

Univerzita Hradec Králové  
Přírodovědecká fakulta  
Katedra fyziky

Obnovitelné zdroje energie v úlohách

Bakalářská práce

Autor: Adam Klásek  
Studijní program: B0114A110004  
Studijní obor: Fyzika se zaměřením na vzdělávání,  
Matematika se zaměřením na vzdělávání  
Vedoucí práce: doc. RNDr. Jan Šlégr, Ph.D.

Hradec Králové

květen 2023

## Zadání bakalářské práce

**Autor:** Adam Klásek

**Studium:** S20FY008BP

**Studijní program:** B0114A110004 Fyzika se zaměřením na vzdělávání

**Studijní obor:** Matematika se zaměřením na vzdělávání, Fyzika se zaměřením na vzdělávání

**Název bakalářské práce:** **Obnovitelné zdroje energie v úlohách**

**Název bakalářské práce AJ:** Renewable energy sources in school exercises

### **Cíl, metody, literatura, předpoklady:**

Kusala, J. (2005). Hrátky s obnovitelnými zdroji. ČEZ. Quaschnig, V. (2010). Obnovitelné zdroje energií. Grada Publishing as.

### **Anotace:**

Bakalářská práce zpracovává aktuální téma obnovitelných zdrojů a různých (ideálně čistých) způsobů získávání elektrické energie. Na teoretickou část, která popisuje základní vlastnosti obnovitelných zdrojů, navazuje sada úloh s touto tematikou, ke kterým je provedena diskuse řešení a možných úprav. Součástí práce je kromě výpočetních úloh i návrh laboratorních experimentálních úloh.

**Zadávací pracoviště:** Katedra fyziky,  
Přírodovědecká fakulta

**Vedoucí práce:** doc. RNDr. Jan Šlégr, Ph.D.

**Oponent:** RNDr. Filip Studnička, Ph.D.

**Datum zadání závěrečné práce:** 11.8.2021



Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedl všechny prameny, ze kterých jsem vycházel.

V Hradci Králové dne 5. 5. 2023

Adam Klásek

Poděkování:

Děkuji panu doc. RNDr. Janu Šlégrovi, Ph.D. za cenné rady, ochotu a čas, který mi věnoval v průběhu vedení práce. Děkuji také panu Ing. Jiřímu Čápovi za poskytnutí podkladů k malé vodní elektrárně Albrechtice.

## **Anotace**

KLÁSEK, Adam *Obnovitelné zdroje energie v úlohách*. Hradec Králové, 2023. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí bakalářské práce Jan Šlégr. 118 s.

Bakalářská práce zpracovává aktuální téma obnovitelných zdrojů a různých (ideálně čistých) způsobů získávání elektrické energie. Na teoretickou část, která popisuje základní vlastnosti obnovitelných zdrojů, navazuje sada úloh s touto tematikou, ke kterým je provedena diskuse řešení a možných úprav. Součástí práce je kromě výpočetních úloh i návrh laboratorních experimentálních úloh.

## **Klíčová slova**

obnovitelné zdroje, větrná energie, energie bioplynu, vodní energie, sluneční energie

## **Annotation**

KLÁSEK, Adam *Renewable energy sources in school exercises*. Hradec Králové, 2023. Bachelor Thesis at Faculty of Science University of Hradec Králové. Thesis Supervisor Jan Šlégr. 118 p.

The bachelor's thesis deals with the current topic of renewable sources and different (ideally clean) ways of obtaining electrical energy. The theoretical part, which describes the basic properties of renewable sources, is followed by a set of school exercises with this theme, for which solutions and possible modifications are discussed. In addition to computational exercises, the thesis also includes the design of laboratory experimental tasks.

## **Keywords**

renewable sources, wind energy, biogas energy, water energy, solar energy

# Obsah

<b>1</b>	<b>Obnovitelné zdroje</b>	<b>10</b>
1.1	Co jsou obnovitelné zdroje a proč je využíváme? . . . . .	10
1.2	Rozdíl mezi obnovitelnými a neobnovitelnými zdroji . . . . .	10
1.3	Výhody obnovitelných zdrojů . . . . .	11
1.4	Nevýhody obnovitelných zdrojů . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Větrné elektrárny</b>	<b>12</b>
2.1	Princip fungování . . . . .	12
2.2	Stavba větrné elektrárny . . . . .	13
2.3	Druhy větrných elektráren . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Bioplynové stanice</b>	<b>20</b>
3.1	Princip fungování bioplynové stanice . . . . .	20
3.2	Stavba bioplynové stanice . . . . .	21
3.3	Kogenerace . . . . .	23
3.4	Bioplynové stanice v České republice . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Vodní elektrárny</b>	<b>25</b>
4.1	Princip fungování . . . . .	26
4.1.1	Teoretický výkon turbíny . . . . .	26
4.1.2	Vyrobená elektrická energie . . . . .	26
4.2	Místa výstavby . . . . .	28
4.3	Části vodní elektrárny . . . . .	29
4.3.1	Vtokový objekt . . . . .	30
4.3.2	Přivádeč a odpad . . . . .	30
4.3.3	Výrobní objekty . . . . .	31
4.3.4	Hráz . . . . .	32
4.4	Turbíny . . . . .	34
4.4.1	Kaplanova turbína . . . . .	35
4.4.2	Francisova turbína . . . . .	36
4.4.3	Peltonova turbína . . . . .	37
4.4.4	Bánkiho turbína . . . . .	38
4.5	Malé vodní elektrárny v ČR . . . . .	38
4.6	Velké vodní elektrárny v ČR . . . . .	39

4.7	Přečerpávací vodní elektrárny v ČR . . . . .	40
4.8	Výhody vodních elektráren . . . . .	42
4.9	Nevýhody vodních elektráren . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Solární elektrárny</b>	<b>43</b>
5.1	Princip fungování . . . . .	43
5.2	Solární článek . . . . .	44
5.3	Solární panel . . . . .	46
5.4	Ukládání energie . . . . .	46
5.4.1	Kondenzátory . . . . .	47
5.4.2	Akumulátory . . . . .	47
5.4.3	Další možnosti ukládání energie . . . . .	48
5.5	Využití fotovoltaiky . . . . .	48
5.6	Výhody solárních elektráren . . . . .	49
5.7	Nevýhody solárních elektráren . . . . .	49
<b>6</b>	<b>Praktická část</b>	<b>50</b>
6.1	Úloha č. 1 - Měření výkonu nezatíženého solárního panelu v závislosti na intenzitě ozáření. . . . .	50
6.2	Úloha č. 2 - Měření výkonu nezatíženého solárního panelu v závislosti na úhlu, pod kterým dopadá záření . . . . .	55
6.3	Úloha č. 3 - Výpočet energie vyrobené vodní elektrárnou v různých částech roku. . . . .	59
6.4	Úloha č. 4 - Výpočet výkonu vodní elektrárny při změně parametrů. . . . .	61
6.5	Úloha č. 5 - Výpočet výkonu větrné elektrárny. . . . .	63
6.6	Řešení úloh . . . . .	66
6.6.1	Řešení úlohy č. 1 . . . . .	66
6.6.2	Řešení úlohy č. 2 . . . . .	70
6.6.3	Řešení úlohy č. 3 . . . . .	77
6.6.4	Řešení úlohy č. 4 . . . . .	80
6.6.5	Řešení úlohy č. 5 . . . . .	83
	<b>Závěr</b>	<b>90</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>93</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>94</b>
	<b>Literatura</b>	<b>95</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>97</b>
	<b>A Parametry využitého solárního panelu</b>	<b>98</b>
	<b>B Vybraná řešení úloh č. 3 až 5</b>	<b>100</b>



