU ELEKTRICKEJ ENERGIE PRE DOMÁCNOSTI

Diplomová práca

Študijný program: Ekonomická a finančná matematika
Študijný odbor: Aplikovaná matematika 1114
Školiace pracovisko: Katedra aplikovanej matematiky a štatistiky
Školiteľ: RNDr. Ing. Ján Pataky, PhD.

Bratislava 2012

Bc. Tomáš Sopúch



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

- Meno a priezvisko študenta:** Bc. Tomáš Sopúch
Študijný program: ekonomická a finančná matematika (Jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)
Študijný odbor: 9.1.9. aplikovaná matematika
Typ záverečnej práce: diplomová
Jazyk záverečnej práce: slovenský
- Názov:** Vplyv zmeny cien vykupovanej elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov na celkovú cenu elektrickej energie pre domácnosti
- Cieľ:** Budeme sa zamýšľať ako vplyva zmena cien el. zo slnka na celkovú cenu energie pre domácnosti. Aké je rovnovážne riešenie problému optimálna cena pre štát (štátna podpora) kontra náklady investorov. Ma zmysel optimalizovať produkciu pomocou optimálneho naklonenia alebo v našich podmienkach je to jedno? Zostrojíme model popisujúci produkciu el. energie z foto. článkov a mikro model fungovania slnečnej elektrárne.
- Vedúci:** RNDr. Ing. Ján Pataky, PhD.
Katedra: FMFI.KAMŠ - Katedra aplikovanej matematiky a štatistiky
Dátum zadania: 17.01.2011
- Dátum schválenia:** 17.01.2011
prof. RNDr. Daniel Ševčovič, CSc.
garant študijného programu

.....
študent

.....
vedúci práce

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Čestne prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracoval samostatne na základe vlastných poznatkov získaných z odbornej literatúry uvedenej v zozname použitej literatúry.

.....
Bc. Tomáš Sopúch

V Bratislave, apríl 2012

POĎAKOVANIE

Touto cestou by som chcel vyjadriť poďakovanie všetkým, ktorí ma v písaní práce podporovali a najmä vedúcemu mojej diplomovej práce RNDr. Ing. Jánovi Patakymu, PhD. za vedenie, poskytnutie potrebných údajov a za užitočné i cenné rady.

ABSTRAKT

SOPÚCH, Tomáš: Vplyv zmeny cien vykúpovanej elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov na celkovú cenu elektrickej energie pre domácnosti [Diplomová práca]. Univerzita Komenského v Bratislave; Fakulta matematiky, fyziky a informatiky; Katedra aplikovanej matematiky a štatistiky. Vedúci práce: RNDr. Ing. Ján Pataky, PhD. Bratislava, 2012, 75 s.

Práca je rozdelená na deväť kapitol. Analyzujeme v nej teoretické poznatky súvisiace so slnečným žiarením a jeho premenou na elektrickú energiu prostredníctvom fotovoltaiických panelov. Pomocou nadobudnutých informácií sa v praktickej časti pokúšame vytvoriť lineárne regresné modely opisujúce produkciu elektrickej energie v dvoch rôznych elektrárňach. Odhadnuté modely vzájomne porovnáme a vysvetlíme si, akým spôsobom by sa mohla znížiť štátom garantovaná výkupná cena elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov. Zamyslíme sa, ako by mohla zmena výkupných cien ovplyvniť koncovú cenu elektrickej energie pre domácnosti.

Kľúčové slová: slnečné žiarenie, fotovoltaiický článok, fotovoltaiický panel, solárna elektrárňa, lineárny regresný model, produkcia elektrickej energie

ABSTRACT

SOPÚCH, Tomáš: The impact of purchased price changes of electricity from renewable resources on total price of electricity for households [Master thesis]. Comenius University in Bratislava; Faculty of Mathematics, Physics and Informatics; Department of Applied Mathematics and Statistics. Supervisor: RNDr. Ing. Ján Pataky, PhD. Bratislava, 2012, 75 p.

The thesis is divided into nine chapters. In the theoretical part, theoretical information concerning solar radiation and its converting into electricity by means of photovoltaic panels is analyzed. Using acquired information, in the practical part some linear regression models describing production of electricity in two different power plants are created. The estimated models are compared to each other and a suggestion is presented how the state could reduce the guaranteed purchase price of electricity from renewable resources. Finally, it is considered how the change of purchase price could affect terminal electricity price for households.

Key words: solar radiation, solar cell, photovoltaic panel, solar power plant, linear regression model, production of electricity.

PREDHOVOR

Predkladaná diplomová práca sa zaoberá slnečnou energiou a jej premenou na elektrickú energiu. Predstavuje solárne systémy ako celky, poukazuje na právnu úpravu a ekonomické hľadisko výstavby a prevádzky týchto zariadení.

Hlavný cieľ práce je zhrnúť spomenuté vedomosti z teoretickej roviny a prostredníctvom nich odhadnúť lineárne regresné modely produkcie elektrickej energie v dvoch typoch elektrární. Porovnanie údajov z vytvorených modelov s reálnymi údajmi z elektrárne na juhu Slovenska ponúkne možnosti inovácie elektrární, a tým aj zvýšenie produkcie elektriny.

Výber diplomovej práce bol ovplyvnený jedinečnosťou a zaujímavosťou danej témy a rovnako jej aktuálnosťou nielen na Slovensku ale i v zahraničí. Neustále sa zhoršujúca kvalita ovzdušia, vody a pôdy núti mnohé štáty upustiť od klasických fosílnych palív a práve obnoviteľné zdroje energie, medzi ktoré patrí aj slnečná energia, sú šetrné k životnému prostrediu.

Práca sa snaží ponúknuť riešenie, pomocou ktorého by sa zmenšila koncová cena elektriny pre domácnosti zvyšujúca sa kvôli rapídneho nárastu solárnych elektrární. Význam práce teda spočíva v snahe apelovať na ekologickejší a v budúcnosti určite aj finančne menej náročný spôsob produkcie elektrickej energie.

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV, GRAFOV A TABULIEK	11
ÚVOD	11
1 OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE.....	12
1.1 VETERNÁ ENERGIA.....	13
1.2 VODNÁ ENERGIA	13
1.3 GEOTERMÁLNA ENERGIA	13
1.4 BIOMASA	14
1.5 BIOPALIVÁ.....	14
1.6 BIOPLYN	15
1.7 SLNEČNÁ ENERGIA	15
2 SLNEČNÉ ŽIARENIE	17
2.1 VZNIK SLNEČNÉHO ŽIARENIA.....	17
2.2 INTENZITA SLNEČNÉHO ŽIARENIA	17
2.3 DOPAD SLNEČNÉHO ŽIARENIA.....	17
2.4 DELENIE SLNEČNÉHO ŽIARENIA	18
2.5 FAKTORY OVPLYVNŮJÚCE SLNEČNÉ ŽIARENIE	19
2.6 MERANIE DOPADAJÚCEHO SLNEČNÉHO ŽIARENIA.....	19
2.7 VYUŽITIE SLNEČNEJ ENERGIE.....	19
3 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY.....	21
3.1 PRODUKCIA ELEKTRICKEJ ENERGIE PROSTREDNÍCTVOM FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKOV.....	21
3.1.1 <i>Elektrický prúd a fotoelektrický jav</i>	<i>21</i>
3.1.2 <i>Polovodiče</i>	<i>21</i>
3.1.3 <i>P-n prechod vo fotovoltaických článkoch</i>	<i>22</i>
3.1.4 <i>Slnečné žiarenie využiteľné fotovoltaickým článkom</i>	<i>22</i>
3.2 ZÁKLADNÉ TYPY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKOV	23
3.3 ZVÝŠENIE ÚČINNOSTI FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKOV	26
3.3.1 <i>Úprava povrchu fotovoltaických článkov.....</i>	<i>26</i>
3.3.2 <i>Obojstranné fotovoltaické panely</i>	<i>26</i>
3.3.3 <i>Optimálny sklon panelov a natáčanie za slnkom</i>	<i>26</i>
3.3.4 <i>Koncentrátory</i>	<i>27</i>
4 ZÁKLADNÉ TYPY SOLÁRNYCH SYSTÉMOV.....	29
4.1 FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY ZAPOJENÉ DO VEREJNEJ SIETE	29
4.2 SAMOSTATNÉ FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY BEZ ZAPOJENIA DO VEREJNEJ SIETE.....	30
4.3 ZRKADLOVÉ SYSTÉMY	32

5	PRÁVNÁ ÚPRAVA	34
5.1	SLOVENSKÁ REPUBLIKA A PODPORA OBNOVITELNÝCH ZDROJOV ENERGIE	34
5.2	EURÓPSKA ÚNIA A PODPORA OBNOVITELNÝCH ZDROJOV ENERGIE	37
6	PROBLEMATIKA Z EKONOMICKÉHO HĽADISKA	38
6.1	NÁKLADY SPOJENÉ S VÝSTAVBOU A PREVÁDZKOU SOLÁRNEJ ELEKTRÁRNE	38
6.2	OSTATNÉ NÁKLADY	38
6.3	VÝKUPNÁ CENA OD ŠTÁTU	39
7	ZÁKLADNÁ CHARAKTERISTIKA REGRESNÉHO MODELU	40
7.1	EKONOMETRIA	40
7.2	REGRESNÁ ANALÝZA	41
7.3	LINEÁRNY REGRESNÝ MODEL	42
7.4	STOCHASTICKÁ CHYBA	43
7.5	LINEÁRNY REGRESNÝ MODEL OBSAHUJÚCI K-PREMENNÝCH	44
7.6	METÓDA NAJMENŠÍCH ŠTVORCOV	45
7.7	KOEFICIENT DETERMINÁCIE R^2 A KORIGOVANÝ KOEFICIENT DETERMINÁCIE \bar{R}^2	45
8	MODEL	47
8.1	FORMULÁCIA MODELU PRE ELEKTRÁREŇ S PEVNÝM SKLONOM PANELOV	49
8.2	FORMULÁCIA MODELU PRE ELEKTRÁREŇ SO SYSTÉMOM DVOJ-OSÉHO NATÁČANIA PANELOV	54
8.3	ZHRNUTIE A POROVNANIE MODELOV	58
8.4	TESTOVANIE MODELOV	60
8.4.1	<i>Testovanie signifikancie koeficientov</i>	60
8.4.2	<i>Testovanie signifikancie regresie</i>	61
8.4.3	<i>Testovanie heteroskedasticity</i>	62
8.5	POROVNANIE MODELOV S PRODUKCIOU ELEKTRÁRNE VĽAČKA	63
9	VPLYV ZMENY CIEN ELEKTRICKEJ ENERGIE ZO SLNEČNÝCH ELEKTRÁRNÍ NA KONCOVÚ CENU ELEKTRINY PRE DOMÁCNOSTI	68
	ZÁVER	70
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	72
	PRÍLOHA	74

ZOZNAM OBRÁZKOV, GRAFOV A TABULIEK

<i>OBRÁZOK 2.1:</i> ROČNÝ PRIEMER DOPADU SLNEČNÉHO ŽIARENIA NA SLOVENSKU	18
<i>OBRÁZOK 3.1:</i> ÚČINNOSŤ V ZÁVISLOSTI NA UMIESTNENÍ A ORIENTÁCII PANELOV	27
<i>OBRÁZOK 4.1:</i> SCHÉMA FOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU ZAPOJENÉHO DO VEREJNEJ SIETE	29
<i>OBRÁZOK 4.2:</i> SCHÉMA FOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU BEZ ZAPOJENIA DO VEREJNEJ SIETE	31
<i>OBRÁZOK 4.3:</i> SCHÉMA ZRKADLOVÉHO SYSTÉMU	32
<i>GRAF 7.1:</i> GRAFICKÁ REPREZENTÁCIA KOEFICIENTOV REGRESNEJ PRIAMKY	43
<i>GRAF 8.1:</i> VINICA A AUDIT – POROVNANIE PRODUKCIE ELEKTRICKEJ ENERGIE	64
<i>GRAF 8.2:</i> ELEKTRÁREŇ 1 A ELEKTRÁREŇ 2 – POROVNANIE PRODUKCIE ELEKTRICKEJ ENERGIE	65
<i>GRAF 8.3:</i> VINICA, AUDIT, ELEKTRÁREŇ 1 A ELEKTRÁREŇ 2 – POROVNANIE PRODUKCIE ELEKTRINY	66
<i>GRAF 8.4:</i> VINICA, AUDIT, ELEKTRÁREŇ 1 A ELEKTRÁREŇ 2 – POROVNANIE PRÍJMOV	67
<i>TABULKA 8.1:</i> VINICA A AUDIT – POROVNANIE PRODUKCIE ELEKTRICKEJ ENERGIE A PRÍJMOV	64
<i>TABULKA 8.2:</i> ELEKTRÁREŇ 1 A ELEKTRÁREŇ 2 – POROVNANIE PRODUKCIE ELEKTRINY A PRÍJMOV	65
<i>TABULKA 8.3:</i> VINICA, AUDIT, ELEKTRÁREŇ 1 A ELEKTRÁREŇ 2 – POROVNANIE PRÍJMOV	67

ÚVOD

Súčasný rozmach elektrární využívajúcich obnoviteľné zdroje energie núti investorov k zamysleniu, ako by čo najviac maximalizovali príjem pri minimalizácii nákladov. Na druhej strane sú samotní občania, ktorí si želajú platiť za elektrickú energiu čo najmenej. Štát musí uspokojiť potreby občanov i podnikateľov. Snaží sa nájsť správne rovnovážne riešenie nastavenia koncových cien elektriny pre domácnosti a cien vykupovanej elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov. V diplomovej práci sa v stručnosti zamyslíme nad znížením súčasných výkupných cien elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov a vplyve týchto zmien na celkové ceny elektrickej energie pre koncových užívateľov.

Práca pozostáva z deviatich kapitol. Na začiatku v stručnosti oboznámime čitateľa s obnoviteľnými zdrojmi vo všeobecnosti, no neskôr sa zameriame konkrétne na slnečnú energiu. Vysvetlíme si proces premeny slnečného žiarenia na elektrickú energiu prostredníctvom fotovoltaiických článkov a predstavíme si tri základné typy solárnych systémov a ich princíp fungovania.

V piatej a šiestej kapitole analyzujeme zákony venujúce sa buď priamo alebo nepriamo podpore obnoviteľných zdrojov energie a preberieme si problematiku z ekonomického hľadiska. Sem patria náklady spojené s vlastníctvom solárnej elektrárne, štátna podpora vo forme výkupných cien a dotácií i nástroje ekologickej politiky.

Posledné tri kapitoly diplomovej práce sa venujú predstaveniu lineárneho regresného modelu odhadujúceho produkciu elektrickej energie od rôznych závislých veličín v dvoch odlišných typoch slnečných elektrární. Vo finálnej fáze práce porovnáme produkciu elektrickej energie a z toho vyplývajúce príjmy obidvoch elektrární so skutočnými údajmi produkcie a príjmov.

1 OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE

Obnoviteľné zdroje energie by mali tvoriť v roku 2020 v Európskej únii iba 20% z celkovej spotreby energií. To znamená, že v súčasnej dobe majoritná väčšina energie, ktorú ľudstvo spotrebuje, pochádza z ropy, uhlia, resp. zemného plynu. Podľa mnohých odborníkov väčšina hlavných ropných polí vo svete už má za sebou vrchol produkcie. A preto, aby sme dokázali zaistiť trvalo udržateľný rozvoj spoločnosti, mali by sme už teraz posilňovať produkciu elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov. Okrem iného sú obnoviteľné zdroje ekologickejším spôsobom produkcie elektrickej energie. Buď neprodukujú žiadne emisie, alebo ich produkciu redukujú na únosnú mieru pre naše životné prostredie (biomasa). Kritici, ktorí preferujú klasické zdroje elektrickej energie ako ropu, zemný plyn, uhlie či urán, sa odvolávajú na vysoké ceny elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov. Existuje však predpoklad, že v budúcnosti bude výroba elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov dokonca lacnejšia ako elektrická energia získaná z fosílnych palív. V prvom rade sa eliminujú poplatky za dovoz plynu, ropy či uránu z Ruska a iných krajín. V súčasnosti sú síce drahé komponenty potrebné na výstavbu a udržiavanie elektrární využívajúce obnoviteľné zdroje, čo následne spôsobuje drahé ceny tejto elektriny, avšak vývoj napreduje každým dňom. Navyše sa Slovensko zaviazalo Európskej únii, že z obnoviteľných zdrojov do roku 2020 vykryje 14% energetických potrieb. Samotná Európska únia si dala záväzok, že do roku 2020 budú obnoviteľné zdroje tvoriť 20% spotrebovanej energie. Tieto záväzky nútia mnohých výskumníkov pracovať na nových, lacnejších a odolnejších komponentoch pre elektrárne produkujúce elektrinu z obnoviteľných zdrojov.

Medzi obnoviteľné zdroje energie patria:

- *Veterná energia*
- *Vodná energia*
- *Geotermálna energia*
- *Biomasa*
- *Biopalivá*
- *Bioplyn*
- *Slnečná energia*

1.1 Veterná energia

Slnčné lúče zahrievajú rozličnou intenzitou zemský povrch, moria, vzduch, a tým vznikajú teplotné a tlakové rozdiely. Teplejší vzduch stúpa hore, chladnejší klesá dole a dávajú sa do pohybu masy vzduchu. V starovekej Číne a neskôr v Perzii i Egypte využívali ľudia vietor na pumpovanie vody z hlbokých studní za účelom jej redistribúcie do zavlažovacích systémov. Moderné veterné elektrárne fungujú na jednoduchom princípe: vietor otáča veterné turbíny a vzniká mechanická energia, ktorá je premenená na elektrickú energiu. Elektrárne budované na otvorenom mori môžu byť dokonca výkonnejšie, pretože vetru nebránia žiadne prekážky, čiže je silnejší a rýchlejší. Výhody veterných elektrární sú možnosť ich decentralizácie, nulová produkcia tuhého odpadu a neznečisťovanie ovzdušia.

1.2 Vodná energia

Kolobeh vody v prírode taktiež funguje prostredníctvom slnečného žiarenia. Slnko odparuje vodu z riek, jazier a ostatných vodných plôch. Následne sa tvoria oblaky, ktoré sa vďaka vetrom presúvajú. Voda potom padá na zem vo forme dažďa a snehu naspäť do riek a morí. Vďaka tomuto kolobehu môžu ľudia využívať vodnú energiu rôznymi spôsobmi. Poznáme elektrárne využívajúce morský príliv, morské vlny alebo teplotné rozdiely v oceánoch, no najbežnejšie a najrozšírenejšie sú vodné elektrárne. Uvádza sa, že elektrina z vodných elektrární tvorí 18-19% celosvetovej produkcie elektrickej energie. Výhodou je, že vodné elektrárne nespôsobujú emisie znečisťujúce ovzdušie. Avšak výstavbou samotných priehrad utrpí ekosystém. Nebyť dlhej životnosti týchto zariadení a pomerne rýchlej návratnosti, veľkým negatívom by boli vysoké počiatočné náklady pri budovaní priehrad a vodných elektrární.

1.3 Geotermálna energia

Geotermálna energia je klasifikovaná ako obnoviteľná energia, i keď v pravom zmysle slova obnoviteľnou nie je. S hĺbkou Zeme stúpa teplota približne o 1° na každých 30 metrov. Geoelektrárne využívajú toto vnútorné teplo Zeme a môžu sa nachádzať len v

určitých oblastiach sveta, ktoré disponujú geotermálnymi ložiskami. Geotermálnou energiou je možné vykurovať domy, byty, bazény alebo rybníky. Geoelektrárne využívajú horúcu paru unikajúcu z útrob Zeme. Para roztočí turbíny, no treba ju prefiltrovať, pretože môže obsahovať kyslé kovy, ktoré by urýchlili koróziu kovových komponentov. Medzi krajiny s najväčším inštalovaným výkonom geoelektrární a vykurovacích sústav patria: USA, Filipíny, Island, Nový Zéland, Japonsko, Taliansko a Mexiko.