# Úvod

Téma obnovitelných zdrojů aktuálně patří mezi velmi diskutované napříč společností. Řada světových velmocí se uchyluje právě k výrobě elektřiny za využití energie nevyčerpatelných zdrojů. Aktuálně dochází k mohutnému rozvoji zejména ve výrobě solární a větrné energie. Obnovitelné zdroje energie mají řadu zastánců, ale i odpůrců, kteří často neznají fyzikální podstatu výroby elektřiny těmito procesy. Jedním z možných důvodů je, že se lidé v rámci studia s těmito tématy setkají pouze okrajově nebo vůbec.

Cílem bakalářské práce je přiblížit žákům středních škol téma obnovitelných zdrojů. Na teoretickou část navazuje soubor úloh určených pro vytvoření představy o výrobě získávání energie. Tyto úlohy jsou navrženy jako laboratorní cvičení v rámci výuky, seminární práce z tématu středoškolské mechaniky nebo jako úlohy do fyzikální olympiády pro nižší ročníky.

Toto téma jsem si vybral, neboť je mi velmi blízké a myslím si, že by mělo dostat větší prostor v rámci středoškolské fyziky. Také jsem nenašel stručně zpracovaný přehled základních typů elektráren využívajících obnovitelných zdrojů. Považuji vhodně zpracovaný text obsahující základní informace o obnovitelných zdrojích energie užitečný nejen do výuky, ale také pro širokou veřejnost, která nemá o fyzikální podstatě těchto procesů představu.

# Kapitola 1

## Obnovitelné zdroje

### 1.1 Co jsou obnovitelné zdroje a proč je využíváme?

Výrobou<sup>1</sup> obnovitelné energie rozumíme proces, při kterém nedochází k uvolňování skleníkových plynů do atmosféry. Obnovitelnými zdroji rozumíme takové nefosilní zdroje, k jejichž obnově dochází v lidském časovém měřítku, narozdíl od zdrojů neobnovitelných (fosilní paliva), k jejichž obnovení dochází v řádu tisíciletí a jejich vyčerpání se očekává v blízké budoucnosti. V dnešní době stále nepředstavují významnou roli z hlediska celkové energetické produkce, ale do budoucna lze počítat s jejich rozvojem v souvislosti s ubýváním fosilních paliv a narůstající celosvětovou spotřebou elektrické energie [1].

Mezi obnovitelné zdroje se v České republice řadí energie slunečního záření, vody, větru, biomasy a bioplynu, energie geotermální, energie prostředí využívaná tepelnými čerpadly a energie kapalných biopaliv [2].

Hlavním důvodem pro výrobu energie z obnovitelných zdrojů je již zmíněná omezenost fosilních paliv a značná produkce skleníkových plynů. Pokud se podaří významně zredukovat emise spojené s těmito procesy, lze zpomalit klimatické změny na naší planetě. Momentálně se také jedná o celosvětový trend, kdy například členské země EU budou muset do roku 2030 vyrábět 32 % spotřebované energie z obnovitelných zdrojů [2].

### 1.2 Rozdíl mezi obnovitelnými a neobnovitelnými zdroji

Největším rozdílem je získávání energie. V případě obnovitelných zdrojů je není možné vyčerpání, neboť se budou neustále obnovovat. Oproti tomu fosilní paliva jako uhlí a zemní plyn a zásoby uranu nejsou neomezené.

Jak již bylo popsáno výše, v procesu výroby energie z fosilních paliv dochází ke

---

<sup>1</sup>Z fyzikálního hlediska se obvyklým termínem výroba rozumí přeměna, případně uvolňování energie.



značné produkci emisí oxidu uhličitého CO<sub>2</sub>, oxidu dusného N<sub>2</sub>O nebo perfluorovaných uhlovodíků. Na druhou stranu v případě zdrojů obnovitelných můžeme říci, že se jedná o téměř čistou výrobu, při které nedochází k téměř žádným emisím [3]. Specifickým případem je energie jaderná. V případě jádra lze prohlásit, že se jedná o výrobu elektřiny s minimálními emisemi. Z toho důvodu je jádro možné zařadit mezi čisté zdroje energie. Nastává tu ovšem problém s uskladněním odpadu, protože využitá palivo je stále radioaktivní.

Dalším rozdílem je možnost výstavby elektráren. Elektrárny produkující emise mohou stát na téměř libovolném místě. Na druhou stranu výroba čisté energie může probíhat jen na konkrétních místech (výjimka jsou fotovoltaické a jaderné elektrárny). Rozdíl je také v efektivitě výroby. Účinnost neekologických procesů je mnohdy vyšší a kolísá minimálně. Ekologické zdroje jsou obvykle méně efektivní a co je nejdůležitější, jejich produkce není stálá. Vždy je ovlivněna aktuálním počasím. Z toho důvodu je třeba vyrovnávat elektrickou síť, což aktuálně brání využívání pouze obnovitelných zdrojů.

### 1.3 Výhody obnovitelných zdrojů

- Hlavní a největší výhodou je nulová nebo minimální produkce emisí a skleníkových plynů. S tím také souvisí nižší provozní náklady, neboť není třeba dovážet palivo a nakupovat emisní povolenky (od roku 2021 jejich ceny extrémně rostou) [3].
- Jednoduchá dostupnost (v závislosti na zeměpisných podmínkách) a s tím související snadný rozvoj v případě nutnosti vyšší výroby.
- Velmi nízké nebezpečí.
- Klesající pořizovací náklady. V budoucnu lze předpokládat, že energie z obnovitelných zdrojů bude levnější než například energie z fosilních paliv [3].

### 1.4 Nevýhody obnovitelných zdrojů

- Menší produkce energie než v případě neobnovitelných zdrojů.
- Značný vliv počasí na produkci a s tím související menší stabilita elektrické sítě.
- Změny klimatu a nepřesnost předpovědi počasí (nelze přesně určit, který typ elektrárny se nejvíce vyplatí) [4].
- Momentálně stále poměrně vysoké pořizovací náklady.
- Elektrárnu není možné postavit na libovolném místě, je třeba hledat vhodné oblasti (řeky pro vodní, hory pro větrné).