1.4 Biomasa

Biomasa je zakonzervovaná slnečná energia, ktorá vznikla prostredníctvom fotosyntézy. Je to všetka vodná i suchozemská vegetácia ale aj živočíšna hmota v podobe organických zvyškov. Biomasu poznáme v pevnej (najčastejšie drevo, drevný odpad), kvapalnej (biopalivá - etanol, metanol) i plynnej forme (bioplyn). Pevnú biomasu môžeme buď spáliť priamo alebo využiť na výrobu biopalív. Pri spaľovaní síce vzniká CO₂, ale len množstvo, ktoré rastlina odčerpala z atmosféry a spotrebovala na svoj rast. Čiže hovoríme, že je pri produkcii škodlivých emisií neutrálna.

1.5 Biopalivá

Biopalivá sú alternatívne palivá ku klasickým palivám a rozlišujeme ich na bioalkoholy (bioetanol, biometanol, biobutanol) a biooleje (bionafta, rastlinné oleje). Vyskytujú v troch rôznych formách:

- *Čisté biopalivá*
- *Kombinácia biopaliva a určitého ropného produktu* (napríklad kombinácia bioetanolu s benzínom)
- *Iné biopalivá*

V súčasnosti existujú aj na Slovensku polia, na ktorých sa pestuje kukurica, cukrová repa, cukrová trstina na výrobu bioetanolu.

1.6 Bioplyn

Bioplyn môžeme získať dvomi spôsobmi. Prvý spôsob jeho vzniku je v procese vyhnívania zvyškov v čističkách odpadových vôd alebo na skládkach odpadu. Organické zvyšky hnijú vo vlhkom a teplom prostredí bez prítomnosti vzduchu za pomoci baktérií (anaeróbny proces). Druhý spôsob vzniku bioplynu je pri nedokonalom spaľovaní. Ak sa spaľuje biomasa v prostredí s obmedzeným prístupom vzduchu, vzniká nedokonalé horenie, ktoré spôsobuje, že výstupom sú plyny s možnosťou ďalšieho spaľovania. Komponenty potrebné na výstavbu spaľovne bioplynu sú finančne nenáročné a bežne dostupné. Aj preto najmä v niektorých rozvojových krajinách využívajú tento obnoviteľný zdroj energie samotné domácnosti.

1.7 Slniečna energia

Vďaka slnečnej energii môžeme využívať ako aj veternú a vodnú energiu, tak aj všetky formy biomasy. V tomto kontexte však slnečnou energiou myslíme energiu získanú priamo zo slnečného žiarenia. Existujú rôzne spôsoby ako využiť slnečnú energiu: poznáme fotovoltaické články produkujúce elektrickú energiu, špeciálne fotovoltaické články využívajúce sa na výrobu elektrickej energie na obežnej dráhe Zeme, ohrievanie bytov a domov pomocou špecifickej výstavby budov (pasívna solárna architektúra), ohrievanie bazénov a mnoho iných spôsobov. Je pravdepodobné, že v budúcnosti práve solárna energia nahradí tradičné fosílna palivá vďaka obrovskému množstvu slnečného žiarenia, ktoré každý deň dopadá na Zem. „Obnoviteľné zdroje energie sú omnoho väčšie ako tradičné fosílna palivá a teoreticky môžu zásobovať celosvetové potreby energie. $8,9 \cdot 10^{16}$ wattov slnečnej energie dopadá na zemský povrch. Aj keď nie je možné zachytiť všetku alebo dokonca väčšiu časť tejto energie, zachytenie menšieho množstva ako 0.02% by stačilo na naplnenie súčasných potrieb.“¹ Momentálne sa stále stretávame s určitými prekážkami pri využívaní slnečnej energie. Jednou z týchto prekážok sú vysoké počiatkové náklady na výstavbu solárnych zariadení. Okrem toho musia byť fotovoltaické články

¹ http://www.ipofe.sk/index.php?cmd=clanky&lang=svk&kateg=50&k_id=134&id=2

umiestnené na mieste, kde dopadá za rok dostatočné množstvo slnečného žiarenia. Výskumy v oblasti fotovoltaiických článkov, ktoré sa snažia vyriešiť nielen tieto problémy, neustále napredujú a prinášajú nové, lacnejšie a praktickejšie možnosti. V ďalších kapitolách sa z obnoviteľných zdrojov zameriame len na slnečnú energiu.

2 SLNEČNÉ ŽIARENIE

2.1 Vznik slnečného žiarenia

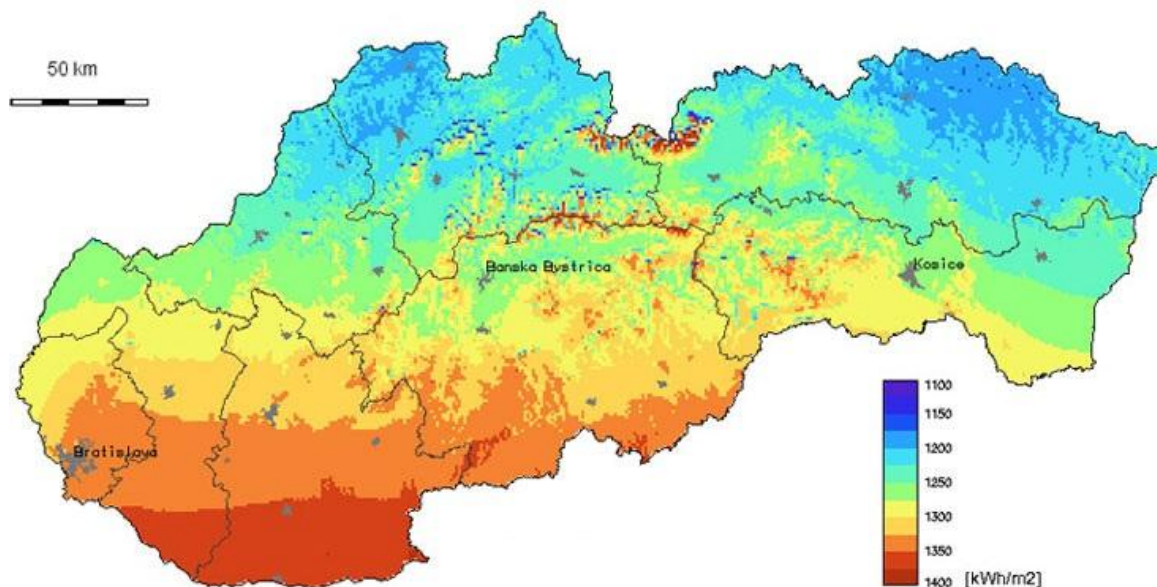
Termonukleárne reakcie prebiehajúce v strede slnka sú primárnym zdrojom energie na Slnku. Termonukleárna reakcia v jednoduchosti znamená, že slnko premieňa ľahký vodík na ťažšie hélium a následne na ďalšie ťažšie prvky. V súčasnosti už slnko spotrebovalo polovicu svojich zásob, ale aj napriek tomu mu druhá polovica vystačí na ďalších 5 miliárd rokov. To znamená, že slnko nie je nekonečný zdroj energie, no z hľadiska dĺžky ľudského života ho za taký môžeme považovať.

2.2 Intenzita slnečného žiarenia

Intenzita slnečného žiarenia sa meria v jednotkách kW/m^2 . Na povrchu slnka, kde sa teplota pohybuje okolo $5\,500\text{ °C}$, je intenzita slnečného žiarenia $63\,000\text{ kW/m}^2$. Na hranici zemskej atmosféry bolo nameraných $1\,367\text{ kW/m}^2$, čo je síce zlomok z intenzity žiarenia na povrchu slnka, ale aj napriek tomu je to pre nás priaznivé číslo. Túto hodnotu nazývame slnečná, resp. solárna konštanta. Solárne panely nachádzajúce sa na družiciach na obežnej dráhe Zeme zachytávajú intenzitu slnečného žiarenia rovnú solárnej konštante.

2.3 Dopad slnečného žiarenia

Na obrázku 2.1 môžeme vidieť, že ročný priemer dopadu slnečného žiarenia sa pohybuje v rozmedzí 1100 až 1400 kWh/m^2 . Slovenská republika sa nachádza v miernom pásme a sú u nás dokonca lepšie podmienky ako v susednom Česku, kde hodnoty ročného priemeru dopadu slnečného žiarenia spadajú do intervalu 950 až 1100 kWh/m^2 .



„Obrázok 2.1: Ročný priemer dopadu slnečného žiarenia na Slovensku“²

2.4 Delenie slnečného žiarenia

Slnečné žiarenie delíme na priame a difúzne žiarenie. Priame žiarenie dopadá na plochu priamo zo slnka, čiže je to také žiarenie, ktoré nebolo rozptýlené. Pri oblačnosti sa žiarenie rozptýli a nazývame ho difúzne žiarenie. V letných mesiacoch predstavuje difúzne žiarenie zhruba 50% celkového globálneho žiarenia, no v zimných mesiacoch je to nad 50%. Platí tu však nepriama úmernosť – čím je množstvo difúzneho žiarenia vyššie, tým nižšia je využiteľnosť energie. Pri úplne zatahutej oblohe je prítomné z globálneho žiarenia len difúzne žiarenie. Poznáme aj iné delenie slnečného žiarenia: globálne žiarenie sa delí na priame, difúzne a odrazené žiarenie. V tomto prípade sa odrazené žiarenie odráža od striech budov, samotných budov, stromov a pod. Priame a difúzne žiarenie si zachovávajú charakteristiku z predchádzajúceho delenia.

² Zdroj: <http://www.revolt-solar.com/fotovoltaika.php>

2.5 Faktory ovplyvňujúce slnečné žiarenie

- *Geografická poloha* – podľa historických záznamov vieme povedať, ktoré miesta na Zemi sú vhodnejšie ako ostatné (napríklad púšte).
- *Okolie* – niektoré prírodné materiály odrážajú slnečné žiarenie lepšie ako ostatné (voda, sneh, zrnká piesku).
- *Výška slnka nad obzorom* – vzdialenosť Slnka od Zeme.
- *Nadmorská výška* – rovnako vzdialenosť Slnka od Zeme.
- *Znečistenie atmosféry* – dôležité je najmä chemické znečistenie atmosféry, ktoré nazývame smog.
- *Oblačnosť* – jeden z najdôležitejších faktorov je oblačnosť. Od neho závisí, koľko je difúzneho a koľko priameho žiarenia.

2.6 Meranie dopadajúceho slnečného žiarenia

Dopadajúce slnečné žiarenie môžeme merať rôznymi prístrojmi. Najčastejšie využívané prístroje v meteorologických stanicích sú pyranometer a pyrheliometer. Pyranometer meria celkové žiarenie, čiže súčet priameho a difúzneho žiarenia. Kvôli tomu má tvar miniatúrneho ufa, aby svojím 180° poľom zachytil žiarenie prichádzajúce z akéhokoľvek uhla. Tvar pyrheliometra pripomína dlhú rovnú trubicu, ktorá má za účel zachytiť len priame žiarenie zo Slnka.

2.7 Využitie slnečnej energie

Poznáme dvojaké využitie slnečnej energie:

- *Pasívna solárna architektúra* – veľké okná s trojitým zasklením plnené argónom alebo kryptónom, zväčšená presklená plocha na južnej strane domu, zimné záhrady, tepelné akumulátory
- *Aktívna solárna architektúra* – termické kolektory na ohrievanie teplej vody, fotovoltaičné panely

Pasívna solárna architektúra je postavená na pragmatickom využití toho, čo nám ponúka samotná príroda. Stavby postavené týmto spôsobom sa snažia získať čo najviac tepla priamo zo slnka a následne cirkuláciou ohriateho vzduchu zabezpečiť vhodné podmienky na bývanie. Dôležité je v zime zachytiť najväčšie možné množstvo teplého vzduchu a v lete zamedziť prehrievaniu. Miestnosti v rodinných domoch využívajúcich pasívnu solárnu architektúru sú rozostavené nasledovným spôsobom: izby, ktoré by mali byť teplejšie (spálňa, obývačka) sú umiestnené na juhu a naopak ostatné izby (toaleta, chodba, komora) sa nachádzajú na zostávajúcich svetových stranách. Pasívnym využitím solárnej energie je možné ušetriť 5-15% energie potrebnej na vykurovanie domov.

Medzi aktívne využitie solárnej architektúry patria termické kolektory fungujúce na princípe ohrievania vody, ktorá sa ďalej využíva na vykurovanie bytov a domov, ohrievanie bazénov alebo ako úžitková voda. Ďalej poznáme klasické fotovoltaické články a panely. Fotovoltaický článok nazývaný aj solárny článok je zariadenie, ktoré konvertuje svetelnú energiu na energiu elektrickú pomocou fotoelektrického javu. Prvý fotovoltaický článok na pevnej báze bol vytvorený už v roku 1877. Problémom pri praktickom využití však bolo, že ešte nebolo zrejmé, na akom princípe funguje produkcia elektrickej energie z fotovoltaických článkov. V 60-tych rokoch 20. storočia sa začali používať kremíkové fotovoltaické panely na telekomunikačných družiciach ako zdroj energie. Až keď ceny týchto článkov v 70-tych rokoch dostatočne klesli, začali sa používať aj na Zemi na komerčné účely.

3 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY

3.1 Produkcia elektrickej energie prostredníctvom fotovoltaických článkov

3.1.1 Elektrický prúd a fotoelektrický jav

Elektrický prúd je usporiadaný pohyb elektrónov (nosičov elektrického náboja) od záporného pólu ku kladnému pólu zdroja v kovoch, v nekovových pevných látkach, v látkach v plynnom alebo kvapalnom skupenstve. Elektróny v týchto látkach (najčastejšie v kovoch) je potrebné niečím uvoľniť, aby vznikol usporiadaný pohyb elektrónov. Slnčné žiarenie pozostávajúce z fotónov dokáže excitovať elektróny, pokiaľ je ním kov ožarovaný. Vtedy elektrón vyletí z povrchu a zanechá po sebe tzv. dieru, čo je v skutočnosti kladný náboj. Tento jav sa nazýva fotoelektrický jav.

3.1.2 Polovodiče

Je však potrebné zabezpečiť, aby elektróny nevyleteli preč, ale prešli spotrebičom, ktorý je súčasťou elektrického obvodu. Elektróny vyletia z dier, prejdú elektrickým obvodom, a potom opäť zapadnú do dier. Tento jav lepšie prebieha v polovodičoch než v kovoch. Polovodiče sú materiály, ktoré sa v čistej podobe zaraďujú elektrickou vodivosťou medzi kovy a izolanty. Nenachádzajú sa v nich priamo voľné elektróny, no ľahko tam môžu vzniknúť (napríklad už spomínaným ožiarovaním, teplom alebo chemickou reakciou). Aby nastalo uvoľnenie elektrónov z dier, musí existovať v polovodiči p-n prechod. Aby sme naplno pochopili fungovanie fotovoltaického článku, musíme si vysvetliť, čo p-n prechod znamená.

3.1.3 P-n prechod vo fotovoltaických článkoch

Najbežnejší polovodič, ktorý poznáme, je kremík. Kremík je zložený z mriežky atómov kremíka, ktoré sú spojené kovalentnými väzbami. Kremík je omnoho vhodnejší ako uhlík, pretože kovalentné väzby nie sú až také pevné. V kremíku sa nenachádzajú žiadne voľné elektróny, avšak už po dodaní pomerne malej energie sa elektróny uvoľnia. Platí pravidlo: čím sa zvyšuje teplota, tým sa kremík stáva vodivejší. V praxi sa zvyčajne využíva kombinácia kremíku a bóru alebo kombinácia kremíku a fosforu. Kombináciou kremíku a bóru vznikne polovodič typu p s nadbytočnými dierami a naopak kremík s fosforom je polovodič typu n a obsahuje prebytok elektrónov. Ak obidva tieto typy spojíme, tenká vrstva medzi nimi sa nazýva p-n prechod. P-n prechod má využiteľné a užitočné vlastnosti:

- Prepúšťa elektrický prúd len jedným smerom.
- Aby sa vyrovnala koncentrácia, elektróny utekajú do časti p a diery do časti n.
- Vlastnosti p-n prechodu sa využívajú v polovodičových súčiastkach: dióda, tranzistor, fotodióda.

Fotovoltaický článok je v skutočnosti veľkoplošná dióda. Tesne pod povrchom sa nachádza p-n prechod a článok obsahuje vhodné kovové kontakty. Po dopade slnečného žiarenia na fotovoltaický článok sa generujú voľné elektróny a diery. Elektrické pole p-n prechodu sa už postará o zvyšok.

3.1.4 Slnečné žiarenie využiteľné fotovoltaickým článkom

Je potrebné podotknúť, že slnečné žiarenie prechádzajúce našou atmosférou sa pohybuje v rozmedzí od infračerveného po ultrafialové žiarenie. To predstavuje fotóny s energiami od 0,5 elektrónVoltov až po 2,9 eV. Každý typ polovodiča dokáže využiť fotóny s rôznou energiou. Pri najpoužívanejších kremíkových článkoch sú to fotóny s energiou väčšou ako 1,1 eV. Čiže kremíkový článok dokáže využiť fotóny s energiou 1,1 eV až 2,9 eV, čo sa dá považovať za podstatnú časť spektra slnečného žiarenia. Aj preto je kremík jedným z primárnych materiálov využívaných pri výrobe fotovoltaických článkov.

3.2 Základné typy fotovoltaických článkov

Fotovoltaické články delíme podľa materiálov, z ktorých sú vyrobené:

- **Kremík (Si)**

Najpoužívanejší materiál, z ktorého sa v súčasnosti vyrába vyše 90% fotovoltaických článkov, je kremík. Vzhľadom na to, že 26% zemskej kôry tvorí práve kremík a je to štvrtá najpoužívanejšia surovina na svete, mali by sa jeho ceny pohybovať na nízkej úrovni. Avšak kremík využívaný sa v elektronike musí dosahovať čistotu až 99,9999999%, a preto sú jeho ceny pomerne vysoké. Uvedieme si niekoľko typov fotovoltaických kremíkových článkov:

- *Kremíkové monokryštalické články* – je to najstarší typ fotovoltaických článkov. V začiatkoch sa v praxi účinnosť premeny pohybovala okolo 6%, no v súčasnosti je to v rozmedzí 13 – 17%. Monokryštalické články majú štvorcový tvar, používajú sa vo vesmírnych družiciach a v prípadoch, ak sú vyžadované malé rozmery fotovoltaických panelov.
- *Fotovoltaické články z polykryštalického kremíka* – je to momentálne najbežnejší typ fotovoltaických článkov. Proces výroby je odlišný ako u monokryštalických článkov, a preto sú články tohto typu lacnejšie a môžu mať väčšie rozmery so štvorcovým alebo obdĺžnikovým tvarom. Výrobná cena je síce nižšia, no na druhej strane dosahujú aj nižšiu účinnosť. Pri bežnej výrobe je to okolo 14%. Majú charakteristický vzhľad pripomínajúci leštený kameň.
- *Fotovoltaické články z multikryštalického kremíka* – je to v skutočnosti odroda fotovoltaických článkov z polykryštalického kremíka. Takisto sú lacnejšie ako monokryštalické články a ich účinnosť premeny je od 12 do 15%. Niekedy sa zvyšuje ich účinnosť pomocou chemickej úpravy vodíkom.
- *Hydrogenizovaný amorfný kremík* – amorfný kremík znamená, že kremík nemá pravidelnú kryštalickú štruktúru. Keďže je charakteristický väčšou absorpciou slnečného žiarenia (1 mm vrstva pohltí 90% žiarenia), pri jeho výrobe sa spotrebuje omnoho menej materiálu. To z amorfného kremíka síce robí lacnejšiu variantu fotovoltaických článkov, ale dosiahnutá účinnosť je len 4-9%. Materiál sa niekedy nanáša na oceľ, sklo, plasty. Kvôli spomínaným vlastnostiam je možné vyrábať ohybné a tenké fotovoltaické

články. Preto sa články z hydrogenizovaného amorfného kremíku nanášajú na oblečenie, alebo sa zakomponujú do kalkulačiek a hodínok.