# Kapitola 2

## Větrné elektrárny

Pojmem větrná elektrárna se obecně rozumí zařízení, které slouží k přeměně energie větru na energii elektrickou. Větrná energie patří spolu s energií vodní mezi nejdéle využívané zdroje energie. V Evropě byla první moderní větrná turbína postavena ve Francii na počátku 20. století. Od poloviny sedmdesátých let, kdy byl obvyklý výkon 55 kW nebo 75 kW se vývojem technologie dosáhlo výkonu 2 až 3 MW, v extrémních případech až 8 MW [5, 6].

### 2.1 Princip fungování

Princip výroby energie vysvětlíme na příkladu dnes nejvíce využívaného vrtulového rotoru. Tento typ motoru také dle [7] dosahuje nejvyšší účinnosti. Dle [7] získává turbína větrné elektrárny kinetickou energii zpomalením proudění vzduchu. Proudící vzduch má kinetickou energii  $E_k$ :

$$E_k = \frac{1}{2}mu^2 = \frac{1}{2}\rho Vu^2 \quad [\text{J}] \quad (2.1)$$

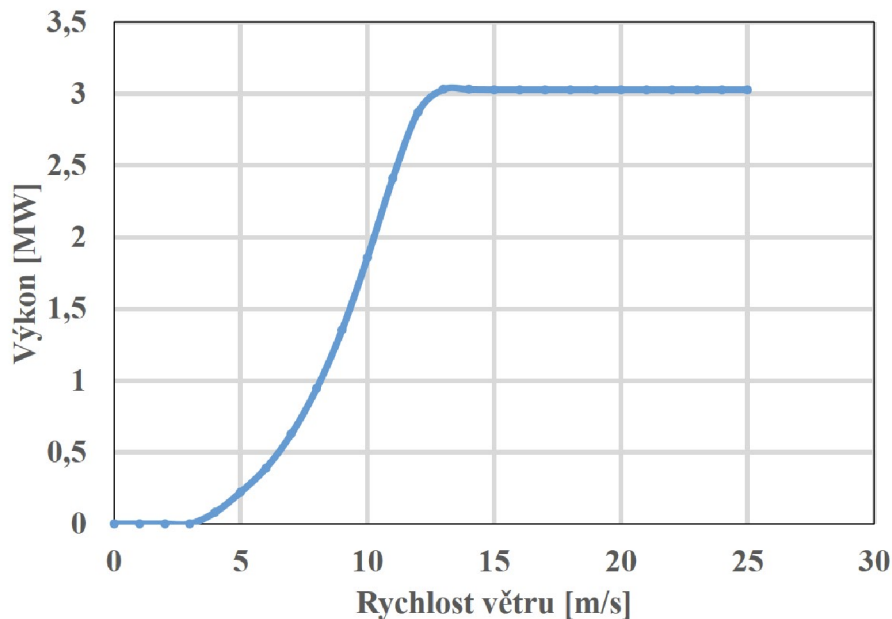
kde  $m$  je hmotnost vzduchu,  $u$  je rychlost proudění,  $\rho$  je hustota vzduchu a  $V$  je objem vzduchu.

Okamžitý výkon elektrárny se následně vypočte vztahem:

$$P = \frac{1}{2}c_p S \rho u^3 \eta \quad [\text{W}] \quad (2.2)$$

kde  $S$  je plocha opisovaná listy rotoru a  $c_p$  je součinitel odporu a  $\eta$  účinnost elektrárny. Teoreticky je maximální možná hodnota  $c_p$  podle tzv. Betzova limitu 0,593, reálně se ovšem tato hodnota pohybuje okolo 0,5. Zjednodušeně lze říci, že pro návrhový pracovní bod vrtule lze uvažovat účinnost až 58 %, ovšem účinnost převodu energie mezi mechanickou a elektrickou není stoprocentní. Pohybuje se okolo 80 %, proto je celková účinnost tohoto typu větrné elektrárny přibližně 40 až 45 % [7].

Na obrázku 2.1 lze vidět závislost výkonu elektrárny na rychlosti větru. Je patrné, že s rychlostí větru se výkon zvyšuje, dokud nedosáhne plného výkonu. Následně se již výkon nezvyšuje. Při rychlostech větru nad  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  se elektrárna z důvodu



Obrázek 2.1: Výkonová křivka elektrárny o výkonu 3 MW [8]

bezpečnosti a ochrany technologie odstaví. Tyto podmínky v našich zeměpisných šířkách nastávají výjimečně.

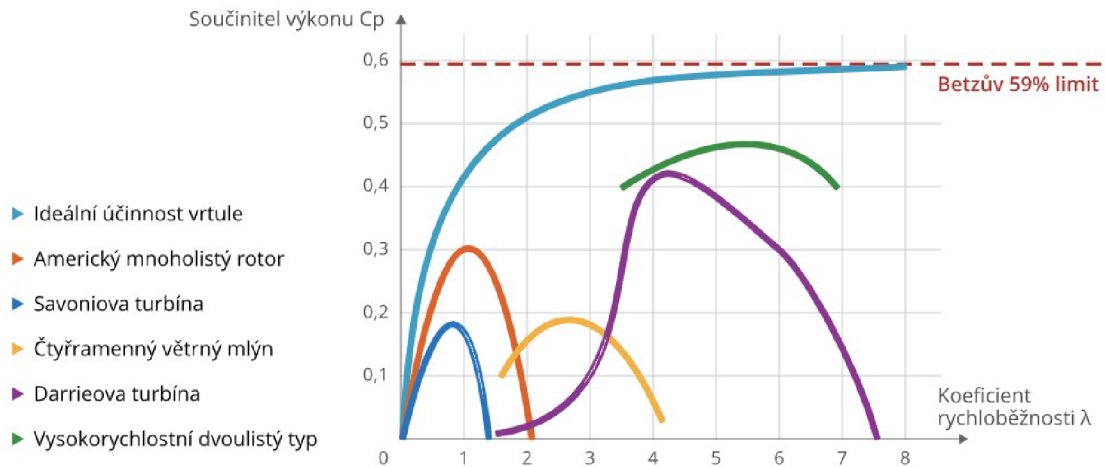
## 2.2 Stavba větrné elektrárny

V současné době je většina (velkých) větrných elektráren konstrukčně velmi podobná. Obvykle se jedná o třílisté „vrtule“ s horizontální osou rotace a rotorem natočeným ve směru proudění. Základními konstrukčními prvky jsou stožár, gondola (obsahující například generátor a převodový systém) a rotor.