- ***Arzenid galitý (GaAs)***

Vývoj nových materiálov neustále prebieha a hľadá sa čo najúčinnejší, najlacnejší a najodolnejší materiál. Po kremíku je druhý najpoužívanejší materiál práve arzenid galitý. Nevýhodou je, že arzén je jedovatý prvok a gálium je vzácnejší kov než zlato. Preto sú fotovoltaické články z tohto materiálu drahšie a viac krehké, no majú mnoho predností. Sú menej citlivé na vysoké teploty ako kremíkové fotovoltaické články, takže ich účinnosť sa pri zvyšujúcej teplote znižuje len o nepatrnú čiastku. Táto vlastnosť je užitočná, pokiaľ chceme využívať koncentrátory. Články GaAs sa vyznačujú veľmi vysokou absorpciou žiarenia a ich účinnosť dosahuje 18-20%. Navyše je možné meniť pomer gália a arzenu, poprípade použiť iné doplnujúce prvky. Bola odskúšaná kombinácia kremíku s arzenidom galitým a tieto články dosahujú účinnosť až 30%. Okrem toho sa skúma kombinácia GaAs s hliníkom a existuje predpoklad, že v tomto prípade bude dosiahnutá účinnosť 40%.

- ***Telurid kademnatý (CdTe)***

Fotovoltaické články CdTe patria k tenkovrstvým solárnym panelom. Vďaka tomu náklady na ich výrobu nie sú veľké. Tieto články sa vyznačujú veľkou absorpciou slnečného žiarenia. V konečnom dôsledku však nie sú za bežných podmienok lepšie ako kremíkové články, no výskum zameraný na CdTe články je zatiaľ v počiatkoch. Nevýhodou je, že sa vyrábajú chemickou reakciou kadmia s telúrom a kadmium je relatívne vzácny prvok.

- ***Diselenid medi a india (CuInSe₂)***

Tieto fotovoltaické články môžu byť veľmi tenké, pretože vynikajú ohromnou absorpciou. Prvý mikrometer pohltí 99% slnečného žiarenia. Zaznamenaná účinnosť je 18%, čo je pomerne vysoká hodnota, keďže ide o tenkovrstvé solárne panely.

- ***Sulfid kademnatý (CdS)***

Články z tohto materiálu majú nízku hmotnosť, kvôli čomu je vhodná ich aplikácia v kozme. Sú pomerne lacné, no nestabilné s účinnosťou len okolo 10%. Perspektívna sa javí najmä ich kombinácia s teluridom kademnatým.

Existujú aj nové trendy vo vývoji fotovoltaiických článkov. Keďže ceny klasických výrobných materiálov sú stále pomerne vysoké, výskumy zaoberajúce sa novými trendmi a smermi vo vývoji fotovoltaiických článkov sú vítané. Uvedieme si niekoľko príkladov:

- ***Fotovoltaiické články využívajúce organické látky***

Predchádzajúce typy článkov sa zaraďujú medzi anorganické fotovoltaiické články. Okrem nich existujú organické články, ktorých princíp je založený na skutočných prírodných procesoch. Jednou z takýchto inšpirácií je práve fotosyntéza, pri ktorej dochádza k vysokoúčinnnej premene energie. Aby fotosyntéza vôbec prebiehala, je dôležitá prítomnosť organického farbiva chlorofylu. Ako v prírode, tak sa aj v organických fotovoltaiických článkoch nachádzajú senzitivizačné farbivá, ktoré absorbujú svetlo a vytvárajú voľný elektrický náboj s vysokou kvantovou účinnosťou. Zatiaľ je však ich celková účinnosť oveľa nižšia ako u ostatných (anorganických) fotovoltaiických článkov.

- ***Viacprechodové štruktúry***

Fotovoltaiické články s jedným p-n prechodom využívajú len malú časť slnečného spektra. Viacprechodové štruktúry fungujú na princípe vytvorenia viacerých vrstiev. Každá vrstva je určená pre určitú časť slnečného spektra. V súčasnosti sú dostupné trojvrstvové články, ale pripravujú sa aj štvorvrstvové až šesťvrstvové články. Viac vrstiev pomáha využiť širšie spektrum slnečného žiarenia. Čisto teoreticky by bolo možné využiť plné slnečné spektrum – od ultrafialového až po infračervené žiarenie. Práve využitie celého slnečného spektra je cieľom mnohých výskumných centier.

3.3 Zvýšenie účinnosti fotovoltaických článkov

3.3.1 Úprava povrchu fotovoltaických článkov

Základné úpravy povrchu fotovoltaických článkov sú vítané vzhľadom na nízku využiteľnosť slnečného žiarenia (v praxi do 20%). Používaná antireflexná vrstva pomáha na povrchu zvýšiť účinnosť tým, že minimalizuje odraz svetla, to zn. výstup nezachytených fotónov. Mikroskopická ihlanová štruktúra na prednej strane fotovoltaických článkov uľahčuje vstup fotónov. Ihlanovú štruktúru je možné dosiahnuť kontrolovaným leptaním.

3.3.2 Obojstranné fotovoltaické panely

Ako už napovedá názov, obojstranné fotovoltaické panely dokážu zachytávať slnečnú energiu z oboch strán. Toto je užitočná vlastnosť, pokiaľ sa panely nachádzajú na strechách budov, ktoré sú natreté bielou alebo striebornou farbou a odrážajú tak mnoho svetla. Podobne sa využívajú zrkadlá, ktoré odrážajú svetlo ešte lepšie. V takomto prípade je možné dosiahnuť navýšenie produkcie energie až do 30%.

3.3.3 Optimálny sklon panelov a natáčanie za slnkom

Pri fotovoltaických paneloch, ktoré sú statické, čiže sa neotáčajú za slnkom, je v našich podmienkach mierneho pásma najvhodnejšie otočenie na juh so sklonom panelov 35°.



„Obrázok 3.1: Účinnosť v závislosti na umiestnení a orientácii panelov“³

Omnoho účinnejšie sú panely so schopnosťou natáčať sa za slnkom. Natáčacie systémy zabezpečujú kolmý dopad slnečného žiarenia na panely počas celého dňa. Poznáme systémy s natáčaním okolo jednej osi a systémy, ktoré sa natáčajú podľa dvoch osí. Malé systémy väčšinou využívajú systém používajúci len jednu os. To znamená, že sa panely počas dňa natáčajú za slnkom automaticky, no cez rok treba manuálne nastavovať otáčanie podľa výšky slnka nad obzorom. Dvoj-osé solárne panely majú automatické otáčanie za slnkom počas celého roka. Existujú mnohé spôsoby, akými môže byť zabezpečené otáčanie panelov: snímače polohy slnka, senzory citlivé na slnečné žiarenie, naprogramované časovače, počítačový systém so zapamätanými polohami slnka a iné. Uvádza sa, že v klimatických podmienkach Strednej Európy majú solárne systémy používajúce natáčanie s dvomi osami oproti statickým systémom navýšenie produkcie energie o 25-35%.

3.3.4 Koncentrátory

Pod koncentrátormi v jednoduchosti rozumieme prídavné zariadenia, ktoré koncentrujú slnečné žiarenie na malú plochu. Koncentrátory sa delia podľa toho, na akých optických prvkoch sú postavené. Poznáme:

³ Zdroj: <http://www.revolt-solar.com/fotovoltaika.php>

- *Zrkadlové* – môžu využívať rovinné alebo parabolické zrkadlá. Parabolické zrkadlá sa v praxi vyskytujú častejšie.
- *Šošovkové* – využívajú ku koncentrácii šošovky.
- *Ostatné* – sú založené na iných bázach.

Zo zakomponovania koncentrátorov do solárnych systémov vyplývajú mnohé výhody:

- Cena koncentrátorov je nižšia ako cena fotovoltaických panelov.
- Koncentrátory pomáhajú niekoľkonásobne zvýšiť účinnosť solárnych systémov.
- Pri ich výrobe sa spotrebuje menej materiálov.
- Pri ich výrobe sa eliminuje použitie toxických materiálov.
- Vyrábajú sa z ľahko recyklovateľných materiálov.
- Výroba je ľahká, manufaktúrna, a teda je možné umiestniť ju prakticky kdekoľvek.

Avšak použitie koncentrátorov so sebou prináša aj nevýhody. Nižšie si rozoberieme jednotlivé negatíva spojené s využívaním koncentrátorov a čiastočne navrhujeme aj ich riešenia:

- Fotovoltaický panel bez koncentrátora dokáže zachytávať podstatnú časť difúzneho žiarenia a určitú časť priameho žiarenia. Aká veľká je táto zachytená časť, závisí od toho, pod akým uhlom dopadlo slnečné žiarenie. Na panel môže dopadať žiarenie pod uhlom 0° až 90° . Koncentrátor dokáže zachytiť žiarenie, ktorého veľkosť je nepriamoúmerná k tomu, ako rastie koncentrácia. Platí vzťah:

$$\sin \theta_c = \frac{1}{C}$$

kde:

θ_c – polovica uhlového rozsahu, z ktorého koncentrátor zachytáva slnečné žiarenie

C – podiel intenzity žiarenia dopadajúceho na koncentrátor a žiarenia vystupujúceho z koncentrátora

Z uvedeného vyplýva, že najväčší úžitok dosiahneme kombináciou koncentrátora a systému s dvoj-osím natáčaním za Slnkom.

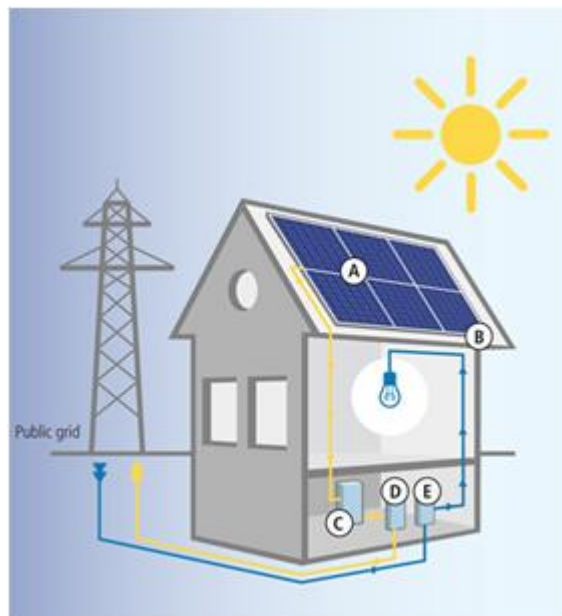
- Koncentrované ožarovanie plochy fotovoltaických panelov spôsobuje nerovnomerné zahrievanie. Tento problém je ľahko zvládnuteľný pomocou chladenia vodou, čo nám navyše dáva možnosť využiť ohriatu úžitkovú vodu ako pozitívnu externalitu.

4 ZÁKLADNÉ TYPY SOLÁRNYCH SYSTÉMOV

Úlohou tejto kapitoly nie je ukázať si princíp, na akom fungujú fotovoltaické články (čomu sme sa venovali v predchádzajúcej kapitole), ale predstaviť si tri základné typy solárnych systémov, opísať ich jednotlivé komponenty a priblížiť si ich činnosť ako celku.

4.1 Fotovoltaické systémy zapojené do verejnej siete

Systémy, ktoré sú zapojené do siete, môžu existovať vo forme veľkých elektrární, ale aj menších súkromných zariadení dodávajúcich elektrickú energiu do verejnej siete za určitú štátom garantovanú výkupnú cenu. Fotovoltaické systémy zapojené do siete pozostávajú z piatich základných položiek:



„Obrázok 4.1: Schéma fotovoltaického systému zapojeného do verejnej siete“⁴

⁴ Zdroj: <http://www.sharp.eu/cps/rde/xchg/eu/hs.xsl/-/html/technikprinzip.htm>

A – Fotovoltaické články

B – Upevňovací systém

C – Menič prúdu na spracovanie elektriny zo solárnych článkov

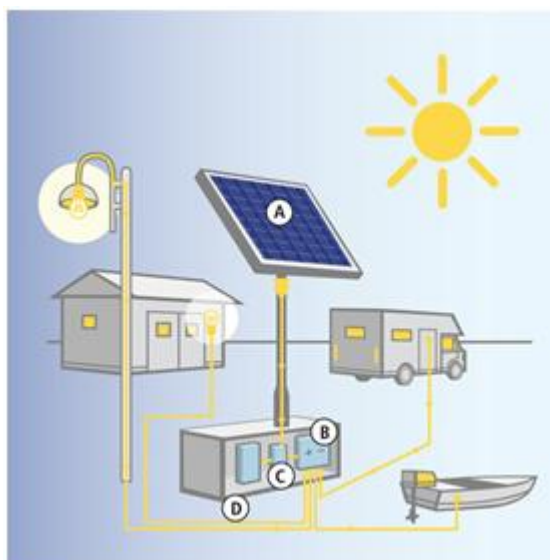
D – Merač exportu elektriny na meranie výdaju energie

E – Merač importu elektriny na meranie spotreby energie

Upevňovací systém, ktorý je potrebný pri inštalácii fotovoltaických panelov, drží a chráni panely na streche alebo na inom vhodnom mieste. Fotovoltaické články konvertujú slnečné žiarenie na elektrickú energiu. Menič prúdu sa postará o to, aby vytvorená elektrická energia zo solárnych článkov spĺňala štandard kvality elektriny z verejnej siete. Dôležitými komponentmi sú merače exportu a importu elektriny. Prvý spomenutý sa postará o meranie elektriny, ktorá je vyprodukovaná a dodaná do verejnej siete. Merač importu elektriny zaznamenáva spotrebovanú elektrinu.

4.2 Samostatné fotovoltaické systémy bez zapojenia do verejnej siete

Výhoda samostatných systémov je, že vyprodukovaná elektrina je uložená do akumulátorov a batérií a neskôr môže byť použitá na pouličné osvetlenie, v prístrojoch vydávajúcich parkovacie lístky alebo v iných zariadeniach. Tento typ systémov je tiež obľúbený v domácnostiach, ktoré elektrinu využívajú pri nabíjaní automobilov, motorových člnov a rôznych záhradných prístrojov. Je to ekonomicky a environmentálne prijateľnejšie riešenie. Samostatné fotovoltaické systémy bez zapojenia do verejnej siete sa skladajú z týchto komponentov:



„Obrázok 4.2: Schéma fotovoltaického systému bez zapojenia do verejnej siete“⁵

A – Fotovoltaické články

B – Menič prúdu na spracovanie elektriny zo solárnych článkov

C – Prístroj monitorujúci stav nabitia solárnej batérie

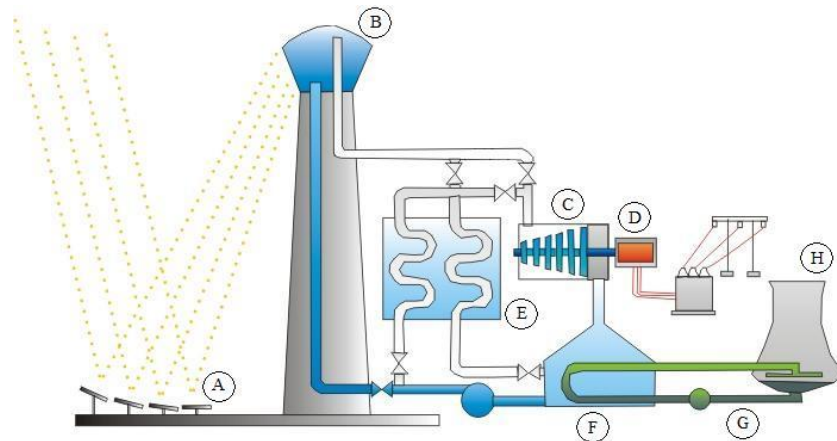
D – Solárna batéria

Časť elektrickej energie, ktorú vyprodukuje fotovoltaické články konvertovaním slnečného žiarenia, sa dostane do meniča prúdu. Ten zabezpečí, aby vytvorená elektrina zo solárnych článkov spĺňala štandard kvality elektriny z verejnej siete. Následne sa elektrina môže použiť ako zdroj svetla v domácnosti, zdroj nabíjania elektro-automobilu a pod. Okrem toho sa vygenerovanou elektrinou dobíjajú solárne batérie pre neskoršie využívanie (počas noci, veľkej oblačnosti).

⁵ Zdroj: <http://www.sharp.eu/cps/rde/xchg/eu/hs.xsl/-/html/technikprinzip.htm>

4.3 Zrkadlové systémy

Zrkadlové systémy nevyužívajú na výrobu elektrickej energie fotovoltaické články. Zariadenia používajú zrkadlá na získavanie tepla zo slnečného žiarenia. Teplo sa využije na ohrev kvapaliny a vznik pary, ktorá poháňa turbínu s elektrickým generátorom.



„Obrázok 4.3: Schéma zrkadlového systému“⁶

A – Systém zrkadiel

B – Slnečný kotol

C – Turbína

D – Elektrický generátor

E – Tepelný akumulátor

F – Kondenzátor

G – Chladiaca voda

H – Chladiaca veža

⁶ Zdroj: <http://elektrarne.unas.cz/subory/slnečna.htm>

System zrkadiel odráža a koncentruje slnečnú energiu na slnečný kotol umiestnený na vyvýšenom mieste. Absorbované teplo sa z kotla odvádza cirkulujúcou kvapalinou. Ohriata kvapalina smeruje do turbíny a tam sa mení na kinetickú energiu. Elektrický generátor ďalej mení kinetickú energiu na elektrickú energiu. Pri nedostatku slnečného žiarenia presmerujú ventily ohriatu kvapalinu do tepelného akumulátora. Do akumulátora sa odvádza časť ohriatej kvapaliny aj počas plného slnečného žiarenia. Čiže tepelný akumulátor sa s pomocou kondenzátora stará o rovnomernosť dodávok tepelnej energie pre turbínu. Chladiaca voda v kondenzátore odvádza kondenzačné teplo z turbíny do chladiacej veže.

5 PRÁVNÁ ÚPRAVA

5.1 Slovenská Republika a podpora obnoviteľných zdrojov energie

Na Slovensku sú výrobcovia elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov aj prevádzkovatelia distribučných systémov odberajúcich elektrinu od týchto výrobcov chránení zákonmi, ktoré sa venujú buď priamo alebo nepriamo problematike obnoviteľných zdrojov. Zákony, z ktorých budeme ďalej čerpať:

- *Zákon č. 276/2001 Z. z. (o regulácii v sieťových odvetviach a o zmene a doplnení niektorých zákonov)*
- *Zákon č. 309/2009 Z. z. (o podpore obnoviteľných zdrojov energie a vysoko účinnej kombinovanej výroby a o zmene a doplnení niektorých zákonov)*
- *Zákon č. 558/2010 Z. z. (ktorým sa mení a dopĺňa zákon č. 309/2009 Z. z. a ktorým sa dopĺňa zákon č. 276/2001 Z. z.)*

Zákon č. 309/2009 Z. z. neurčuje len spôsoby podpory výroby elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov, ale aj podporu vysoko účinnej kombinovanej výroby elektrickej energie. Taktiež určuje práva a povinnosti výrobcov elektriny z obnoviteľných zdrojov a práva a povinnosti ostatných účastníkov trhu s elektrinou.