- Rotor se skládá z listů, které jsou tvarovány pro maximální využití energie proudění vzduchu. Počet listů není omezen, nicméně časem se ustálilo použití tří listů. Obecně lze říci, že rotory s vyšším počtem listů dokáží efektivněji využít energii proudění. Nevýhodou jedno- a dvoulistých rotorů byla vysoká rychlost rotace a s tím související velká hlučnost a namáhání soustrojí. Zmíněný vrtulový rotor dosahuje dle [5] nejvyšší účinnosti, tj. přibližně 40 až 45 %. Hlavní výhodou tohoto typu rotoru je malý počet listů a s tím související nižší pořizovací cena než v případě mnoholopatkových rotorů. Také namáhání listu způsobené poryvy větru a s tím související namáhání disku rotoru je zanedbatelné v porovnání s odstředivými silami, na které je rotor dimenzován. Nevýhodou je nutnost instalování budící síly (obvykle motor), která vrtuli rozběhne. Teprve potom se rotor přestaví do pracovní polohy. Z toho důvodu se nejčastěji využívají profily s nízkým odporem a vysokou aerodynamickou účinností [5].

Dále se pro větrné elektrárny využívá lopatkové kolo, Darrieuův rotor nebo

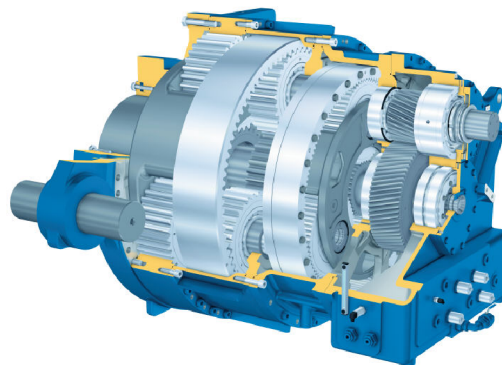
například Savoniův rotor [5]. Produkce větrné energie z elektráren využívající tyto rotory je zanedbatelná, proto se jim věnovat nebudeme.



Obrázek 2.2: Graf účinnosti větrných turbín [9]

Součinitel rychloběžnosti  $\lambda$  v obr. 2.2 znamená poměr mezi obvodovou rychlostí listů rotoru a rychlostí větru.

- Převodovka: Větrné elektrárny obvykle nedosahují vysokých otáček. Z toho důvodu se využívá převodový systém, který zvyšuje poměr otáček mezi rotorem a generátorem. Nejčastěji se využívají několikastupňové převodovky, na které je z bezpečnostních důvodů připojena brzda. Převodové systémy obvykle bývají hlučné, proto je kladen velký důraz na tichost těchto částí. Z těchto důvodů jsou často převodová kola cementována a broušena [9].
- Generátor: Dle [5] se pro konstrukce využívají technologie synchronního i asynchronního generátoru. Dále lze použít generátory stejnosměrné, případně s permanentními magnety. Není určeno, kterou technologii použít, záleží pouze na



Obrázek 2.3: Dvoustupňová převodovka větrné elektrárny od firmy Bosch-Rexroth s označením Redulus GPV pro výkon 2 MW [9]

výrobci a na určení dané elektrárny.

Pro malé elektrárny určené zejména pro dobíjení akumulátorů se využívají generátory stejnosměrné, popř. střídavé. Pro střední a velké výkony jsou konstruovány generátory synchronní nebo asynchronní.

Hlavní výhodou synchronních je velká účinnost při relativně nízkých pracovních otáčkách, pracují ovšem i při otáčkách vysokých. Lze je tedy využít pro veliký rozsah rychlostí větru. V porovnání s asynchronními jsou ale mnohem dražší a musí být doplněny o velmi komplikovaný řídicí mechanismus.

Asynchronní generátory jsou také výhodější, neboť neobsahují rotující součástky a nedochází k mechanickému poškození. Jednodušší jsou pro připojení k síti, protože nedochází k projevům oscilačních jevů.



Obrázek 2.4: Synchronní generátor větrné elektrárny o výkonu 2 MW. Generované jmenovité napětí 6,3 kV [9]

- **Stožár:** Jedná se o hlavní část nosného systému větrné elektrárny. V minulosti byly využívány příhradové konstrukce, které nahradily konstrukce výhradně ocelové se železobetonovým základem. Nejmodernější technologií je ovšem stavba elektrárny z prefabrikovaných železobetonových prstenců. Lze se ovšem setkat jak s konstrukcemi ocelovými, tak i s příhradovými konstrukcemi, ovšem obvykle mimo Evropu. Hlavním důvodem pro využívání příhradových konstrukcí je jejich levnější výstavba, zejména při výškách nad 100 m. Také jejich průhlednost je výhodou, neboť tolik neničí ráz krajiny.

Při využívání ocelových tubusů je nutné brát v úvahu vlastní kmitání konstrukce. Frekvence tohoto kmitání se nesmí blížit k frekvenci celého systému elektrárny, neboť by hrozilo její poškození nebo zničení [5].

- **Systém natáčení do směru větru:** Již v minulosti byly větrné mlýny konstruovány pro natáčení do směru větru. Původně se vše dělalo ručně, dnes se jedná o automatický proces. Gondola elektrárny je usazena na ložisku, které je poháněno obvykle dvěma, čtyřmi nebo šesti elektromotory [9]. Tento mechanismus je doplněn o brzdny systém, neboť by mohlo vlivem změn směru větru dojít ke zničení těchto motorů. V moderních větrných elektrárnách se dle [5] obvykle používají tyto systémy:

**Ocasní plocha** je nejjednodušší systém, který je využíván nejčastěji u malých elektráren. Princip spočívá v tom, že ke strojovně je připevněna osací plocha, která působením větru pootočí strojovnu do směru proudění.

**Boční pomocné rotory** jsou dvojice ozubených kol spojených s ozubeným věncem a sloupem elektrárny. Při poryvu bočního větru se roztočí a pomalu otáčí celou strojovnu.

**Natáčení pomocnými motory** je nejčastější způsob využívaný velkými elektrárnami. Skládá se ze tří částí. Vyhodnocovací člen určuje směr větru určený polohou větrné korouhvičky, následně předá signál elektromotoru, který elektrárnu otočí díky pastorku a ozubenému věnci.

- **Regulační systémy:** Nejsou obecně stejné pro všechny druhy elektráren. Obvykle záleží na velikosti nebo výkonu. Dle [5] má regulační systém elektrárny určené pro dodávky energie do sítě pět základních částí.

**Ovládací a kontrolní prvky** lze rozdělit na část technickou a programovou. Programová obsahuje speciální balík programů vyvinutých pro sledování činností elektrárny.

**Systém regulace vrtule** udržuje požadované otáčky vrtule nebo vrtuli úplně zastaví. Pro zastavení se využívá speciální brzda navržená pro tyto účely, případně dojde pouze k natočení listů.

**Kontrolní systém** je sada čidel měřících veškeré parametry elektrárny od výkonu přes rychlost větru, až po teplotu namáhaných ložisek.

**Systém natáčení do směru větru** již byl zmíněn.

**Systém připojení k síti** rozhoduje o připojení, případně odpojení generátoru

od sítě. Tento systém má přehled o všech parametrech týkajících se výkonu, otáček rotoru a generátoru nebo například rychlosti větru.

## 2.3 Druhy větrných elektráren

Větrné elektrárny lze dělit podle různých hledisek. Nejčastěji dle výkonu nebo instalované turbíny. Dle [6] lze větrné elektrárny rozdělit následovně:

Nejčastějším typem je **elektrárna s horizontální osou rotace**. Její stavbu jsme výše popsali, proto ji zde znovu rozebírat nebudeme. Tato elektrárna patří mezi celosvětově nejrozšířenější, je využívána jednotlivě od malých výkonů až po největší větrné parky.



Obrázek 2.5: Řada větrných elektráren postavených na pobřeží, Holandsko [6]

**Historické větrné mlýny** jsou nejstaršími zařízeními, které již od starověku poháněly obilné mlýny, pily, či zavlažování. Výkon tohoto mlýnu se odvíjel od počtu lopatek a poměrné lopatkové plochy zakryté plachtou.



Obrázek 2.6: Mlýny u vesnice Kinderdijk [6]

**Odporové větrné čerpadlo** je z historického hlediska hojně využíváno. Pracuje na velmi jednoduchém principu, kdy se vítr opírá do vhodně natočených lopatek a tím roztáčí připojenou hřídel. Tyto elektrárny jsou známé pro svou nízkou účinnost,



která je ale kompenzována jednoduchou konstrukcí a nízkými výrobními náklady. Z toho důvodu nebyla ani v minulosti využívána pro výrobu elektřiny, ale přímo pro vykonávání mechanické práce, nejčastěji mlýny na obilí nebo vodní čerpadla.



Obrázek 2.7: Mnoholistý odporový větrný mlýn používaný k čerpání vody především ve Spojených Státech, jižní Africe a v Austrálii [6]

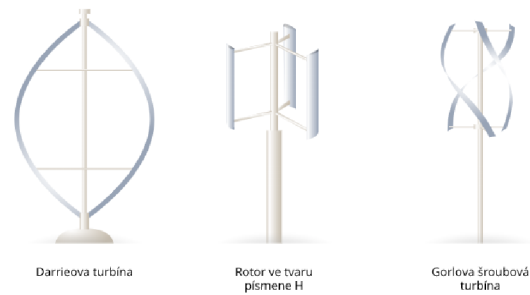
**Vertikální Savoninova turbína** byla patentována již roku 1929. Tvoří ji minimálně 2 půlválcové plochy využívající výslednice sil proudícího větru na vypuklou a vydutou lopatku. Díky tomu, že síla působící na vydutou lopatku je vyšší, vznikne moment síly. Tento rotor nedosahuje vysokých otáček, proto je vhodný zejména pro konání mechanické práce. Existují ale i upravené větrné generátory využívané pro získávání elektrické energie. Obvykle v místech, kde je silné turbulentní proudění. Tato turbína má využití v měřící technice, kde nachází uplatnění při konstrukci anemometrů pro měření rychlostí větru [5].



Obrázek 2.8: Střešní Savoninova turbína [6]



**Vertikální Darrieovu turbínu** vynalezl roku 1931 francouzský inženýr Georges Jean Marie Darrieus. Turbína je obvykle sestavena ze dvou nebo tří aerodynamických listů rotujících vertikálně. Patří mezi rychloběžné motory, proto musí být stavěna z velmi odolných materiálů. V praxi se lze setkat s rotorem tvaru písmene H nebo s listy tvaru spirály. Toho se využívá zejména pro eliminování pulsací vznikajících během rotace. Výhodou této turbíny je nezávislost na směru větru a také snadná údržba, neboť všechny důležité komponenty se nachází u země.



Obrázek 2.9: Typy Darrierovy turbíny [6]

# Kapitola 3

## Bioplynové stanice

Jedná se o energii vznikající ze zdrojů biologického původu označovaných se jako **biomasa**. Biomasa je dle [7] veškerá hmota biologického původu na naší planetě. Největší částí je biomasa rostlinná, která je narozdíl od fosilních paliv také významným nevyčerpatelným zdrojem energie. Biomasu získáváme buď záměrně v rámci výrobní činnosti, nebo se může jednat o odpad zemědělské, potravinářské, či například lesní výroby. Zhruba od druhé poloviny 20. století došlo k velmi intenzivnímu rozvoji technologií pro výrobu a využití bioplynu, neboť panovala panika z vyčerpání známých ložisek ropy a zemního plynu. Lidstvo se proto obrátilo ke zdrojům, které dojetí nemohou [7].

V rámci tohoto textu se budeme věnovat bioplynové stanici, jejím výhodám a nevýhodám a veškerým procesům, které v ní probíhají. Hlavním důvodem pro toto zaměření je obrovský nárůst počtu bioplynových stanic během posledních let a také vznik stanic produkujících plyn využitelný pro každodenní spotřebu místo plynu zemního. To se také odráží i v potřebě fyzikálních úloh na toto téma.

### 3.1 Princip fungování bioplynové stanice

Abychom se mohli věnovat výrobě energie, musíme nejdříve popsat vznik bioplynu. Biologický rozklad probíhá za přítomnosti množství mikroorganismů. Jedná se o velmi složitý proces, jehož výsledkem je tzv. bioplyn (směs methanu a dalších plynů). Dle [5] má tento proces tři základní fáze:

**Hydrolýza:** probíhá za přítomnosti vzdušného kyslíku, který se postupně spotřebovává za vlhkosti vyšší než 50 %. Jedná se o přeměnu organických látek na nižší organické sloučeniny, které musí být rozpustitelné.

**Acidogeneze:** dokončí se tvorba bezkyslíkatého prostředí, probíhá přeměna na mastné kyseliny, vodík, či oxid uhličitý.

**Metanogeneze:** během této fáze probíhá přeměna vodíku a oxidu uhličitého na metan, případně přeměna kyseliny octové na metan a oxid uhličitý.

Bioplyn obsahuje 50 až 75 % metanu, 25 až 40 % oxidu uhličitého a přibližně 1 až 3 %

ostatních plynů (například dusík a vodík). Produkce bioplynu závisí na vstupním materiálu. Materiály posuzujeme podle poměru obsahu dusíku a uhlíku, tzv. poměr C:N (podíl celkového obsahu uhlíku a dusíku). Optimální hodnota tohoto poměru se pohybuje mezi 25:1 až 30:1. Těchto hodnot lze v praxi dosáhnout smísením různých materiálů. Platí, že exkrementy hospodářských zvířat mají tento poměr menší než 10. V případě rostlinného materiálu tento poměr narůstá v závislosti na zralosti [7].