„Za obnoviteľný zdroj energie sa považuje nefosílny zdroj energie, ktorého energetický potenciál sa trvalo obnovuje prírodnými procesmi alebo činnosťou ľudí, a ide o tieto zdroje:

1. *vodná energia*
2. *slnečná energia*
3. *veterná energia*
4. *geotermálna energia*
5. *biomasa vrátane všetkých produktov jej spracovania*
6. *bioplyn, skládkový plyn, plyn z čističiek odpadových vôd*
7. *biometán*“⁷

⁷ Zákon č. 309/2009 Z. z.

Z tohto uvedeného zoznamu zdrojov energie nás bude zaujímať slnečná energia ako obnoviteľný zdroj energie. Zákon uvádza aj podporu vysoko účinnej kombinovanej výroby. „Pod kombinovanou výrobou rozumieme technologický proces, pri ktorom súčasne prebieha výroba:

1. *elektriny a tepla*
2. *mechanickej energie a tepla*
3. *mechanickej energie, tepla a elektriny“⁸*

Niektoré typy solárnych systémov produkujúce elektrickú energiu využívajú kombinovanú výrobu elektriny a tepla vo forme ohrievania úžitkovej vody. Ohrievanie vody je pozitívna externalita vznikajúca z potreby chladiť fotovoltaické panely pri nadmernom zahrievaní pri používaní koncentrátorov.

Zákon stanovuje podmienky prednostného pripojenia zariadenia produkujúceho elektrinu z obnoviteľných zdrojov do regionálnej distribučnej sústavy a garantuje následný odber elektriny prevádzkovateľom regionálnej distribučnej sústavy. Z formulácie vyplýva, že zákon garantuje odber elektriny po dobu 15 rokov od uvedenia zariadenia do prevádzky. Po pätnástich rokoch je možné výrobcu elektriny odpojiť zo siete. Vzhľadom na to, že životnosť zariadení sa v súčasnosti pohybuje od 20 do 30 rokov, je táto časť zákona vcelku nepraktická.

Ďalšia časť zákona upravujúca práva a povinnosti výrobcu elektriny hovorí o práve výrobcu elektriny na prednostné pripojenie do distribučnej sústavy. Výrobca však musí spĺňať určité technické podmienky a nesmie ohrozovať bezpečnosť celkovej distribučnej sústavy. Medzi povinnosti, ktoré musí spĺňať, patrí predloženie potvrdenia prevádzkovateľovi distribučnej sústavy, že elektrina, ktorú vyrába, skutočne pochádza z obnoviteľných zdrojov. Okrem toho musí prevádzkovateľovi oznámiť predpokladanú veľkosť dodávaného množstva elektriny. Ak výrobca elektriny prevádzkuje systém, ktorý kombinuje výrobu elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov energie a výrobu elektrickej energie z neobnoviteľných zdrojov energie, musí sám zabezpečiť meranie jednotlivých zložiek vyrobenej elektriny.

Nasledujúca časť zákona, ktorá poučuje o právach a povinnostiach prevádzkovateľa sústavy, hovorí, že prevádzkovateľ je povinný pripojiť výrobcu elektriny do distribučnej

⁸ Zákon č. 309/2009 Z. z.

siete po úhrade ceny za pripojenie, ak výrobca elektriny spĺňa stanovené podmienky formulované v zákone takto: „Zariadenie výrobcu elektriny sa do distribučnej sústavy pripojí, ak distribučná sústava je technicky spôsobilá na pripojenie, je najbližšie k miestu, kde sa nachádza zariadenie na výrobu elektriny a iná sústava nevykazuje technicky a ekonomicky lepšie miesto pripojenia.“⁹ Toto v jednoduchosti znamená, že ak existuje výrobca elektriny s lepším umiestnením svojej výrobnéj jednotky, alebo táto výrobná jednotka má lepšie zvládnuté technické podmienky, tak tento výrobca bude uprednostnený pri zapojení do distribučnej sústavy.

Treba poznamenať, že zákon o obnoviteľných zdrojoch je na Slovensku ešte len v začiatkoch, obsahuje mnoho nedoriešených súčastí a nenavrhuje riešenia hypotetických scenárov, ktoré by mohli v skutočnosti nastať. Aj preto Energetické centrum Bratislava vydalo po schválení zákona o obnoviteľných zdrojoch energie niekoľko zaujímavých pripomienok:

1. „Zákon nie je o obnoviteľných zdrojoch energie, len o výrobe elektriny z nich.
2. Zákon kladie zodpovednosť za odchýlky pri výrobe elektriny na plecia výrobcu.
3. V prípade zariadení nad 4 MW prevezme zodpovednosť za odchýlku prevádzkovateľ zariadenia na výrobu elektriny. Zákon však nestanovuje ako sa táto zodpovednosť bude uplatňovať.
4. Zákon limituje využívanie obnoviteľných zdrojov energie na výrobu elektriny len do približne 8% všetkých zdrojov (čo predstavuje výšku strát vo vedení). Nad touto hranicou už nemusia vykúpiť ani kilowatt bez ohľadu na to, akú cenu by za elektrinu zaplatili.
5. Zákon v rámci pripomienkového konania akceptoval najmä pripomienky distribučných spoločností a fosílnej energetiky. Okrem iného stanovuje povinnosť odoberať vyrobenú elektrinu tak, aby neohrozila bezpečnosť siete a stabilitu distribúcie, čo môže znamenať, že distribučná spoločnosť si nájde dôvod na selektívne pripájanie alebo nepripájanie zdrojov elektriny.
6. Z formulácie zákona vyplýva, že zákon garantuje odber elektriny 15 rokov, a po tomto čase umožňuje výrobcu odpojiť zo siete, pričom životnosť zariadení je 30 rokov.“¹⁰

⁹ Zákon č. 309/2009 Z. z.

¹⁰ <http://www.e-filip.sk/default.aspx?contentID=5309>

5.2 Európska únia a podpora obnoviteľných zdrojov energie

V roku 2006 tvorili obnoviteľné zdroje v Európskej únii 8,8% celkovej spotreby elektrickej energie. O dva roky neskôr to bolo už 10,3% z celkovej spotreby. Cieľ Európskej únie je, aby do roku 2020 bol podiel obnoviteľných zdrojov 20% z celkovej spotreby energie. Takisto Slovensko sa muselo pred vstupom do Európskej únie zaviazat', že z obnoviteľných zdrojov vykryje do roku 2010 31% energetických potrieb. Toto sa ukázalo ako nereálne a nesplniteľné, a preto bola dohoda upravená. Momentálny cieľ je 14% do roku 2020. Podpora projektov z fondov Európskej únie a vysoké výkupné ceny z obnoviteľných zdrojov by mali tomuto procesu dopomôcť. Elektrická energia zo všetkých obnoviteľných zdrojov má vysoké garantované výkupné ceny od štátu, no slnečná energia je úplne na vrchole. Táto elektrina je až šesťkrát drahšia ako trhovú cenu elektrickej energie. Je to spôsobené návratnosťou investícií. Keďže počiatočné náklady pri založení slnečnej elektrárne a výrobe solárnej elektrickej energie sú veľmi vysoké a štátom určená návratnosť investícií do obnoviteľných zdrojov je osem rokov, musia byť garantované výkupné ceny takto nastavené.

Prehľad niektorých krajín Európskej únie, ktoré sú na vrchole a na chvoste rebríčka v podiele obnoviteľných zdrojov na celkovej spotrebe elektrickej energie:

- Švédsko – 44,4 %, Fínsko – 30,5 %, Lotyšsko – 29,9 %, Rakúsko – 28,5 %
- Belgicko – 3,3 %, Holandsko – 3,2 %, Veľká Británia – 3,2 %, Luxembursko – 2,1 %, Malta – 0,2 %

6 PROBLEMATIKA Z EKONOMICKÉHO HĽADISKA

6.1 Náklady spojené s výstavbou a prevádzkou solárnej elektrárne

Podnikateľov investujúcich do obnoviteľných zdrojov energií vždy zaujíma ekonomická efektivita. Ekonomická efektivita v jednoduchosti znamená, že príjmy by mali presahovať výdavky v takej miere, aby bola návratnosť investícií pre investorov prijateľná. Výdavky môžeme rozdeliť na počiatočné náklady, periodické reinvestície a náklady spojené s udržiavaním zariadenia. Pri výstavbe solárnej elektrárne medzi počiatočné náklady patrí výkup a prípadná úprava pozemkov, nákup, dodanie a montáž fotovoltaických panelov i ostatných potrebných komponentov, stavebné úpravy a samozrejme pracovná sila. Zatiaľ čo počiatočné náklady sú jednorazové, reinvestície vznikajú takmer pravidelne každých niekoľko rokov. Sú spôsobené opotrebovaním jednotlivých komponentov celku a nutnosťou vymeniť ich. Výhodou je, že v súčasnosti predávané fotovoltaické články majú uvádzanú životnosť od 20 do 30 rokov, čiže potreba reinvestovať príde až dávno potom, čo sa investorom navráti ich investície. Okrem prvotných nákladov a periodických reinvestícií existujú náklady spojené s udržiavaním zariadenia. Medzi tieto náklady patrí platenie poplatkov za prenájom pozemkov (ak neboli odkúpené), obsluha zariadení, stráženie objektu, čistenie a pravidelná kontrola jednotlivých súčastí, dane, poistenie majetku a iné poplatky.

6.2 Ostatné náklady

Okrem primárnych nákladov si uvedieme aj niektoré hotovostné toky, ktoré by sme mali brať do úvahy:

- *Utočené náklady* – opak budúcich nákladov. Sú to náklady, ktoré už boli vynaložené a nedajú sa vrátiť naspäť. V budúcom rozhodovaní ich nemôžeme brať do úvahy.

- *Alternatívne náklady* – nazývame ich aj náklady obetovanej príležitosti. Je to peňažná hodnota najhodnotnejšej z možných alternatív, ktorých sa podnikateľ vzdá pri uprednostnení zvolenej činnosti.
- *Náklady spojené so životným prostredím* – zatiaľ čo utopené náklady a alternatívne náklady jestvujú pri akomkoľvek druhu podnikania, náklady spojené so životným prostredím vznikajú len pri využívaní fosílnych palív. Vyskytli sa pokusy vypočítať a vyhodnotiť celkové náklady, no je to veľmi zložité. Dlhoročné využívanie fosílnych palív za účelom výroby elektrickej energie spôsobuje klimatické zmeny, ovplyvňuje zdravie ľudí, znečisťuje životné prostredie emisiami (SO₂, CO₂, NO_x) a jadrovým odpadom. Pre obnoviteľné zdroje sú tieto náklady zanedbateľné.
- *Náklady spojené s dovozom fosílnych palív* – týmto nákladom sa taktiež vyhneme pri produkcii elektrickej energie prostredníctvom slnečných elektrární. Okrem toho sa obnoviteľné zdroje väčšinou získajú v krajine, kde sa následne spracujú a využijú. To značí vznik nových pracovných miest, rast miezd, daní a nakoniec rast hrubého domáceho produktu.

6.3 Výkupná cena od štátu

Keďže sa Slovenská republika zaviazala, že do roku 2020 bude 14% z celkovej spotreby elektriny vykryté z obnoviteľných zdrojov, štát sa snaží uľahčiť investorom a podnikateľským subjektom produkciu a následný výkup elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov. Jedným zo spôsobov, ktorými pomáha štát, sú garantované výkupné ceny elektriny z obnoviteľných zdrojov. Úrad pre reguláciu sieťových odvetví (ÚRSO) stanovil vo výnose z 30. júna 2010 výkupné ceny elektrickej energie vyrobenej zo slnečnej energie pre rok 2011. Výkupná cena pre zariadenia s celkovým inštalovaným výkonom do 100 kW je 387,65 €/MWh. Vyprodukovaná energia v zdrojoch s celkovým inštalovaným výkonom od 100 kW sa vykupuje za cenu 382,61 €/MWh. Oficiálnym dôvodom, prečo boli cenové hladiny nastavené takýmto spôsobom je, aby návratnosť investícií nepresahovala 8 rokov. Avšak z pohľadu samotných investorov sa návratnosť pohybuje až do 15 rokov. Je to spôsobené mnohými faktormi: vysoké ceny fotovoltaických panelov, vysoké ceny prenajatých pozemkov, meniace sa výkupné ceny od štátu, nízka slnečnosť a veľká oblačnosť počas roka apod.

7 ZÁKLADNÁ CHARAKTERISTIKA REGRESNÉHO MODELU

V predchádzajúcich kapitolách sme sa venovali produkcii elektrickej energie vo fotovoltaických článkoch prostredníctvom fotoelektrického javu, slnečnému žiareniu a účinnosti jeho premeny jednotlivými typmi fotovoltaických panelov. Poukázali sme na zvýšenie účinnosti fotovoltaických článkov úpravou povrchu, systémom natáčania panelov alebo pomocou koncentrátorov a tiež sme rozobrali právny a ekonomický pohľad na problematiku, ktoré zahŕňali štátom garantované výkupné ceny za elektrinu z obnoviteľných zdrojov. Všetky tieto potrebné informácie využijeme pri tvorbe modelu, ktorým sa budeme snažiť opísať mesačnú produkciu elektriny v jednej konkrétnej slnečnej elektrárni. Využijeme na to matematický aparát z ekonometrie.

7.1 Ekonometria

Ekonometria, doslovne ekonomické meranie, predstavuje meranie a analýzu skutočných ekonomických a finančných problémov. Pokúša sa kvantifikovať ekonomickú realitu a premostiť priepasť medzi abstraktným svetom economickej teórie a skutočnou ekonomickou ľudskou aktivitou. Ekonometria má na tri hlavné účely:

- Opísať ekonomickú realitu
- Testovať hypotézy o economickej teórii
- Predpovedať budúcu ekonomickú aktivitu

Najjednoduchšie využitie ekonometrie je opis economickej reality. Ekonometriu môžeme využiť na kvantifikovanie economickej aktivity, pretože nám dovoľuje použiť čísla v rovnicach, ktoré doposiaľ obsahovali len abstraktné znaky. Ďalej v práci sa budeme zameriavať najmä na opis economickej reality. Druhé a možno najpoužívanejšie využitie ekonometrie je testovanie hypotéz, t.j. hodnotenie alternatívnych teórií dôkazom. My budeme výlučne testovať signifikanciu koeficientov v našom regresnom modeli a signifikanciu celej regresie.

Je potrebné podotknúť, že na dva modely splňajúce odlišné funkcie sa môžu používať rôzne ekonometrické nástroje. To znamená, že napríklad model postavený výlučne na opisné účely môže byť odlišný od modelu, ktorý predpovedá budúcu ekonomickú aktivitu. Preto je dôležité vždy dodržať tri potrebné kroky pri odvodzovaní modelu:

- Špecifikovať modely a vzťahy, ktoré budeme ďalej študovať
- Zozbierať údaje potrebné na tvorbu modelu
- Kvantifikovať modely pomocou zozbieraných údajov

7.2 Regresná analýza

Regresná analýza slúži na kvantitatívne odhady ekonomických vzťahov, ktoré sa vyskytujú vo svete kompletne v teoretickej rovine. Na predpovedanie zmeny smeru týchto vzťahov potrebujeme vedomosti nielen z ekonomickej teórie. Aby sme odhadli množstvo zmeny, potrebujeme vzorky údajov a spôsob, akým budeme medzi nimi určovať vzťahy. Na určovanie takýchto vzťahov sa najčastejšie používa práve regresná analýza. Úlohou tejto štatistickej metódy je ozrejmiť zmeny jednej závislej premennej ako funkcie zmien iných premenných nazývaných nezávislé (vysvetľujúce) premenné prostredníctvom jednoduchého vzťahu:

$$Y = f(X_i) \quad (1)$$

kde Y je závislá premenná a X_i sú nezávislé premenné. Ak sa niektorá z nezávislých premenných X_i zvýši o jednotku, potom sa závislá premenná Y zvýši, resp. zníži o určité množstvo. Akokoľvek sú výsledky regresie štatisticky signifikantné, nedokazujú kauzalitu. Sú však schopné testovať silu a smer zahrnutých kvantitatívnych vzťahov. Regresná analýza je prirodzený nástroj pre ekonómov, pretože väčšinu ekonomických problémov je možné riešiť funkcionálnym vzťahom (1).

7.3 Lineárny regresný model

Jednoduchý lineárny regresný model predstavuje model obsahujúci jednu nezávislú premennú:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X. \quad (2)$$

Rovnica (2) nám udáva, že závislá premenná Y je jednoduchá lineárna funkcia nezávislej premennej X . β_0 a β_1 sú koeficienty určujúce súradnice priamky v akomkoľvek bode. β_0 je konštanta definujúca veľkosť Y v prípade, že X sa rovná nule. β_1 je koeficient sklonu a indikuje množstvo, o aké sa zmení Y , keď X zmeníme o jednu jednotku. Priamka na grafe 7.1 ilustruje vzťah medzi koeficientmi a regresným modelom. Koeficient sklonu β_1 zobrazuje odpoveď Y na zmenu X . Po zväčšení X_1 na X_2 (ΔX) sa hodnota Y zvýši z Y_1 na Y_2 (ΔY):

$$\beta_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

Musíme rozlišovať medzi rovnicou, ktorá je lineárna v premenných a tou, ktorá je lineárna v koeficientoch. Napríklad rovnica lineárna v koeficientoch β_0 a β_1 aj v premenných je (2), avšak nasledujúca rovnica nie je lineárna v premenných:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X^2. \quad (3)$$

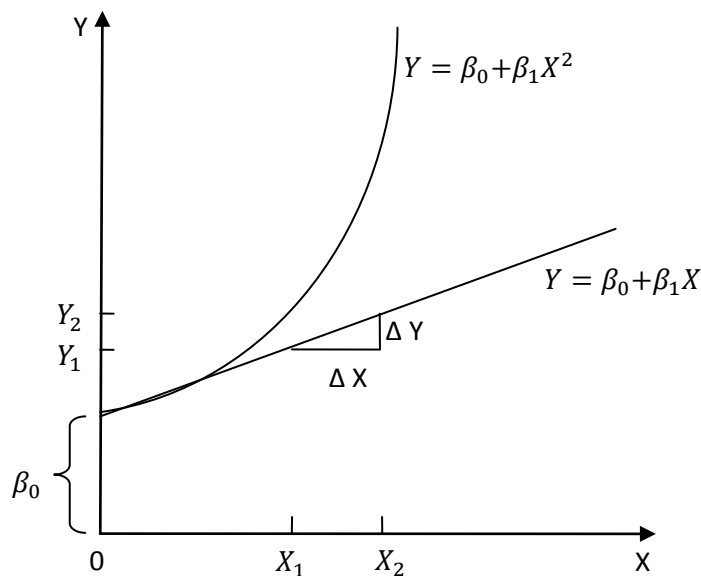
Grafický rozdiel si môžeme všimnúť na grafe 7.1. Rovnica (4) nie je lineárna v koeficientoch:

$$Y = \beta_0 + X^{\beta_1}. \quad (4)$$

V skutočnosti zo všetkých možných rovníc sú lineárne v koeficientoch β_0 a β_1 len funkcie s nasledovnou formou:

$$f(Y) = \beta_0 + \beta_1 f(X). \quad (5)$$

Lineárna regresia musí byť lineárna v koeficientoch, no nie je nevyhnutne potrebné, aby bola lineárna aj v premenných.



Graf 7.1: Grafická reprezentácia koeficientov regresnej priamky

7.4 Stochastická chyba

Okrem odchýlky v závislej premennej Y , ktorá je spôsobená nezávislou premennou X , takmer vždy existuje odchýlka pochádzajúca z iných zdrojov. Táto dodatočná chyba väčšinou pochádza od vynechaných vysvetľujúcich premenných (napríklad X_2, X_3). Hoci aj ak sú tieto premenné dodané do rovnice, stále bude existovať určitá odchýlka, ktorá jednoducho nemôže byť vysvetlená modelom. Odchýlky tohto typu prichádzajú z rôznych zdrojov ako: vynechané vplyvy, chyby merania, nesprávna funkcionálna forma alebo čisto náhodné a totálne nepredvídateľné príhody. Ak pripustíme existenciu neodstrániteľnej a nevysvetliteľnej odchýlky (chyby), musíme do regresného modelu pridať stochastickú (náhodnú) chybu. Do stochastickej chyby v regresnom modeli zahrňame všetky odchýlky v Y , ktoré nemôžu byť vysvetlené premennou X . Stochastická chyba sa väčšinou znázorňuje symbolom ε a po jej dodaní do rovnice vyzerá regresný model nasledovne:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon. \quad (6)$$

Rovnica (6) obsahuje dve zložky: deterministickú a stochastickú, resp. náhodnú zložku. Časť $\beta_0 + \beta_1 X$ sa nazýva deterministická zložka regresného modelu, pretože indikuje hodnotu závislej premennej Y , ktorá je determinovaná danou hodnotou premennej X , o ktorej sa predpokladá, že je nestochastická.

7.5 Lineárny regresný model obsahujúci k-premenných

Ekonomické modely zvyčajne zahŕňajú simultánne existenciu niekoľkých vzťahov. Inak povedané model obsahuje väčšinou viac než jednu vysvetľujúcu premennú. Preto budeme uvažovať o rozšírení rovnice na $(k - 1)$ nezávislých premenných, kde k je vo všeobecnosti väčšie než dva. Model potom bude vyzerat' nasledovne:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_{k-1} X_{k-1i} + \varepsilon_i. \quad (7)$$

Táto rovnica pozostáva z $(k - 1)$ vysvetľujúcich premenných, menovite z X_1, X_2, \dots, X_{k-1} , o ktorých sa predpokladá, že majú vplyv na závislú premennú Y . Vidíme, že rovnica je lineárna v koeficientoch $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{k-1}$.

Predpokladáme, že model, ktorý budeme odvodzovať, bude obsahovať viacero nezávislých premenných. Preto je pre nás výhodnejšie sformulovať si maticový zápis všeobecného lineárneho modelu obsahujúceho k-premenných:

$$\begin{pmatrix} \vdots \\ y \\ \vdots \end{pmatrix} = \beta_0 \begin{pmatrix} \vdots \\ x_0 \\ \vdots \end{pmatrix} + \beta_1 \begin{pmatrix} \vdots \\ x_1 \\ \vdots \end{pmatrix} + \beta_2 \begin{pmatrix} \vdots \\ x_2 \\ \vdots \end{pmatrix} + \dots + \beta_{k-1} \begin{pmatrix} \vdots \\ x_{k-1} \\ \vdots \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \vdots \\ \varepsilon \\ \vdots \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Vektor y vyjadruje lineárnu kombináciu vektorov x plus vektoru chýb ε . Vektor x_0 predstavuje stĺpec jednotiek. Zozbieranie všetkých vektorov x_i do matice X a všetkých koeficientov β_i do vektora β nám umožní ešte jednoduchší zápis:

$$y = X\beta + \varepsilon, \quad (9)$$

kde

$$X = \begin{pmatrix} 1 & X_{11} & \dots & X_{k-1,1} \\ 1 & X_{12} & \dots & X_{k-1,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{1n} & \dots & X_{k-1,n} \end{pmatrix} \text{ a } \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_{k-1} \end{pmatrix}.$$

7.6 Metóda najmenších štvorcov

Ak neznámy vektor β v rovnici (9) nahradíme nejakým odhadom b , týmto spôsobom definujeme vektor reziduí e :

$$e = y - Xb.$$

Metóda najmenších štvorcov spočíva v správnom zvolení b , aby sme minimalizovali sumu štvorcov $e'e$, konkrétne:

$$\begin{aligned}RSS &= e'e \\ &= (y - Xb)'(y - Xb) \\ &= y'y - b'X'y - y'Xb + b'X'Xb \\ &= y'y - 2b'X'y + b'X'Xb\end{aligned}$$

Podľa podmienky prvého rádu máme:

$$\frac{\partial(RSS)}{\partial b} = -2X'y + 2X'Xb = 0$$

z čoho dostaneme klasickú rovnicu:

$$(X'X)b = X'y. \quad (10)$$

Rovnica (10) nám hovorí, ako vektor najmenších štvorcov b súvisí s našimi zozbieranými údajmi.

7.7 Koeficient determinácie R^2 a korigovaný koeficient determinácie \bar{R}^2

Rovnicu, pomocou ktorej sme definovali vektor reziduí e , môžeme zapísať ako:

$$y = Xb + e = \hat{y} + e.$$

Z toho určíme:

$$y'y = (\hat{y} + e)'(\hat{y} + e) = \hat{y}'\hat{y} + e'e = b'X'Xb + e'e \quad (11)$$

Vzťah $y'y = \sum_{i=1}^n Y_i^2$ predstavuje sumu štvorcov skutočných hodnôt Y . Záujem sa normálne zameriava na analyzovanie odchýlky v Y meranej sumou štvorcov rozdielu odchýlok a strednej hodnoty,

$$\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_i Y_i^2 - n\bar{Y}^2$$

Teda odčítaním $n\bar{Y}^2$ od oboch strán rovnice (11) dostaneme:

$$(y'y - n\bar{Y}^2) = (b'X'Xb - n\bar{Y}^2) + e'e,$$

čo môžeme zapísať iným spôsobom:

$$TSS = ESS + RSS, \quad (12)$$

kde TSS indikuje celkovú sumu štvorcov, ESS vysvetlenú sumu štvorcov a RSS reziduálnu sumu štvorcov. Teraz poznáme jednotlivé sumy štvorcov a môžeme si charakterizovať dôležité koeficienty R^2 a \bar{R}^2 :

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} = 1 - \frac{RSS}{TSS}$$

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{RSS/(n-k)}{TSS/(n-1)} = 1 - \frac{n-1}{n-k} (1 - R^2)$$

Koeficient determinácie $R^2 \in \langle 0,1 \rangle$ a ak $R^2 = 1$, našli sme tzv. perfektný fit modelu. Čím viac sa koeficient blíži k jednotke, tým model vysvetľuje väčšiu časť celkovej variability. I keď príliš vysoké hodnoty sú väčšinou znamením, že model je až nerealisticky vhodný a vtedy ho treba nejakým spôsobom upraviť. Koeficient R^2 je jedným z najpoužívanejších kritérií pri rozhodovaní o voľbe konkrétneho tvaru regresného modelu. Korigovaný koeficient determinácie \bar{R}^2 v jednoduchosti znamená sankcionovanie za pridávanie ďalších vysvetľujúcich premenných do modelu. Vo všeobecnosti sa \bar{R}^2 považuje za rovnako dobrý, ak nie lepší ukazovateľ vhodnosti modelu.

8 MODEL

Cieľom je nájsť model, ktorý by čo najlepšie predikoval priemernú mesačnú produkciu elektrickej energie solárnej elektrárne nachádzajúcej sa na juhu Slovenska (konkrétne v obci Vinica, GPS súradnice: 48.118, 19.117). Budeme vzájomne porovnávať dva fotovoltaické systémy. Prvý z nich pozostáva z pevných fixovaných panelov so sklonom 35° a azimutom -1° (to zn. natočenie na juh) a druhý systém obsahuje dvoj-osí natáčací systém. Ostatné vlastnosti majú obidve elektrárne totožné: voľne stojace fotovoltaické panely sú vyrobené z kryštalického kremíka, inštalovaný výkon elektrárni je 990 kW, odhadované straty systému (na vedení a pri prevode na striedavý prúd v meniči prúdu) nepresahujú 12%. Keďže chceme vytvoriť model, ktorý nám ozrejní, od čoho závisí produkcia elektrickej energie, za závislú premennú zvolíme E_m , kde:

- E_m – priemerná mesačná produkcia elektriny daného systému (v kWh)

Model sa budeme snažiť zostaviť pomocou nasledujúcich nezávislých premenných. Za stručnou charakteristikou nasleduje v zátvorke príslušná jednotka, v ktorej sa konkrétna premenná vyjadruje. Ďalej určíme naše očakávanie vplyvu na E_m .

- H_m – priemerná mesačná suma globálneho žiarenia na m^2 obdržaná modulmi daného systému (v kWh/m²). Očakávame, že s rastom H_m porastie aj priemerná mesačná produkcia elektriny E_m .
- TL – Linkeho koeficient. V jednoduchosti sa dá povedať, že tento koeficient uvádza čistotu ovzdušia. Zahŕňa rôzne molekuly, aerosoly, vodnú paru a ozón nachádzajúce sa v atmosfére (-). Teda čím bude Linkeho koeficient väčší, tým menšia by mala byť produkcia elektriny E_m .
- D/G – pomer difúzneho ku globálnemu žiareniu (-). Očakávame, že s rastom pomeru D/G , produkcia elektriny klesá.
- TD – priemerná denná teplota vzduchu (v °C).
- T_{24h} – priemerná teplota vzduchu počas 24 hodín (v °C).
- NDD – sumarizuje chladné dni v mesiaci (-). NDD je suma stupňov všetkých dní, ktorých priemerná denná teplota bola pod 65°F (t.j. 18°C). NDD vypočítame tak, že vezmeme priemernú dennú teplotu a odčítame ju od 65°F . Čiže ak je priemerná

denná teplota 50°F, NDD činí 15. Ak by bola každý deň v mesiaci priemerná teplota 50°F, potom mesačné NDD bude $30 \cdot 15 = 450$.

TD, T24h a *NDD* sú ukazovatele priemernej teploty ovzdušia počas jednotlivých mesiacov. Zvýšené hodnoty prvých dvoch ukazovateľov môžu naznačovať väčšiu intenzitu slnečného žiarenia, a tým aj pozitívny vzťah medzi nárastom teploty a produkciou elektriny. Avšak pri náraste teploty narastá aj elektrický odpor, ktorý je funkciou teploty. Platí pravidlo: čím je väčší odpor vodiča, tým menšia je jeho vodivosť, a teda produkcia elektrickej energie klesá. Preto bude zaujímavé sledovať vplyv teplotných ukazovateľov na produkciu elektriny *Em*. Je však potrebné podotknúť, že *NDD* sumarizuje chladnejšie dni počas mesiaca, a preto by malo vplývať na *Em* opačne ako *TD* a *T24h*.

- *W* – priemerná mesačná rýchlosť vetra (v m/s). Vieme, že s narastajúcou teplotou fotovoltaiických článkov rastie aj elektrický odpor, a tým sa znižuje ich vodivosť. To znamená, že výroba elektriny klesá. Keďže vietor ochladzuje články (najmä v letných mesiacoch), vzťah medzi ním a produkciou elektriny by mal byť kladný.
- *C* – priemerná mesačná oblačnosť (desatiny pokrytia oblohy). Podobne ako pri *D/G* aj pri oblačnosti očakávame nepriamu závislosť.
- *R* – priemerné mesačné atmosférické zrážky (v mm). Prvotný predpoklad je, že vzťah medzi priemernou mesačnou produkciou elektriny a atmosférickými zrážkami bude nulový (čiže *R* je pre model irelevantná premenná). Dlhotrvalé dažde sú však spravidla sprevádzané mohutnou oblačnosťou a taktiež môžu ochladzovať fotovoltaiické články, čiže rast priemerných mesačných zrážok *R* môže do určitej miery ovplyvňovať produkciu elektriny *Em*.
- *O* – priemerné mesačné hodnoty atmosférického ozónu. Ozón v atmosfére meriame v Dobsonových jednotkách (v *Dj*). Pri poklese ozónu v atmosfére existuje menšia možnosť, že bude absorbovaná energia fotónov. A preto budeme očakávať medzi rastom ozónu *O* a produkciou elektriny *Em* nepriamu závislosť.

Údaje, ktoré budeme ďalej využívať, sú mesačné z prelomu rokov 2010, 2011 a pochádzajú z dvoch zdrojov: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php> (*Em*, *Hm*, *TL*, *D/G*, *TD*, *T24h*, *NDD*) a www.shmu.sk (*W*, *C*, *R*, *O*) (viď príloha). Model budeme odhadovať na základe teoretických poznatkov o možných vplyvoch jednotlivých premenných na závislú premennú a taktiež na základe grafov vzťahov medzi závislou

premennou Em a jednotlivými nezávislými premennými. Model zostavujeme pomocou metódy najmenších štvorcov v programe EViews 5.0.

8.1 Formulácia modelu pre elektrárňu s pevným sklonom panelov

Ako prvou sa budeme zaoberať solárnou elektrárnou pozostávajúcou z panelov s pevným sklonom 35° a azimutom -1° . Prvotný tvar modelu, ktorý budeme postupne meniť a upravovať, až dosiahneme čo najpodobnejší obraz reality, vyzerá nasledovne:

$$\log(Em_i) = \beta_0 + \beta_1 \log(Hm_i) + \beta_2 \log(TL_i) + \beta_3 \log(D/G_i) + \beta_4 TD_i + \beta_5 T24h_i + \beta_6 \log(NDD_i) + \beta_7 W_i + \beta_8 C_i + \beta_9 R_i + \beta_{10} O_i$$

Premenné Em (v kWh), Hm (v kWh/m²) a premenné, ktoré nie sú vyjadrené v konkrétnych jednotkách (TL , D/G a NDD) sme zlogaritmovali, čo vyjadruje percentuálne zmeny.

Dependent Variable: LOG_EM				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	6.838022	0.145998	46.83641	0.0136
LOG_HM	1.036816	0.047519	21.81910	0.0292
LOG_TL	-0.033987	0.066257	-0.512956	0.6983
LOG_D_G	0.062262	0.116243	0.535618	0.6870
TD	0.019671	0.025013	0.786425	0.5758
T24H	-0.028921	0.026669	-1.084459	0.4742
LOG_NDD	-0.002992	0.005063	-0.590989	0.6602
C	0.004811	0.003913	1.229498	0.4347
W	-0.002163	0.005219	-0.414555	0.7498
R	0.000148	0.000328	0.450618	0.7305
O	-0.000603	0.000299	-2.020697	0.2926
R-squared	0.999992	Mean dependent var		11.25789
Adjusted R-squared	0.999914	S.D. dependent var		0.517968
S.E. of regression	0.004791	Akaike info criterion		-8.495567
Sum squared resid	2.30E-05	Schwarz criterion		-8.051069
Log likelihood	61.97340	F-statistic		12855.00
Durbin-Watson stat	2.266418	Prob(F-statistic)		0.006864

Z výstupu môžeme vidieť, že F-štatistika má p-hodnotu 0.006864, čo je menej ako $\alpha = 5\%$, čiže celý model je signifikantný na hladine významnosti α . Avšak koeficienty R^2 a \bar{R}^2 sú veľmi vysoké a nezávislé premenné (s výnimkou priemernej mesačnej sumy žiarenia Hm)

sa javia na hladine významnosti 5% ako nesignifikantné (ich p-hodnota je viac ako 5%). Možností, ktoré by vyriešili tieto problémy, môže byť viacero:

- Odstrániť premenné s vysokou koreláciou
- Vylúčiť premenné, ktoré sú pre model irelevantné
- Navýšiť počet údajov

A) *Hm* ponecháme v modeli

Na začiatok sa budeme zaoberať vysokou koreláciou medzi premennými. Z korelačnej matice (viď príloha) je zrejmé, že najväčšia pozitívna korelácia je medzi *TD* a *T24h*. *TD*, *T24h* a *NDD* zastupujú v našom modeli teplotné ukazovatele, takže vysoká korelácia medzi nimi sa dala očakávať. Model postupne otestujeme s jednotlivými ukazovateľmi teploty, no predpokladáme, že bude z nich potrebné vylúčiť minimálne jeden. Tento predpoklad je založený na fakte, že prvé dve premenné vyjadrujú priemernú teplotu počas jednotlivých mesiacov (*TD* cez deň a *T24h* za plných 24 hodín) a tretia premenná sumarizuje chladné dni v mesiaci. Čiže všetky tri premenné vyjadrujú rozličným spôsobom teplotu ovzdušia počas mesiaca. Ako ďalej pri testovaní modelu zistíme, predpoklad o ponechaní len jednej z týchto premenných sa ukáže ako správny.

Takmer rovnako vysoká korelácia je aj medzi *Em* a *Hm*. Aj keď tento jav môže prispievať k vysokým hodnotám koeficientov R^2 a \bar{R}^2 , napriek tomu *Hm* zatiaľ nevylúčime z modelu, pretože tento ukazovateľ je prirodzene najvýznamnejším činiteľom, ktorý ovplyvňuje produkciu solárnej energie.

Ďalej je potrebné vylúčiť premenné, ktoré na prvý pohľad nekorelujú s ostatnými premennými, no sú zahrnuté v iných údajoch. To platí pre oblačnosť *C*, ktorú môžeme vylúčiť, pretože *D/G* a *TL* sú omnoho relevantnejšie ukazovatele pre náš model. Linkeho koeficient *TL* zachytáva hmlu, smog, vodnú paru a rôzne aerosoly a *D/G* nám presne stanovuje podiel difúzneho žiarenia k celkovému globálnemu žiareniu. Difúzne žiarenie je vlastne žiarenie rozptýlené oblačnosťou. Podobný prípad je ozón *O*, ktorý je možné vylúčiť, pretože Linkeho koeficient obsahuje medzi inými aj údaje o ozóne v atmosfére. Okrem toho miera ozónu v atmosfére ovplyvňuje klímu skôr z dlhodobého hľadiska. Priemerné mesačné atmosférické zrážky *R* podľa prvothného predpokladu vylúčime ako irelevantnú premennú, keďže po opätovnom testovaní modelu tento koeficient zostáva

neustále nesignifikantný. Po zmiených úpravách dostaneme nasledujúci upravený model:

$$\log(Em_i) = \beta_0 + \beta_1 \log(Hm_i) + \beta_2 \log(TL_i) + \beta_3 \log(D_G_i) + \beta_4 TD_i + \beta_5 W_i$$

Dependent Variable: LOG_EM				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	6.953252	0.064516	107.7753	0.0000
LOG_HM	0.944972	0.012787	73.89988	0.0000
LOG_TL	-0.008883	0.040806	-0.217683	0.8349
LOG_D_G	-0.134102	0.051436	-2.607178	0.0403
TD	-0.005605	0.000614	-9.133588	0.0001
W	-0.006295	0.002742	-2.295670	0.0615
R-squared	0.999957	Mean dependent var		11.25789
Adjusted R-squared	0.999921	S.D. dependent var		0.517968
S.E. of regression	0.004599	Akaike info criterion		-7.618956
Sum squared resid	0.000127	Schwarz criterion		-7.376503
Log likelihood	51.71374	F-statistic		27900.94
Durbin-Watson stat	2.934877	Prob(F-statistic)		0.000000

Z výstupu vidíme, že po posunutí hladiny významnosti na 10%, sú všetky odhadnuté koeficienty okrem TL signifikantné. Nesignifikantnosť Linkeho koeficientu môže znamenať, že je irelevantný, a preto ho z modelu vylúčime:

Dependent Variable: LOG_EM				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	6.940724	0.027104	256.0779	0.0000
LOG_HM	0.945596	0.011583	81.63859	0.0000
LOG_D_G	-0.128911	0.042359	-3.043284	0.0188
TD	-0.005668	0.000503	-11.26694	0.0000
W	-0.006179	0.002500	-2.471692	0.0427
R-squared	0.999957	Mean dependent var		11.25789
Adjusted R-squared	0.999932	S.D. dependent var		0.517968
S.E. of regression	0.004275	Akaike info criterion		-7.777757
Sum squared resid	0.000128	Schwarz criterion		-7.575712
Log likelihood	51.66654	F-statistic		40370.03
Durbin-Watson stat	3.017044	Prob(F-statistic)		0.000000

Tento krok potvrdil predpoklad, že premenná TL je nesignifikantná. Ako najlepší model sa javí:

$$\log(Em_i) = \beta_0 + \beta_1 \log(Hm_i) + \beta_3 \log(D_G_i) + \beta_4 TD_i + \beta_5 W_i,$$

teda za najlepši odhad priemernej mesačnej produkcie elektriny by sme mohli považovať:

$$\log(\widehat{Em}_i) = 6.9407 + 0.9456 * \log(Hm_i) - 0.1289 * \log(D_G_i) - 0.0057 * TD_i \\ - 0.0062 * W_i$$

Všetky vysvetľujúce premenné sú signifikantné a ich očakávaný vplyv na percentuálnu zmenu produkcie elektrickej energie Em sa potvrdil. Výnimkou je ukazovateľ priemernej mesačnej rýchlosti vetra W , kde by sme s jeho nárastom skôr čakali nárast produkcie elektrickej energie Em .