V bioplynové stanici dochází jak k produkci bioplynu, tak k jeho zpracování. V rámci procesu fermentace dochází k produkci tepla a již zmíněného bioplynu, který je dále využíván jako palivo kogeneračních jednotek. Kogenerační jednotka produkuje elektrickou energii a teplo. Tuto jednotku popíšeme v kapitole 3.3.

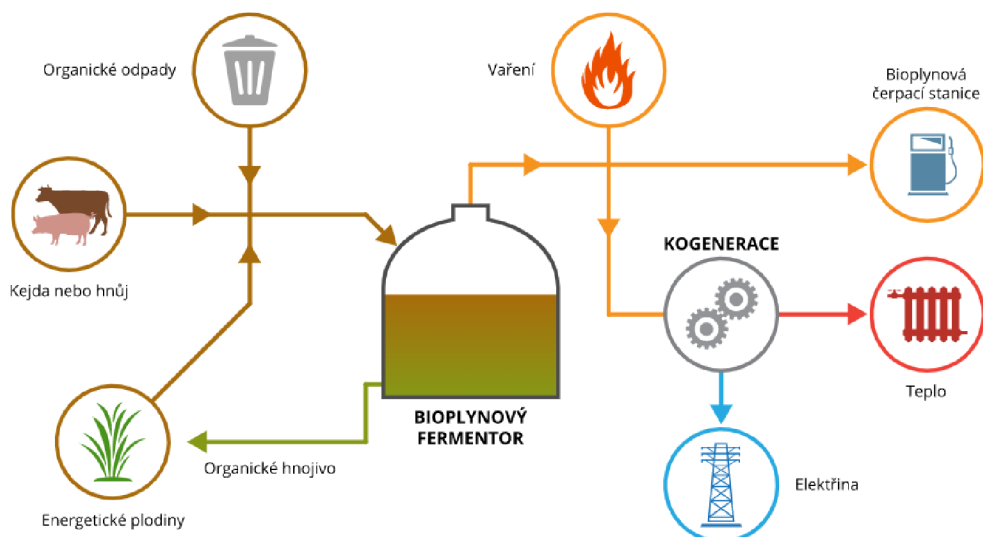
## 3.2 Stavba bioplynové stanice

Téměř všechny bioplynové stanice mají dle [7] čtyři základní technologické části: příjmová část, fermentor s příslušenstvím, úprava a skladování bioplynu a kalová koncovka. Jednotlivé technologické linky se odlišují v závislosti na zpracování tuhého, či tekutého materiálu.

- Příjmová část: Tato část slouží zejména pro úpravu a přípravu materiálu. Provádí se zde například separace nežádoucích materiálů (kamení, písek, sklo), optimalizace vstupního materiálu (úprava poměru C:N a v neposlední řadě dávkování materiálu do fermentoru.
- Fermentory: Hlavní část celé bioplynové stanice. V praxi se setkáme jak s jedním, tak sestavou více fermentorů v rámci jedné stanice. Nejvíce rozšířené jsou fermentory určené na tzv. mokrou fermentaci, méně časté pro suchou. Specifickými zařízeními pro výrobu bioplynu jsou laguny a řízené skládky komunálních odpadů.

**Fermentory na mokrou fermentaci** jsou nejvíce rozšířeny. Obvykle jsou stavěny z plynotěsného železobetonu, kovu a plastu. Fermentory lze různě dělit, například podle tvaru, rozměrů, objemu, či vzhledem k umístění v terénu. Dalším možným dělením je na řízené a neřízené. Fermentory mohou tvořit sestavu. Klasickou soustavu tvoří příjmový zásobník, fermentor a skladovací zásobník. Novější stanice mají linku upravenou, za fermentorem s řízeným procesem je umístěn další, tentokrát s procesem neřízeným (odborně nazýván dofermentor). Díky tomuto dodatečnému fermentoru lze získat dalších 5 - 20 % bioplynu. Takto postavená soustava může být upravena na soubor „kruh v kruhu“ nebo „dvojitý kruh v kruhu“.

**Fermentory na suchou fermentaci** lze rozdělit na několik typů. Nejčastějším je jednotka typu „koš krytý tepelně izolovaným zvonem“, častý je také „garážový typ“. Další typy se již objevily pouze lokálně, případně nebyly úspěšné během zkušebního provozu. Všechny fermentační jednotky tohoto typu jsou



Obrázek 3.1: Vstupy a výstupy procesu fermentace [6]

obsluhovány čelním nakladačem nebo mostovým jeřábem za přísných podmínek. Vždy musí být nejdříve odvětrán bioplyn a až poté je povolen přístup. Tyto jednotky jsou konstruovány obdobně jako pro mokrou fermentaci, hlavními materiály jsou plynotěsný železobeton, kov a plast. Bioplyn je zde produkován specifickým způsobem, proto mají stanice tohoto typu až 8 fermentačních jednotek.

- Úprava a skladování: Bioplyn je ve stanicích přímo skladován a upravován až do formy biometanu, který je používán jako palivo do motorů v kogeneračních jednotkách. Pro účely skladování slouží vyrovnávací plynojemy.

**Vyrovnávací plynojemy** slouží zejména pro vyrovnávání „nerovností“ mezi výrobou a spotřebou bioplynu. Obvykle jsou dimenzovány pro maximálně jednodenní spotřebu. Bývají konstruovány ze stejných, případně podobných materiálů jako fermentory. Existuje různé dělení těchto plynojemů, například podle tlaku nebo podle konstrukce. Bioplynová stanice může fungovat i bez vyrovnávacího plynojemu, poté ovšem vyžaduje preciznější obsluhu a kontrolu spotřeby.

**Úprava bioplynu** probíhá v několika fázích. Nejdříve dochází k sušení. V rámci tohoto procesu je snižována teplota a vlhkost. Následně dojde k odstranění oxidu uhličitého, který snižuje energetický potenciál. Třetím krokem je odstranění sulfanu. Sulfan je nežádoucí zejména pro negativní účinky na motory, kde je následně bioplyn využíván. Nejčastěji je odstraňován pomocí malého množství kyslíku nebo oxidů železa. Poslední krokem je odstranění dalších příměsí, například halogenů.

- Kalová koncovka: Výstupem je digestát (fermentovaný materiál). Problém di-

gestátu spočívá ve vyšším obsahu vyseparovaných látek, například těžkých kovů. Ve větších stanicích dochází k separování tuhého a tekutého podílu. Tuhá část je využívána do kompostů. Tekutá bývá doplněna o minerální přísady a použita jako tekuté hnojivo [5].

### 3.3 Kogenerace

V našich podmínkách je bioplyn nejčastěji využíván ke spalování v kotlích nebo pro pohon kogeneračních jednotek. Ty lze nalézt u většiny bioplynových stanic, proto si rozebeme jejich funkci.