B) Hm vynecháme z modelu

Odhadnutý model sa na prvý pohľad javí ako pomerne vhodný. Na druhej strane veľmi vysoké hodnoty koeficientov R^2 a \bar{R}^2 sa pri úpravách modelu neznížili, a preto je potrebné skúsiť iný prístup.

Opäť začneme so všetkými dostupnými premennými a znovu sa pozrieme na maticu korelácií (viď príloha). Postupne vylúčime premenné, ktoré sú sprevádzané vysokými koreláciami, aby sme sa zbavili prípadnej multikolinearity a budeme sledovať model. Tentoraz skúsime vylúčiť aj priemernú mesačnú sumu globálneho žiarenia Hm , kvôli vysokej korelácii so závislou premennou Em . Táto vysoká hodnota je spôsobená tým, že Em reprezentuje produkciu elektriny prostredníctvom fotovoltaických panelov zachytávajúcich slnečné žiarenie, ktoré vyjadruje premenná Hm . Čiže sa v podstate jedná o rovnaké, resp. takmer rovnaké hodnoty vyjadrené skrz dve rozdielne premenné. Strach, že stratíme prirodzene najvýznamnejší činiteľ ovplyvňujúci model, je neopodstatnený z dôvodu prítomnosti premennej D/G . Vieme, že D/G vyjadruje pomer difúzneho ku globálnemu žiareniu, takže slnečné žiarenie dopadajúce na fotovoltaické články bude v modeli prítomné. Okrem Hm sa zbavíme dvoch teplotných parametrov aj irelevantných premenných (rovnako ako v predchádzajúcom prípade):

Dependent Variable: LOG_EM				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	11.32484	1.212303	9.341593	0.0000
LOG_TL	-0.885646	0.773796	-1.144547	0.2900
LOG_D_G	-2.323249	0.702365	-3.307750	0.0130
NDD	-0.001258	0.000409	-3.074604	0.0180
W	0.049759	0.047185	1.054548	0.3267
R-squared	0.979442	Mean dependent var		11.25789
Adjusted R-squared	0.967695	S.D. dependent var		0.517968
S.E. of regression	0.093098	Akaike info criterion		-1.615991
Sum squared resid	0.060671	Schwarz criterion		-1.413946
Log likelihood	14.69595	F-statistic		83.37499
Durbin-Watson stat	2.465075	Prob(F-statistic)		0.000006

Vo výstupe, ktorý sme po úpravách dostali, je možné vidieť, že Linkeho koeficient TL a premenná W symbolizujúca priemernú mesačnú rýchlosť vetra sú nesignifikantné. Preto ich ďalej skúsime po jednom, resp. obidve eliminovať. Ako najlepší vyzerá ten model, z ktorého sme odstránili Linkeho koeficient TL . Ak posunieme hladinu významnosti na 10%, tak všetky odhadnuté koeficienty sú signifikantné a majú znamienka podľa očakávaní. Dokonca hodnoty koeficientov R^2 a \bar{R}^2 sú prijateľné a v porovnaní s predchádzajúcim modelom, ktorý zahŕňa premennú Hm , sú nízke:

Dependent Variable: LOG_EM				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	10.06437	0.516534	19.48443	0.0000
LOG_D_G	-1.993405	0.652811	-3.053571	0.0157
NDD	-0.001099	0.000392	-2.801944	0.0231
W	0.079673	0.040039	1.989888	0.0818
R-squared	0.975595	Mean dependent var		11.25789
Adjusted R-squared	0.966443	S.D. dependent var		0.517968
S.E. of regression	0.094885	Akaike info criterion		-1.611110
Sum squared resid	0.072025	Schwarz criterion		-1.449474
Log likelihood	13.66666	F-statistic		106.5994
Durbin-Watson stat	2.184245	Prob(F-statistic)		0.000001

Teda za najlepší odhad priemernej mesačnej produkcie elektriny v tomto prípade považujeme model:

$$\log(\widehat{Em}_t) = 10.0644 - 1.9934 * \log(D_G)_t - 0.0011 * NDD_t + 0.0797 * W_t$$

8.2 Formulácia modelu pre elektrárň so systémom dvoj-osého natáčania panelov

Solárna elektrárň s dvoj-osím natáčacím systémom využíva presné sledovanie slnka, a tým zabezpečuje kolmý dopad slnečného žiarenia počas celého dňa i počas celého roka. Preto je zrejmé, že zo všetkých údajov, ktoré máme k dispozícii, sa vzhľadom na predchádzajúci solárny systém s pevným sklonom panelov budú meniť len Em a Hm .

A) Hm ponecháme v modeli

Do počiatočného modelu, ktorý budeme následne upravovať, až dosiahneme čo najhodnovernejší obraz reality, zahrnieme na začiatku všetky dostupné premenné. Ďalší postup bude pripomínať tvorbu modelu z predchádzajúcej podkapitoly 8.1. Premenné Em (v kWh), Hm (v kWh/m²) a faktory TL , D/G , NDD zlogaritmujeme, čo vyjadruje percentuálnu zmenu. Po nahliadnutí na korelačnú maticu (viď príloha) vidíme, že niektoré premenné sú výrazne korelované s ostatnými. Ide najmä o teplotné ukazovatele TD , $T24h$, pomer difúzneho ku globálnemu žiareniu D/G a samotné Hm . Pre začiatok $T24h$, NDD eliminujeme a Hm , D/G v modeli ponecháme. Jeho počiatočná forma bude teda vyzeráť nasledovne:

$$\log(Em_i) = \beta_0 + \beta_1 \log(Hm_i) + \beta_2 \log(TL_i) + \beta_3 \log(D/G_i) + \beta_4 TD_i + \beta_5 C_i + \beta_6 W_i + \beta_7 R_i + \beta_8 O_i$$

a výstupnú tabuľku prislúchajúcu takejto forme modelu si môžeme všimnúť na nasledujúcej strane:

Dependent Variable: LOG(EM)				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	6.815392	0.078918	86.36073	0.0000
LOG(HM)	1.008728	0.025787	39.11718	0.0000
LOG(TL)	-0.023752	0.032954	-0.720764	0.5231
LOG(D_G)	-0.011995	0.062440	-0.192111	0.8599
TD	-0.006621	0.000856	-7.737067	0.0045
C	0.002305	0.001925	1.197429	0.3171
W	0.001130	0.002541	0.444506	0.6868
R	0.000116	9.44E-05	1.229218	0.3066
O	-0.000303	0.000137	-2.214832	0.1136
R-squared	0.999994	Mean dependent var		11.47641
Adjusted R-squared	0.999978	S.D. dependent var		0.565335
S.E. of regression	0.002638	Akaike info criterion		-8.924207
Sum squared resid	2.09E-05	Schwarz criterion		-8.560527
Log likelihood	62.54524	F-statistic		63168.67
Durbin-Watson stat	2.823378	Prob(F-statistic)		0.000000

Model je síce signifikantný, no okrem priemerného globálneho žiarenia Hm a priemernej dennej teploty vzduchu TD sú všetky premenné na hladine významnosti 5% nesignifikantné. Potrebnými úpravami, prostredníctvom ktorých sme sa postupne zbavili irelevantných premenných (TL , R) spolu s premennými, ktoré sú obsiahnuté v iných údajoch (C , O) sme dospeli k výstupu:

Dependent Variable: LOG(EM)				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	6.893894	0.019066	361.5886	0.0000
LOG(HM)	0.953660	0.007738	123.2450	0.0000
LOG(D_G)	-0.107021	0.028940	-3.698049	0.0077
TD	-0.004774	0.000376	-12.68641	0.0000
W	0.000612	0.001798	0.340097	0.7438
R-squared	0.999981	Mean dependent var		11.47641
Adjusted R-squared	0.999971	S.D. dependent var		0.565335
S.E. of regression	0.003054	Akaike info criterion		-8.450715
Sum squared resid	6.53E-05	Schwarz criterion		-8.248671
Log likelihood	55.70429	F-statistic		94262.40
Durbin-Watson stat	3.102652	Prob(F-statistic)		0.000000

Dostali sme model, kde figurujú rovnaké premenné ako v modeli pre solárnu elektrárňu s pevným sklonom panelov s Hm ponechaným v modeli. Rozdielom je, že priemerná mesačná rýchlosť vetra W sa javí ako nesignifikantná premenná, a preto ju vylúčime z modelu. Môže to byť spôsobené tým, že natáčanie panelov vnáša do modelu mnoho

neistôt a z tohto dôvodu sa model stáva štatisticky ťažko interpretovateľný (napríklad panel sa otočí za slnkom o niekoľko stupňov, no smer vetra zostane rovnaký).

Dependent Variable: LOG(EM)				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	6.892001	0.017197	400.7639	0.0000
LOG(HM)	0.955170	0.005977	159.8000	0.0000
LOG(D_G)	-0.103728	0.025721	-4.032869	0.0038
TD	-0.004857	0.000270	-18.01990	0.0000
R-squared	0.999981	Mean dependent var		11.47641
Adjusted R-squared	0.999974	S.D. dependent var		0.565335
S.E. of regression	0.002880	Akaike info criterion		-8.600993
Sum squared resid	6.63E-05	Schwarz criterion		-8.439358
Log likelihood	55.60596	F-statistic		141303.0
Durbin-Watson stat	3.129564	Prob(F-statistic)		0.000000

Podľa predchádzajúceho kroku je premenná W irelevantná, a preto za najvhodnejší model považujeme:

$$\log(Em_i) = \beta_0 + \beta_1 \log(Hm_i) + \beta_2 \log(D_G)_i + \beta_3 TD_i$$

čiže najlepším odhadom priemernej produkcie elektrickej energie je tento model:

$$\log(\widehat{Em}_i) = 6.8920 + 0.9552 * \log(Hm_i) - 0.1037 * \log(D_G)_i - 0.0049 * TD_i$$

Hm reprezentuje sumu slnečného žiarenia zachytenú fotovoltaickými panelmi, ktoré sú zodpovedné za transformáciu žiarenia na elektrickú energiu a Em vyjadruje túto vyprodukovanú elektrinu. Preto považujeme Hm za prirodzene najvýznamnejší činiteľ ovplyvňujúci produkciu solárnej energie a model sme postavili hlavne na tejto premennej. Sice sú vysvetľujúce premenné i samotný model signifikantné, no stále máme prívysoké hodnoty R^2 a \bar{R}^2 . Preto skúsime tentoraz premennú Hm kvôli jej vysokej korelácii s Em vynechať z modelu.

B) Hm vynecháme z modelu

Zo všetkých odskúšaných modelov vyzerá ako najvhodnejší ten, ktorý obsahuje tri vysvetľujúce premenné: pomer difúzneho ku globálnemu žiareniu D/G , teplotný faktor NDD a priemernú mesačnú rýchlosť vetra W :

Dependent Variable: LOG_EM				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	10.39923	0.522235	19.91292	0.0000
LOG_D_G	-1.882712	0.660017	-2.852520	0.0214
NDD	-0.001377	0.000397	-3.473406	0.0084
W	0.084489	0.040481	2.087119	0.0703
R-squared	0.979058	Mean dependent var		11.47641
Adjusted R-squared	0.971205	S.D. dependent var		0.565335
S.E. of regression	0.095932	Akaike info criterion		-1.589154
Sum squared resid	0.073623	Schwarz criterion		-1.427519
Log likelihood	13.53493	F-statistic		124.6710
Durbin-Watson stat	2.148341	Prob(F-statistic)		0.000000

Pre porovnanie skúsime do modelu doplniť navyše Linkeho koeficient:

Dependent Variable: LOG_EM				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	11.58669	1.240704	9.338801	0.0000
LOG_TL	-0.834345	0.791924	-1.053567	0.3271
LOG_D_G	-2.193449	0.718820	-3.051457	0.0185
NDD	-0.001527	0.000419	-3.647307	0.0082
W	0.056307	0.048291	1.166009	0.2818
R-squared	0.981925	Mean dependent var		11.47641
Adjusted R-squared	0.971596	S.D. dependent var		0.565335
S.E. of regression	0.095279	Akaike info criterion		-1.569676
Sum squared resid	0.063547	Schwarz criterion		-1.367631
Log likelihood	14.41805	F-statistic		95.06643
Durbin-Watson stat	2.368165	Prob(F-statistic)		0.000004

Pridanie *TL* do modelu spôsobilo, že sa vyskytli v modeli dve nesignifikantné premenné. Preto sa vrátime k modelu s tromi vysvetľujúcimi premennými. Tie sú na posunutej hladine významnosti 10% všetky signifikantné, model je signifikantný, hodnoty koeficientov R^2 a \bar{R}^2 sa oproti pôvodnému modelu, ktorý zahŕňal aj *Hm* zmenšili a sú pre nás prijateľné. Čiže model, ktorý najlepšie odhaduje reálnu mesačnú produkciu elektrickej energie vyzerá nasledovne:

$$\log(\widehat{Em}_i) = 10.3992 - 1.8827 * \log(D_G)_i - 0.0014 * NDD_i + 0.0845 * W_i$$

8.3 Zhrnutie a porovnanie modelov

Pre obidva typy elektrární sme navrhli po dva modely vyjadrujúce závislosť produkcie elektrickej energie od niektorých vysvetľujúcich premenných. Tieto odvodené modely porovnáme a navrhujeme, ktorý z nich sa javí ako vhodnejší a viac korešponduje s reálnymi očakávaniami vplyvu jednotlivých premenných na výrobu elektriny.

1. Elektráreň s pevným sklonom panelov

Model 1.a:

$$\log(\widehat{Em}_i) = 6.9407 + 0.9456 * \log(Hm_i) - 0.1289 * \log(D_G_i) - 0.0057 * TD_i - 0.0062 * W_i$$

Model 1.b:

$$\log(\widehat{Em}_i) = 10.0644 - 1.9934 * \log(D_G_i) - 0.0011 * NDD_i + 0.0797 * W_i$$

Druhý model je postavený na vynechaní priemernej mesačnej sumy globálneho žiarenia Hm , čiže tá v modeli 1.b pochopiteľne nefiguruje. Ako sme si pri odvodzovaní modelu 1.b vysvetlili, toto pre nás nie je problém. Naopak odstránili sme tým veľmi vysoké hodnoty korelácií medzi premennými. Premenná D/G vyjadruje pomer rozptýleného žiarenia k celkovému žiareniu, a teda slnečné žiarenie dopadajúce na fotovoltaičné články bude v takejto forme v modeli prítomné.

Zaujímavé vyšli znamienka pri koeficientoch teplotných ukazovateľov. Model 1.a nám hovorí, že zo zvyšujúcou sa priemernou dennou teplotou TD bude klesať produkcia elektriny daného systému. Naopak v modeli 1.b nám koeficient pri NDD podáva informáciu, že so zvyšujúcim sa počtom chladných dní v mesiaci sa znižuje výroba elektrickej energie. Podľa tohto rozporu si nemôžeme byť istý, ktorá možnosť je z praktického hľadiska tá správna. Vyššie teploty môžu znamenať väčšie zahrievanie, a teda vyšší odpor, čo znamená, že sa produkcia elektriny bude znižovať (model 1.a) alebo vyššie teploty môžu jednoducho znamenať väčšiu intenzitu slnečného žiarenia, a tým aj väčšiu produkciu elektriny (model 1.b).

Pri konečnom rozhodovaní o správnosti modelu nám pomôže premenná W a znamienko jej koeficientu. Vidíme, že v modeli 1.b má táto premenná očakávané znamienko. Je zrejmé, že so zvyšovaním rýchlosti vetra sa najmä v letných, no i v jarných a jesenných mesiacoch fotovoltaické panely ochladzujú, a tým sa zvyšuje priemerná mesačná produkcia elektrickej energie Em . Čiže z viacerých stránok sa ukazuje ako vhodnejšie opisujúci prax model 1.b:

$$\log(\widehat{Em}_i) = 10.0644 - 1.9934 * \log(D_{G_i}) - 0.0011 * NDD_i + 0.0797 * W_i$$

Z modelu možno vyčítať, že výrobu elektriny v solárnej elektrárni s pevným sklonom fotovoltaických panelov najviac ovplyvňuje pomer difúznej zložky k celkovému slnečnému žiareniu. Pri jednopercentnom zvýšení pomeru sa celková produkcia elektrickej energie znižuje približne o 1.99%. V menšej miere výrobu zvyšujú silnejší vietor a znižovanie počtu chladných dní v mesiaci.

2. Elektráreň s dvoj-osím natačacím systémom panelov

Model 2.a:

$$\log(\widehat{Em}_i) = 6.8920 + 0.9552 * \log(Hm_i) - 0.1037 * \log(D_{G_i}) - 0.0049 * TD_i$$

Model 2.b:

$$\log(\widehat{Em}_i) = 10.3992 - 1.8827 * \log(D_{G_i}) - 0.0014 * NDD_i + 0.0845 * W_i$$

V druhom modeli absentuje premenná Hm vyjadrujúca sumu globálneho žiarenia. Jej elimináciou sme sa zbavili aj veľmi vysokých korelácií medzi premennými. Slnečné žiarenie dopadajúce na fotovoltaické články je tu zastúpené prostredníctvom premennej D/G .

Rovnako ako pri predchádzajúcich dvoch modeloch, aj tu sa odlišujú znamienka pri koeficientoch teplotných ukazovateľov. Podľa modelu 2.a s nárastom dennej teploty TD klesá výroba elektrickej energie. Naopak model 2.b hovorí, že s nárastom počtu chladnejších dní klesá výroba elektriny. Na základe výberu modelu pre elektráreň s pevným sklonom panelov môžeme posúdiť, že reálnejšia sa javí možnosť, v ktorej s nárastom počtu chladnejších dní poklesne produkcia elektriny, a teda model 2.b. Ďalšia informácia, ktorá nás v tom utvrdí je, že v modeli 2.a vôbec nefiguruje dôležitá premenná –

rýchlosť vetra W . Podľa predchádzajúcich informácií sme došli k záveru, že priemernú mesačnú produkciu elektriny dvoj-osého natáčacieho systému budeme modelovať pomocou regresie:

$$\log(\widehat{Em}_i) = 10.3992 - 1.8827 * \log(D_{G_i}) - 0.0014 * NDD_i + 0.0845 * W_i$$

Premenná D/G ovplyvňuje produkciu v najväčšej miere. Jednopercentné zvýšenie pomeru difúzneho ku globálnemu žiareniu spôsobí zníženie celkovej produkcie elektriny o 1,88%. So znižovaním počtu chladnejších dní v mesiaci a s väčšou priemernou rýchlosťou vetra sa bude percento výroby elektriny len mierne zvyšovať.

8.4 Testovanie modelov

Dva modely sme v podkapitole 8.3 vylúčili a ponechali sme zvyšné dva, ktoré lepšie opisovali realitu a viac korešpondovali s našimi očakávaniami vplyvu nezávislých premenných (najmä vetra a teplotných ukazovateľov) na produkciu elektrickej energie. Zvolili sme model 1 pre elektrárňu s fotovoltaickými panelmi so zafixovaným sklonom:

$$\log(\widehat{Em}_i) = 10.0644 - 1.9934 * \log(D_{G_i}) - 0.0011 * NDD_i + 0.0797 * W_i$$

a model 2 pre elektrárňu so systémom dvoj-osého natáčania panelov za slnkom:

$$\log(\widehat{Em}_i) = 10.3992 - 1.8827 * \log(D_{G_i}) - 0.0014 * NDD_i + 0.0845 * W_i$$

Na obidvoch modeloch budeme testovať signifikanciu jednotlivých koeficientov, celej regresie a prítomnosť heteroskedasticity.

8.4.1 Testovanie signifikancie koeficientov

$$H_0: \beta_i = 0 \quad \text{vs} \quad H_1: \beta_i \neq 0$$

- $T = \hat{\beta}_i / S_{\hat{\beta}_i} \sim t_{n-k}$ (za platnosti H_0)

- Ak $p_{hodnota_i} < \alpha \%$, potom H_0 zamietame, čo znamená, že koeficient je signifikantný

Model 1:

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	10.06437	0.516534	19.48443	0.0000
LOG_D_G	-1.993405	0.652811	-3.053571	0.0157
NDD	-0.001099	0.000392	-2.801944	0.0231
WIND_2	0.079673	0.040039	1.989888	0.0818

V modeli 1 sú na hladine významnosti $\alpha = 10\%$ signifikantné koeficienty pri všetkých premenných.

Model 2:

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	10.39923	0.522235	19.91292	0.0000
LOG_D_G	-1.882712	0.660017	-2.852520	0.0214
NDD	-0.001377	0.000397	-3.473406	0.0084
WIND_2	0.084489	0.040481	2.087119	0.0703

Ak určíme hladinu významnosti $\alpha = 10\%$, v modeli 2 budú signifikantné koeficienty pri všetkých premenných.

8.4.2 Testovanie signifikancie regresie

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n \quad \text{vs.} \quad H_1: H_0 \text{ neplatí}$$

- $F = \frac{\frac{ESS}{k-1}}{\frac{RSS}{n-k}} \sim F_{k-1, n-k}$ (za platnosti H_0)

- Ak $p_{hodnota_i} < \alpha \%$, tak H_0 zamietame, a teda regresia je signifikantná

Model 1:

F-statistic	106.5994
Prob(F-statistic)	0.000001

Model 2:

F-statistic	124.6710
Prob(F-statistic)	0.000000

Obidva odhadnuté regresné modely sú na hladine významnosti $\alpha = 5\%$ signifikantné.

8.4.3 Testovanie heteroskedasticity

Heteroskedasticita znamená, že disperzia náhodných chýb nie je konštantná, čo porušuje jeden zo základných predpokladov o modeli – predpoklad o konštantnosti disperzií. Výskyt heteroskedasticity v modeli zvyšuje varianciu koeficientov a znižuje výsledky t-testov. Tým spôsobuje neplatnosť testov regresných koeficientov. Existuje niekoľko testov na odhalenie heteroskedasticity. My sme zvolili dva z nich: White-ov test heteroskedasticity (no cross terms) a White-ov test heteroskedasticity (cross terms). Z výstupných tabuliek je dôležitá hrubo vyznačená p-hodnota.

H_0 : v modeli je homoskedasticita vs. H_1 : v modeli je heteroskedasticita

Model 1:

White Heteroskedasticity Test: (NO CROSS TERMS)			
F-statistic	0.639441	Probability	0.700846
Obs*R-squared	5.210094	Probability	0.517163

White Heteroskedasticity Test: (CROSS TERMS)			
F-statistic	2.872760	Probability	0.284869
Obs*R-squared	11.13839	Probability	0.266342

Model 2:

White Heteroskedasticity Test: (NO CROSS TERMS)			
F-statistic	0.765767	Probability	0.627437
Obs*R-squared	5.746483	Probability	0.452180

White Heteroskedasticity Test: (CROSS TERMS)			
F-statistic	1.428468	Probability	0.478298
Obs*R-squared	10.38451	Probability	0.320262

Vo výstupných tabuľkách vidíme, že p-hodnoty sú väčšie ako 5% vo všetkých testoch pri oboch modeloch, a preto na hladine významnosti $\alpha = 5\%$ nulovú hypotézu nezamietame. Heteroskedasticita sa v žiadnom z našich modelov teda nevyskytuje.

8.5 Porovnanie modelov s produkciou elektrárne Vinica

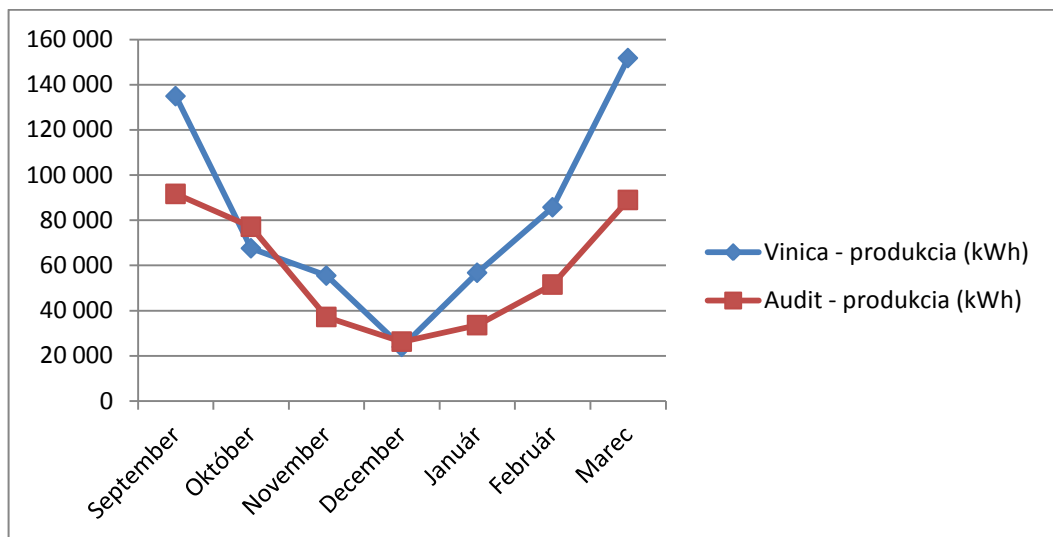
Na odhadnuté údaje produkcie elektrickej energie z modelov aplikujeme štátom garantovanú výkupnú cenu elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov. Následne tieto údaje budeme porovnávať s reálnymi údajmi zo skutočnej výroby elektriny v elektrárni Vinica s inštalovaným výkonom 990 kW nachádzajúcej sa na juhu Slovenska.

Podľa výnosu ÚRSO z júla 2009 je pre rok 2010 výkupná cena elektriny zo solárnych zariadení s celkovým inštalovaným výkonom nad 100 kW pevná cena 425,12 €/MWh. Výkupné ceny elektriny platia v rokoch nasledujúcich po roku uvedenia zariadenia do prevádzky po dobu 15 rokov. A keďže naše odhadnuté údaje priemernej mesačnej výroby elektriny budeme porovnávať s údajmi z elektrárne Vinica, ktorá bola uvedená do prevádzky v roku 2010, za garantovanú výkupnú cenu zoberieme 425,12 €/1000 kWh.

Najskôr porovnáme v tabuľke 8.1 skutočnú výrobu elektriny z elektrárne Vinica s auditom. Audit predstavuje očakávanú produkciu elektrickej energie podľa dosiahnutých historických údajov. Ak si všimneme súhrnný príjem za celé obdobie dvanástich mesiacov, zistíme, že reálne dosiahnutá produkcia elektriny aj príjem sú neporovnateľne nižšie ako audit. Má to svoj dôvod. Solárna elektráreň Vinica nefungovala v mesiacoch máj až august 2011 každý deň. Naplno sa zaradila do prevádzky až 31. augusta, a preto údaje, ktoré budeme brať ďalej do úvahy, pozostávajú z intervalu - september 2011 až marec 2012. Apríl 2012 taktiež nie je v porovnávaniach zahrnutý z dôvodu zozbierania údajov 3.4.2012.

Mesiac	Vinica - produkcia (kWh)	Audit - produkcia (kWh)	Vinica - príjem	Audit - príjem
Máj	99 312	127 320	42 220 €	54 126 €
Jún	112 791	117 703	47 950 €	50 038 €
Júl	78 129	129 479	33 214 €	55 044 €
August	554	117 189	236 €	49 819 €
September	134 888	91 635	57 344 €	38 956 €
Október	67 584	77 108	28 731 €	32 780 €
November	55 485	37 190	23 588 €	15 810 €
December	23 946	26 277	10 180 €	11 171 €
Január	56 750	33 576	24 126 €	14 274 €
Február	85 720	51 531	36 441 €	21 907 €
Marec	151 742	88 959	64 509 €	37 818 €
Apríl	15 363	103 952	6 531 €	44 192 €
Spolu	882 264	1 001 919	375 068 €	425 936 €

Tabuľka 8.1: Vinica a audit – porovnanie produkcie elektrickej energie a príjmov



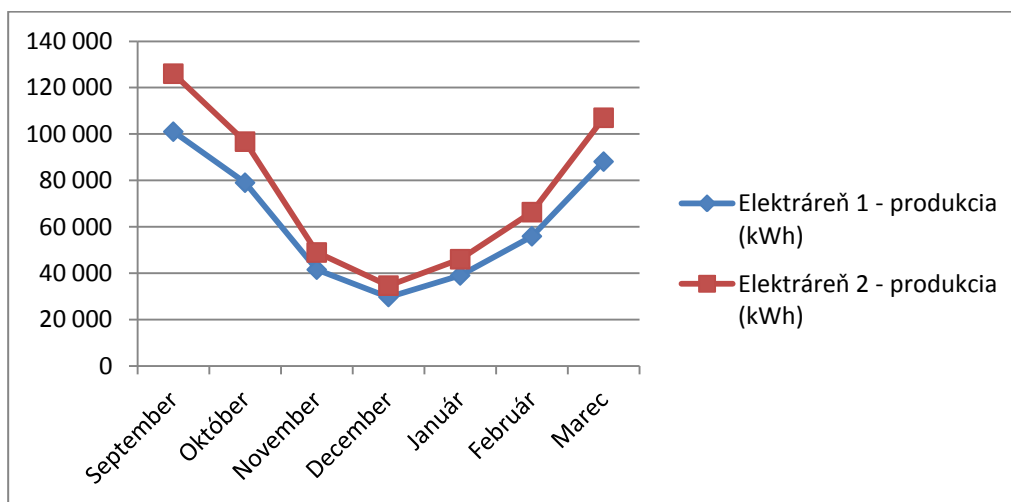
Graf 8.1: Vinica a audit – porovnanie produkcie elektrickej energie

Graf 8.1 zobrazuje simultánne audit aj reálnu produkciu od septembra po marec. Na rozdiel od očakávania založeného na historických údajoch (91 635 kWh) bolo v septembri nameraných až 134 888 kWh. V októbri výška produkcie elektriny klesla tesne pod predpovedané hodnoty a od novembra až do marca nasledujúceho roku sa s výnimkou decembra držala nad očakávanými hodnotami. V marci dokonca výroba elektrickej energie prudko vyskočila hore a prekonal predpoveď o 62 783 kWh.

Ďalej medzi sebou porovnáme priemerné mesačné hodnoty produkcie elektriny z našich dvoch modelov pre elektrárň 1 s pevným sklonom panelov a elektrárň 2 s panelmi so systémom dvoj-osého natáčania. V tabuľke 8.2 môžeme vidieť odhadnutú produkciu elektriny a z toho vyplývajúci príjem obidvoch elektrární za jednotlivé mesiace od mája 2011 do apríla 2012. Ako sme predpokladali, elektrárň s pevným sklonom panelov dosahuje menšie hodnoty vyprodukovanej elektriny, a tým aj menší príjem v každom mesiaci. Rozdiel súhrnných príjmov za dvanásť mesiacov predstavuje až 118 736 €. Aby sme však zabezpečili adekvátne porovnanie s reálnymi údajmi, tabuľku odhadnutej vyprodukovanej energie a príjmov rovnako skrátime a ďalšie operácie budeme robiť s časovým rozmedzím od septembra 2011 do marca 2012.

Mesiac	Elektrárň 1 - produkcia (kWh)	Elektrárň 2 - produkcia (kWh)	Elektrárň 1 - príjem	Elektrárň 2 - príjem
Máj	122 000	161 000	51 865 €	68 444 €
Jún	121 000	161 000	51 440 €	68 444 €
Júl	132 000	179 000	56 116 €	76 096 €
August	119 000	152 000	50 589 €	64 618 €
September	101 000	126 000	42 937 €	53 565 €
Október	79 000	96 700	33 584 €	41 109 €
November	41 500	48 900	17 642 €	20 788 €
December	29 700	34 600	12 626 €	14 709 €
Január	39 000	46 000	16 580 €	19 556 €
Február	55 900	66 300	23 764 €	28 185 €
Marec	88 100	107 000	37 453 €	45 488 €
Apríl	107 000	136 000	45 488 €	57 816 €
Spolu	1 035 200	1 314 500	440 084 €	558 820 €

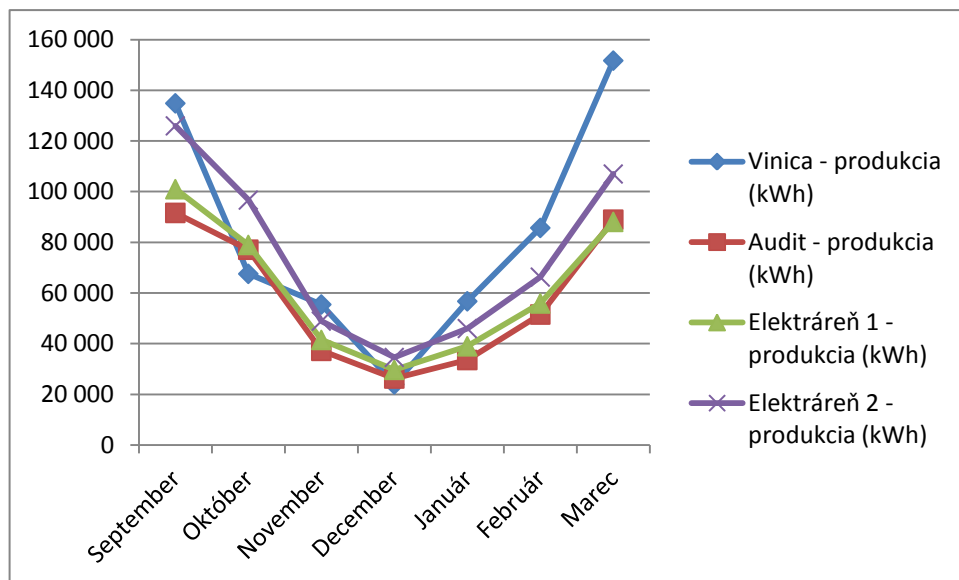
Tabuľka 8.2: Elektrárň 1 a elektrárň 2 – porovnanie produkcie elektriny a príjmov



Graf 8.2: Elektrárň 1 a elektrárň 2 – porovnanie produkcie elektrickej energie

Ako môžeme vidieť na grafe 8.2, elektrárneň 2 so systémom dvoj-osého natáčania fotovoltaických panelov vyprodukuje každý mesiac v priemere viac elektrickej energie ako elektrárneň s pevným sklonom panelov. Najviac sa výroba v týchto dvoch zariadeniach k sebe približuje v mesiaci december. Posledný mesiac roku sa vyznačuje najmenším slnečným žiarením, čiže pomer difúzneho ku globálnemu žiareniu je najvyšší, počet chladných dní je najvyšší a rýchlosť vetra dosahuje nízke hodnoty. V našich dvoch odvodených modeloch vplyvajú práve tieto tri činitele na množstvo vyprodukovanej elektriny.

Na záver vykreslíme graf, v ktorom sa nachádzajú hodnoty vyprodukovanej elektriny pre všetky štyri prípady: elektrárneň Vinica, očakávaná produkcia pre Vinicu na základe historických údajov i naše odhadnuté údaje produkcie, pomocou ktorých boli odvodené modely:



Graf 8.3: Vinica, audit, elektrárneň 1 a elektrárneň 2 – porovnanie produkcie elektriny

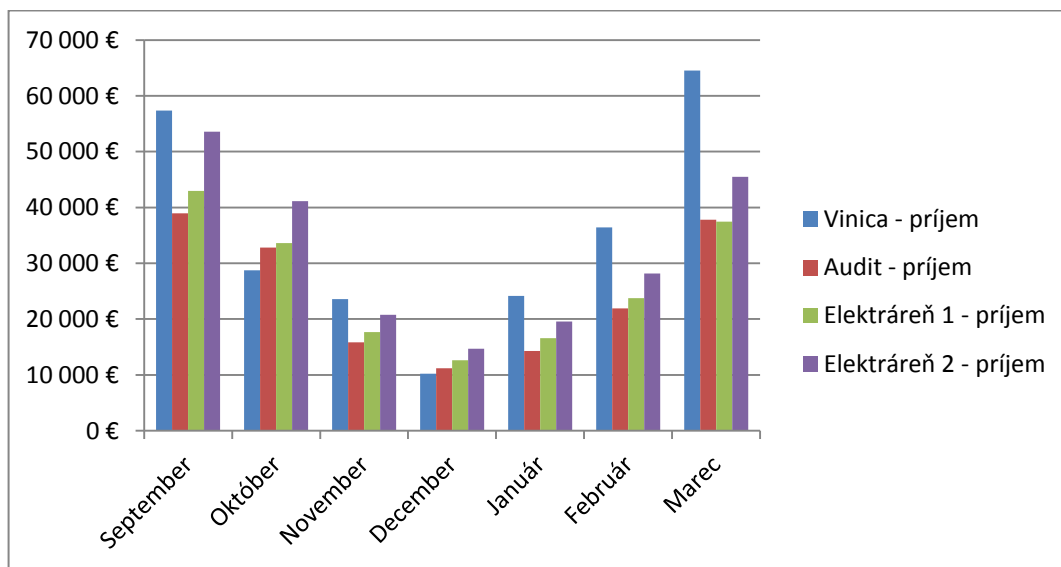
Zaujímavé sú veľmi blízke hodnoty auditu a modelu s pevným sklonom panelov. Nie je to však až tak neočakávané. Audit predstavuje očakávané údaje podľa historicky dosiahnutých produkcií a model s pevným sklonom fotovoltaických panelov odhaduje priemernú mesačnú výrobu elektriny na základe historických údajov slnečného žiarenia na danom mieste a účinnosti premeny tohto žiarenia fotovoltaickými panelmi. Elektrárneň so systémom dvoj-osého natáčania panelov si udržuje hodnoty priemerných mesačných produkcií nad úrovňou týchto dvoch modelov. Skutočná výroba v elektrárni Vinica sa

v októbri a decembri držala mierne pod očakávanými a odhadnutými údajmi, no v septembri, novembri a počnúc januárom až do marca dosiahla veľmi vysoké hodnoty a môžeme predpokladať, že si udrží tento trend minimálne do leta roku 2012.

Dôležitým ukazovateľom výkonnosti solárnej elektrárne je jej príjem za jednotlivé mesiace. Preto aplikujeme štátom garantovanú výkupnú cenu 425,12 €/MWh na produkciu elektriny za mesiace september 2011 až marec 2012 pre všetky štyri prípady a vzájomne ich prostredníctvom tabuľky 8.3 a grafu 8.4 porovnáme. Vidíme, že skutočný príjem z elektrárne Vinica je najväčší a činí 244 919 €, čo prekonáva audit o 72 203 € a odhadovanú produkciu pre elektrárne s dvoj-osím natáčacím systémom panelov o 21 519 €. To pre nás znamená veľmi priaznivé výsledky.