**Kogenerace** je dle [10] kombinovaná výroba elektrické energie a tepla. To se u běžných procesů výroby elektřiny nevyužívá. Tento proces ho využít dokáže, proto v rámci procesu kogenerace vzniká nejen elektrická energie, ale také teplo využívané například v domácnostech. Tento proces je díky kombinované výrobě mnohem efektivnější, odvodem „odpadního tepla“ se ušetří až 70 % energie paliva v porovnání s oddělenou výrobou elektřiny a tepla.



Obrázek 3.2: Kogenerační jednotky v areálu bioplynové stanice [6]

Základními částmi kogenerační jednotky jsou **motor**, **generátor**, **rozvaděč** a **spalinový výměník**.

Motor společně s gerátorem tvoří základ každé jednotky. Jedná se o upravený pístový motor poháněný zemním plynem. Dále je napojen synchronní generátor s frekvencí 50 Hz, což je výhodné z hlediska bezproblémového připojení k síti. Obě zmíněné části, tedy motor a generátor produkují teplo, které odvádí systém výměníků do topného systému. Často obsahují jednotky akumulární zásobník na teplo, který je využíván v případě nečinnosti.

Elektřina vyrobená v této jednotce je na úrovni nízkého napětí, proto bývá připojena

do lokální rozvodné sítě, případně přes transformátor do distribuční sítě vysokého napětí [10].

V dnešní době se lze setkat s tzv. trigenerací. To znamená výrobu elektřiny, tepla a chladu. Tohoto procesu lze využít v místech vyžadujících spotřebu chladu, například pro klimatizace. Úprava pro výrobu chladu není náročná, jedná se o přístavění speciálního dílu poblíž kogenerační jednotky.

### 3.4 Bioplynové stanice v České republice

V České republice pochází až jedna čtvrtina obnovitelné elektřiny právě z bioplynu. V roce 2019 bylo vyrobeno 2 528 GWh elektřiny. V témže roce bylo na našem území postaveno 420 zemědělských bioplynových stanic o instalovaném elektrickém výkonu 320 MW. Průměrná bioplynová stanice měla instalovaný výkon 756 kW a během ročního provozu vyrobila přibližně 6 GWh elektřiny a nezanedbatelné množství energie tepelné. Plány na rozvoj bioplynu do roku 2030 hovoří o nižší výrobě elektřiny, zaměření se na energii tepelnou a následně na výrobu biometanu pro pohon vozidel [11].

Další předpokládanou výhodou stanic je možnost regulování jejich výkonu a s tím související uskladnění bioplynu. Za ideálních podmínek bychom mohli dosáhnout regulačního výkonu až 1 000 MW. V takovém případě by byl systém bioplynových stanic schopen konkurovat přečerpávací vodní elektrárně Dlouhé stráně [11].

# Kapitola 4

## Vodní elektrárny

Energie vodních toků byla využívána odedávna. Již v pravěku se vodní toky využívaly k přepravě, obvykle se jednalo o splavování lodí či dřeva. Později byla voda přiváděna například do mlýnů a pil, kde se využívala pro konání mechanické práce. Celosvětově patřila voda k jednomu z nejrozšířenějších zdrojů energie. Po rozvoji elektřiny se velmi rychle šířila výroba právě z energie vody.

Na území České republiky tomu nebylo jinak. Od přímého pohonu strojů se postupně došlo až k výrobě elektrické energie. Nejstarším zařízením byla elektrárna v Písku. Vznikla již v roce 1888 a díky ní se stalo zmíněné město prvním v Čechách, kde bylo veřejné osvětlení. V současné době se lze na našem území setkat s velkým množstvím vodních elektráren různých výkonů. Většina největších se nachází na vltavské kaskádě. Celkový instalovaný výkon se rok od roku zvyšuje. V roce 2018 dosáhl 1 961,1 MW [2].

Vodní elektrárny neslouží pouze k výrobě elektřiny. V případě již zmíněné vltavské kaskády slouží jako regulace spodního toku Vltavy. Celá kaskáda je také schopna zabránit povodním nebo je velmi zmírnit. Přehrady také mohou být krásným doplňkem krajiny. Typickým příkladem je přehrada Les Království nacházející se nedaleko Dvora Králové nad Labem.



Obrázek 4.1: Přehrada Les Království na jaře 2017 [12]

## 4.1 Princip fungování

Vodní elektrárny pracují na principu přeměny potenciální energie vody na energii elektrickou. Voda teče z místa s vyšší potenciální energií do turbíny, kde je využívána její kinetická energie. Turbína roztáčí generátor, jehož rotační energie se díky elektromagnetické indukci mění na elektrickou. V praxi se lze setkat se sestavou obsahující mezi turbínou a generátorem převodový systém zvyšující otáčky generátoru.

### 4.1.1 Teoretický výkon turbíny

Uveďme si nyní vztahy pro výpočet teoretického výkonu turbíny vodní elektrárny. Elektrárna využívá přeměny potenciální energie vody na kinetickou. Potenciální energie se vypočítá vztahem:

$$E_p = mgH \quad [\text{J}] \quad (4.1)$$

kde  $m$  je hmotnost vody,  $g$  je tíhové zrychlení a  $H$  je výškový rozdíl hladin neboli spád.

Uvažujme pokles vodní masy o objemu  $D$  metrů krychlových z horní polohy (hladiny) o  $H$  metrů níže do dolní polohy tak, že rychlost vody po dosažení dolní hladiny bude nulová. Voda přitom vykoná teoretickou práci:

$$E_t = D\rho gH \quad [\text{J}] \quad (4.2)$$

kde  $D$  je objem vody a  $\rho$  hustota vody.

Každou sekundu protéká turbínou  $Q$  [ $\text{m}^3$ ] vody při výškovém rozdílu hladin  $H$  a voda koná práci podle výše uvedeného vztahu. Teoretický výkon lze vypočítat pomocí známého vztahu:

$$P = \frac{W}{t} \quad [\text{W}] \quad (4.3)$$

kde  $W$  je práce (v našem případě energie) a  $t$  je čas.

Dosažením 6.8 do 6.11 dostaneme vztah:

$$P = \frac{E_t}{t} = \frac{D\rho gH}{t} = Q\rho gH \quad [\text{W}] \quad (4.4)$$

kde  $Q$  je průtok turbínou (objem vody),  $\rho$  hustota vody,  $g$  tíhové zrychlení,  $H$  výškový rozdíl hladin a  $t$  čas [7].

Je nutné zdůraznit, že uvedené vztahy přesně neodpovídají praxi. V rámci celého procesu dochází ke ztrátám a přeměnám energie na jiné formy. Reálný výkon je tedy nižší než vypočítaná hodnota.