Mesiac	Vinica - príjem	Audit - príjem	Elektrárneň 1 - príjem	Elektrárneň 2 - príjem
September	57 344 €	38 956 €	42 937 €	53 565 €
Október	28 731 €	32 780 €	33 584 €	41 109 €
November	23 588 €	15 810 €	17 642 €	20 788 €
December	10 180 €	11 171 €	12 626 €	14 709 €
Január	24 126 €	14 274 €	16 580 €	19 556 €
Február	36 441 €	21 907 €	23 764 €	28 185 €
Marec	64 509 €	37 818 €	37 453 €	45 488 €
Spolu	244 919 €	172 716 €	184 586 €	223 400 €

Tabuľka 8.3: Vinica, audit, elektrárneň 1 a elektrárneň 2 – porovnanie príjmov



Graf 8.4: Vinica, audit, elektrárneň 1 a elektrárneň 2 – porovnanie príjmov

9 VPLYV ZMENY CIEN ELEKTRICKEJ ENERGIE ZO SLNEČNÝCH ELEKTRÁRNÍ NA KONCOVÚ CENU ELEKTRINY PRE DOMÁCNOSTI

Je faktom, že elektrina zo všetkých obnoviteľných zdrojov je neporovnateľne drahšia ako trhová cena elektrickej energie. Zákon č. 309/2009 Z. z. stanovuje, že zariadenia produkujúce elektrinu z obnoviteľných zdrojov majú zabezpečený odber elektriny do distribučnej sústavy za určitú garantovanú cenu. To v jednoduchosti znamená, že štát odkupuje elektrinu zo solárnych elektrární (aj z ostatných obnoviteľných zdrojov) za niekoľkonásobne vyššie ceny, za aké domácnosti kupujú elektrinu. Navyše sa Slovensko zaviazalo Európskej únii, že do roku 2020 budú obnoviteľné zdroje tvoriť 14% podiel na spotrebe energií. S týmto neustále sa zvyšujúcim podielom a s vysokými výkupnými cenami je zrejmé, že budú rásť aj koncové ceny elektriny, a teda domácnosti budú platiť viac.

V predchádzajúcej kapitole sme odvodili model pre slnečnú elektráreň s pevným sklonom fotovoltaických panelov a model pre elektráreň so systémom dvoj-osého natáčania panelov. Zistili sme, že v oboch modeloch sú zastúpené tie isté tri parametre ovplyvňujúce vyprodukovanú energiu:

- *pomer difúzneho ku globálnemu žiareniu*
- *počet chladných dní v mesiaci*
- *priemerná mesačná rýchlosť vetra*

Obidva modely závisia od rovnakých troch premenných a boli odvodené pomocou údajov pochádzajúcich z totožných zdrojov. Zistili sme, že elektráreň so systémom dvoj-osého natáčania za 12 mesiacov vyprodukuje takmer o 280 000 kWh elektriny viac, čo činí príjem približne 119 000 €. To nám dáva informáciu, že týmto spôsobom je možné podstatne zefektívniť výrobu. Okrem toho nám samotné modely hovoria, že zo zvyšovaním podielu difúzneho žiarenia sa znižuje produkcia. To znamená, že by bolo výhodné čo najviac využiť priame slnečné žiarenie. Najlepšou možnosťou je kombinácia dvojosého natáčacieho systému a použitie koncentrátora. Toto prídavné zariadenie koncentruje slnečné žiarenie na malú plochu a pomáha niekoľkonásobne zvýšiť účinnosť fotovoltaických článkov. Ako nevýhoda sa uvádza vysoké zahrievanie panelov, ktoré treba

ochladzovať vodou. Avšak túto tzv. nevýhodu dokážeme využiť vo svoj prospech. Vieme, že o nepatrnú čiastku zvyšuje produkciu aj vietor, ktorý ochladzuje panely, znižuje tým elektrický odpor a zvyšuje vodivosť. Takže chladiaca voda použitá pri koncentrátoroch sa javí ako vhodný substitút za vietor. Navyše môžeme využiť ohriatu úžitkovú vodu ako pozitívnu externalitu (vykurovanie domov, vyhrievanie bazénov) a ušetriť ďalšie náklady.

Spomínanými úpravami by sme navýšili produkciu v slnečnej elektrárni, a teda návratnosť investícií by sa pochopiteľne zmenšila. Existuje však aj iná alternatíva. Návratnosť investícií by zostala rovnaká, ak by sa štátom garantované výkupné ceny elektrickej energie zo slnečných elektrární zmenšili v správnej miere. A zníženie garantovaných výkupných cien znamená v konečnom dôsledku zníženie trhovej ceny elektrickej energie pre domácnosti. Predovšetkým by však bola potrebná úprava zákona. Ten momentálne garantuje, že výkupné ceny elektriny platia v rokoch nasledujúcich po roku uvedenia zariadenia do prevádzky po dobu 15 rokov. To znamená, že ak založíme elektrárňu s celkovým inštalovaným výkonom vyšším ako 100 kW a uvedieme ju do prevádzky na konci roku 2011, garantovanú výkupnú cenu elektrickej energie 382,61 €/MWh budeme môcť využívať až do konca roku 2026. Až po vhodnej úprave súčasného zákona a inováciách na solárnych zariadeniach, môžeme počítať s tým, že sa koncová cena elektriny pre domácnosti nebude rapídne zvyšovať.

ZÁVER

Diplomová práca pozostáva z deviatich kapitol a má tri základné ciele. Jednému z nich sme sa venovali v prvých šiestich kapitolách diplomovej práce, ktoré predstavujú teoretickú časť. Opísali sme štátom garantované výkupné ceny elektriny z obnoviteľných zdrojov i štátnu podporu pre bežných ľudí využívajúcich slnečné kolektory. Uviedli sme náklady spojené s vybudovaním a udržiavaním prevádzky slnečnej elektrárne. Okrem toho sme si ozrejmili výrobu elektriny premenou slnečnej energie na elektrickú prostredníctvom fotovoltaických článkov. Keď sme poznali tento základný princíp transformácie energie, mohli sme si ukázať, z akých komponentov pozostávajú jednotlivé typy solárnych zariadení a vysvetliť si princíp fungovania týchto mikro-modelov elektrární.

Hlavným cieľom práce bolo zostrojiť model popisujúci produkciu elektrickej energie z fotovoltaických článkov a uvážiť, či má zmysel optimalizovať produkciu v našich podmienkach pomocou optimálneho naklonenia panelov. Aby sme odpovedali na otázku o zmysle optimalizácie produkcie pomocou naklonenia panelov, v praktickej časti sme navrhli dva modely pre dve rôzne slnečné elektrárne. Jedna pozostávala z fotovoltaických panelov s pevným sklonom 35° a azimutom -1° , zatiaľ čo druhá obsahovala dvoj-osí natáčací systém panelov. Po odvodení a otestovaní oboch modelov v softvéri EViews 5.0 sme ich medzi sebou vzájomne porovnali a skutočne sme potvrdili naše očakávanie, že systém s natáčaním panelov je omnoho účinnejší. Panely sa neustále otáčajú za slnkom a slnečné žiarenie na ne celý deň dopadá kolmo. Zistili sme, že na rozdiel od prvého typu elektrární nám to zabezpečí ročné navýšenie produkcie takmer o 27%. A vyššia produkcia pochopiteľne znamená nižšie náklady pre spotrebiteľa.

Ďalším cieľom bolo zamyslieť sa, ako vplýva zmena cien vykupovanej elektrickej energie zo slnečných elektrární na celkovú cenu energie pre domácnosti. V poslednej kapitole sme na základe vypracovaných výsledkov nad týmto problémom uvažovali a navrhli sme riešenie zníženia koncových cien elektriny pre domácnosti, ktoré zahŕňalo určitú inováciu slnečných elektrární a zmenu súčasného zákona.

V prípade, že sa budú stavať fotovoltaické elektrárne so systémom dvoj-osého natáčania panelov a s koncentrátormi na veterných miestach, tak cena elektriny z týchto zariadení môže poklesnúť až o 30%. Napriek takémuto rapidnému poklesu výkupných cien si tieto zariadenia zachovávajú rovnakú návratnosť investícií, akú by mali elektrárne s pevným sklonom panelov bez koncentrátorov na miestach s horšími veternými podmienkami a s pôvodnými výkupnými cenami. Zníženie výkupných cien by v konečnom dôsledku znamenalo zníženie celkovej ceny elektrickej energie pre domácnosti.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

Knihy:

1. Beranovský, J., Murtinger, K., Tomeš, M.: Foltovoltaika – Elektřina ze slunce. ERA Group, 2007. 82 s. ISBN: 8073661004.
2. Dinardo, J., Johnston, J.: Econometric Methods. McGraw-Hill/Irwin, 1996. 531 s. ISBN: 0079131212.
3. Gujarati, D. N.: Basic Econometrics. McGraw-Hill, 2002. 1002 s. ISBN: 0071123431.
4. Studenmund, A. H.: Using Econometrics – A Practical Guide. Addison Wesley, 2005. 656 s. ISBN: 0321316495.
5. Šálek, M.: Sluneční domy. Děti Země, 1993. 36 s. ISBN: 8090135536.
6. Themessl, A., Weiss, W.: Solární systémy – Návrhy a stavba svépomoci. Grada, 2005. 120 s. ISBN: 8024705893.

Zákony:

7. Zákon č. 276/2001 Z. z.: o regulácii v sieťových odvetviach a o zmene a doplnení niektorých zákonov. 14. jún 2001.
8. Zákon č. 309/2009 Z. z.: o podpore obnoviteľných zdrojov energie a vysoko účinnej kombinovanej výroby a o zmene a doplnení niektorých zákonov. 19. jún 2009.
9. Zákon č. 558/2010 Z. z.: ktorým sa mení a dopĺňa zákon č. 309/2009 Z. z. a ktorým sa dopĺňa zákon č. 276/2001 Z. z. 15. december 2010.

Články:

10. Centrum energetických alternatív, o. z. Za matku Zem: Obnoviteľné zdroje energie a zákon o podpore ich využívania. 12 s. Dostupné na internete: <http://www.zmz.sk/doc/Materialy/Letaky/ZMZ_letak_OZE_screen_2.pdf>
11. Nyman, P.: Environmental Taxes – The Case of Sweden. 1998. 8 s. Dostupné na internete: <http://hdr.undp.org/en/reports/global/hdr1998/papers/NYMAN-Pia_Taxes-Sweden.pdf>

12. Siebertová Z.: Geometria lineárnej regresie. 2011. 11 s. Dostupné na internete: <<http://www.iam.fmph.uniba.sk/institute/siebertova/ekonometria/lecture2.pdf>>
13. Swanson, R. M.: The Promise of Concentrators. 2000. 19 s. Dostupné na internete: <<http://energycrisis.info/apollo2/concentrators/promise.pdf>>

Internetové zdroje:

14. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>
15. <http://www.alternativy.sk/>
16. <http://www.ekologika.sk/institucie.html>
17. <http://www.energoforum.sk/sk/r/449/vynos-urso-stanovil-maximalnu-cenu-solarnej-elektřiny-na-387-65-eura-mwh>
18. <http://www.euractiv.sk/danova-politika/clanok/vyber-environmentalnych-dani-v-eu-je-najnizsi-za-poslednych-10-rokov>
19. <http://www.euroekonom.sk/ekonomia/ekonomika-zivotneho-prostredia/nastroje-ekologickej-politiky/>
20. <http://www.fvsolarnipanely.cz/vynosy.php>
21. <http://www.iness.sk/stranka/363-Ekologicke-dane.html>
22. <http://www.oze.sk/index.htm>
23. <http://www.posterus.sk/?p=12008>
24. <http://www.revolt-solar.com/fotovoltaika.php>
25. <http://www.seps.sk/zp/fond/obnov/10.htm>
26. <http://www.sharp.eu/cps/rde/xchg/eu/hs.xsl/-/html/technikprinzip.htm>
27. <http://www.siea.sk/granty-a-dotacie-slnečne-kolektory-a-kotly-pre-domacnosti/>
28. <http://www.siea.sk/strukturalne-fondy/>
29. <http://www.solarna-energia.sk/vyuzitie-solarnej-energie>
30. <http://www.solazone.com.au/tracker.htm>

PRÍLOHA

Údaje, pomocou ktorých bol odhadnutý model pre elektráreň s pevným sklonom panelov:

<i>Mesiac</i>	<i>Em</i>	<i>Hm</i>	<i>TL</i>	<i>D/G</i>	<i>TD</i>	<i>T24h</i>	<i>NDD</i>	<i>W</i>	<i>C</i>	<i>R</i>	<i>O</i>
<i>Máj</i>	122000	162.0	4.4	0.52	17.9	16.0	38	3.9	4.9	57	355
<i>Jún</i>	121000	163.0	4.9	0.51	20.8	19.1	9	3.0	5.4	70	328
<i>Júl</i>	132000	179.0	4.9	0.47	22.5	21.1	1	4.0	5.8	97	316
<i>August</i>	119000	160.0	5.0	0.50	22.2	20.5	20	3.4	4.5	65	290
<i>September</i>	101000	131.0	4.8	0.49	17.7	16.0	107	3.2	6.3	48	291
<i>Október</i>	79000	98.8	4.4	0.53	12.6	11.1	313	3.2	6.0	20	275
<i>November</i>	41500	49.9	3.7	0.66	6.1	5.2	479	3.5	7.5	38	287
<i>December</i>	29700	34.5	3.7	0.73	-0.1	-0.9	644	5.0	7.9	59	308
<i>Január</i>	39000	45.2	3.7	0.68	-0.9	-1.6	565	4.9	7.9	41	323
<i>Február</i>	55900	66.2	4.1	0.61	1.7	0.6	459	4.1	5.4	37	324
<i>Marec</i>	88100	109.0	3.9	0.57	6.3	4.9	338	5.2	6.4	54	375
<i>Apríl</i>	107000	139.0	4.3	0.52	12.8	11.2	117	5.1	5.4	54	362

Údaje, pomocou ktorých bol odhadnutý model pre elektráreň s panelmi so systémom dvoj-
osého natáčania:

<i>Mesiac</i>	<i>Em</i>	<i>Hm</i>	<i>TL</i>	<i>D/G</i>	<i>TD</i>	<i>T24h</i>	<i>NDD</i>	<i>W</i>	<i>C</i>	<i>R</i>	<i>O</i>
<i>Máj</i>	161000	212.0	4.4	0.52	17.9	16.0	38	3.9	4.9	57	355
<i>Jún</i>	161000	215.0	4.9	0.51	20.8	19.1	9	3.0	5.4	70	328
<i>Júl</i>	179000	239.0	4.9	0.47	22.5	21.1	1	4.0	5.8	97	316
<i>August</i>	152000	203.0	5.0	0.50	22.2	20.5	20	3.4	4.5	65	290
<i>September</i>	126000	163.0	4.8	0.49	17.7	16.0	107	3.2	6.3	48	291
<i>Október</i>	96700	121.0	4.4	0.53	12.6	11.1	313	3.2	6.0	20	275
<i>November</i>	48900	58.9	3.7	0.66	6.1	5.2	479	3.5	7.5	38	287
<i>December</i>	34600	40.1	3.7	0.73	-0.1	-0.9	644	5.0	7.9	59	308
<i>Január</i>	46000	53.4	3.7	0.68	-0.9	-1.6	565	4.9	7.9	41	323
<i>Február</i>	66300	78.6	4.1	0.61	1.7	0.6	459	4.1	5.4	37	324
<i>Marec</i>	107000	131.0	3.9	0.57	6.3	4.9	338	5.2	6.4	54	375
<i>Apríl</i>	136000	174.0	4.3	0.52	12.8	11.2	117	5.1	5.4	54	362

Matica korelácií modelu pre elektrárň s pevným sklonom panelov:

	<i>LOG_EM</i>	<i>LOG_HM</i>	<i>LOG_TL</i>	<i>LOG_D_G</i>	<i>TD</i>	<i>T24H</i>	<i>NDD</i>	<i>C</i>	<i>W</i>	<i>R</i>	<i>O</i>
<i>LOG_EM</i>	1.000000	0.999476	0.868140	-0.969944	0.903837	0.896248	-0.969218	-0.843267	-0.378827	0.483189	0.249882
<i>LOG_HM</i>	0.999476	1.000000	0.876250	-0.970587	0.916073	0.908969	-0.975932	-0.840557	-0.391224	0.498079	0.234916
<i>LOG_TL</i>	0.868140	0.876250	1.000000	-0.919759	0.935804	0.934857	-0.911975	-0.774987	-0.630534	0.496783	-0.163982
<i>LOG_D_G</i>	-0.969944	-0.970587	-0.919759	1.000000	-0.922792	-0.917501	0.951380	0.793703	0.484526	-0.426577	-0.053885
<i>TD</i>	0.903837	0.916073	0.935804	-0.922792	1.000000	0.999695	-0.964015	-0.730994	-0.610723	0.555507	-0.093179
<i>T24H</i>	0.896248	0.908969	0.934857	-0.917501	0.999695	1.000000	-0.959738	-0.720255	-0.613746	0.564804	-0.105837
<i>NDD</i>	-0.969218	-0.975932	-0.911975	0.951380	-0.964015	-0.959738	1.000000	0.811981	0.471064	-0.558142	-0.136920
<i>C</i>	-0.843267	-0.840557	-0.774987	0.793703	-0.730994	-0.720255	0.811981	1.000000	0.385731	-0.279835	-0.196017
<i>W</i>	-0.378827	-0.391224	-0.630534	0.484526	-0.610723	-0.613746	0.471064	0.385731	1.000000	0.051659	0.649913
<i>R</i>	0.483189	0.498079	0.496783	-0.426577	0.555507	0.564804	-0.558142	-0.279835	0.051659	1.000000	0.263513
<i>O</i>	0.249882	0.234916	-0.163982	-0.053885	-0.093179	-0.105837	-0.136920	-0.196017	0.649913	0.263513	1.000000

Matica korelácií modelu pre elektrárň s panelmi so systémom dvoj-osého natáčania:

	<i>LOG_EM</i>	<i>LOG_HM</i>	<i>LOG_TL</i>	<i>LOG_D_G</i>	<i>TD</i>	<i>T24H</i>	<i>NDD</i>	<i>C</i>	<i>W</i>	<i>R</i>	<i>O</i>
<i>LOG_EM</i>	1.000000	0.999605	0.872605	-0.968214	0.911960	0.904941	-0.974683	-0.838252	-0.381475	0.507450	0.248802
<i>LOG_HM</i>	0.999605	1.000000	0.880691	-0.969142	0.922755	0.916118	-0.979957	-0.836730	-0.397718	0.514766	0.230577
<i>LOG_TL</i>	0.872605	0.880691	1.000000	-0.919759	0.935804	0.934857	-0.911975	-0.774987	-0.630534	0.496783	-0.163982
<i>LOG_D_G</i>	-0.968214	-0.969142	-0.919759	1.000000	-0.922792	-0.917501	0.951380	0.793703	0.484526	-0.426577	-0.053885
<i>TD</i>	0.911960	0.922755	0.935804	-0.922792	1.000000	0.999695	-0.964015	-0.730994	-0.610723	0.555507	-0.093179
<i>T24H</i>	0.904941	0.916118	0.934857	-0.917501	0.999695	1.000000	-0.959738	-0.720255	-0.613746	0.564804	-0.105837
<i>NDD</i>	-0.974683	-0.979957	-0.911975	0.951380	-0.964015	-0.959738	1.000000	0.811981	0.471064	-0.558142	-0.136920
<i>C</i>	-0.838252	-0.836730	-0.774987	0.793703	-0.730994	-0.720255	0.811981	1.000000	0.385731	-0.279835	-0.196017
<i>W</i>	-0.381475	-0.397718	-0.630534	0.484526	-0.610723	-0.613746	0.471064	0.385731	1.000000	0.051659	0.649913
<i>R</i>	0.507450	0.514766	0.496783	-0.426577	0.555507	0.564804	-0.558142	-0.279835	0.051659	1.000000	0.263513
<i>O</i>	0.248802	0.230577	-0.163982	-0.053885	-0.093179	-0.105837	-0.136920	-0.196017	0.649913	0.263513	1.000000