### 4.1.2 Vyrobená elektrická energie

Přeměna energie vody na energii elektrickou probíhá v hydroagregátu. Tímto pojmem se rozumí strojová sestava obsahující spojení turbíny a generátoru. Turbína



a generátor mohou být spojeny pevně, případně přes převodový systém (v případě malých otáček turbíny).

Přeměna hydraulického výkonu na mechanický probíhá v turbíně (motoru). Její účinnost se pohybuje v závislosti na druhu a velikosti od 75 % do 93 %. Dále je mechanický výkon předáván generátoru, kde je měněn na elektrický. Účinnost generátoru je zejména vlivem ztrát okolo 90 %. Účinnosti nad 90 % platí pro generátory synchronní, asynchronní jsou účinné méně, obvykle pod 90 %. Za turbínou může být instalován převodový systém, kde dochází ke ztrátám 2 až 6 %. Tato součást se týká primárně malých vodních elektráren (MVE), kde jsou zpravidla nižší rychlosti turbín. Poslední ovlivnění výkonu nastane transformací, kde bývá účinnost od 92 % do 98 %.

Celkovou účinnost elektrárny lze vyjádřit jako:

$$\eta_c = \eta_t \eta_g \eta_p \eta_{tr} \quad (4.5)$$

kde jsou  $\eta_t$  účinnost turbíny,  $\eta_g$  účinnost generátoru,  $\eta_p$  účinnost převodového systému a  $\eta_{tr}$  účinnost transformátoru.

Výsledný výkon  $P_c$  tedy bude:

$$P_c = P \eta_c \quad [\text{W}] \quad (4.6)$$

Dosazením vztahů 4.4 a 4.5 do 4.6 dostaneme konečnou podobu vztahu pro skutečný výkon vodní elektrárny:

$$P_c = Q \rho g H \eta_t \eta_g \eta_p \eta_{tr} \quad [\text{W}] \quad (4.7)$$

Tento výraz lze upravit a zjednodušit.

Hodnotu hustoty vody uvažujeme  $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a tíhové zrychlení  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Pak dosazením těchto dvou hodnot do 4.7 dostaneme:

$$P_c = 9,81 Q H \eta_c \quad [\text{kW}] \quad (4.8)$$

Rovnice 4.8 vyjadřuje skutečný výkon jednoho hydroagregátu. Vodní elektrárny mají obvykle nainstalované větší množství těchto soustav. Velké vodní elektrárny (VE) mají v extrémních případech více než 10 turbín. Celkový výkon elektrárny tedy bude roven součtu všech hydroagregátů [7].

Dle [7] se celková účinnost pohybuje u velkých vodních elektráren od 80 do 85 %, u malých vodních elektráren okolo 75 %.

Pokud bychom chtěli určit celkovou vyrobenou energii při výkonu  $P$  za  $t$  hodin, využili bychom rovnice:

$$E = P t \quad [\text{Wh}] \quad (4.9)$$

Do této rovnice můžeme dosadit rovnicí 4.8. Získáme tak vztah pro skutečnou vyrobenou energii.

$$E = g Q H \eta_c t \quad [\text{kWh}] \quad (4.10)$$

## 4.2 Místa výstavby

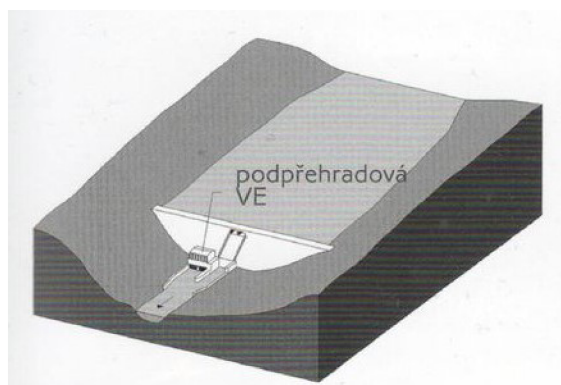
V rámci navrhování stavby elektrárny na vodním toku je uvažováno značné množství aspektů. Vždy se hledá optimální řešení, které zachovává ráz krajiny, zohledňuje urbanizaci, existující průmysl a existující komunikace. Efektivní využití vodní energie také závisí na spádu a průtoku v lokalitě elektrárny, což obvykle přináší stavební zásahy do krajiny.

Návrh konkrétního hydroenergetického využití je pro každou elektrárnu specifický. Jedná se o velmi složitý inženýrský úkol. Dle [5] umožňují přírodní podmínky značné množství řešení, které se zpravidla dělí do 4 základních skupin:

- Vzdouvací schémata, u kterých je průtok i spád ovlivněn vzdouvacím zařízením, obvykle přehradou nebo jezem. Tento návrh je využíván v místech s malým podélným sklonem a velkým průtokem. Nejlépe se využije v málo osídlených údolích, kde se postaví přehrada.
- Derivační schémata využívají soustředěný spád tlakovou, případně beztlakovou derivací. Zde dochází k minimálním hydraulickým ztrátám a maximálnímu využití spádu. Využívá se na tocích s větším podélným sklonem.
- Přehradně-derivační schémata využívají jak vzdouvací zařízení (přehradu), tak derivaci. Největší využití mají na tocích s menším průtokem a větším sklonem.
- Přečerpávací schémata nejsou závislá na vodním toku. Spád a velikost průtoku jsou závislé na aktuální výrobě nebo využití energie. Reálně je ovšem omezen topografií daného území.

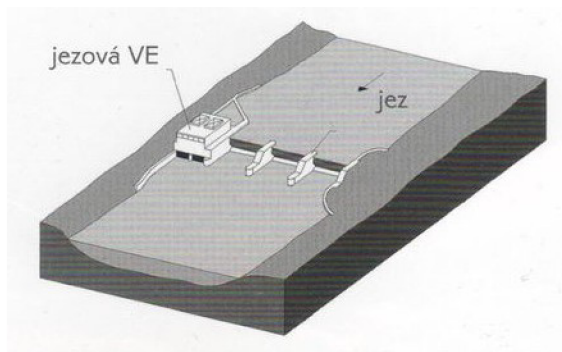
Dále je dle [5] možné rozdělit vodní elektrárny podle způsobu využití spádu v určitém úseku vodního toku na následující typy:

- Podpřehradová, využívající spádu vytvořeného přehradou. Jejich výhodou je většinou poměrně velký objem zásob vody, proto pracují zejména v režimu regulačním.



Obrázek 4.2: Podpřehradová VE [5]

- Jezové (zdržové) mají spád vytvořený jezem. Nejčastěji pracují v průtokovém režimu, velmi výjimečně v režimu regulačním (pouze omezeně).



Obrázek 4.3: Jezová VE [5]

- Derivační VE využívají spád získaný vedením vody v derivaci, dělíme je na tyto typy:  
 S volnou hladinou viz obr. 4.4. Může se jednat například o náhon nebo o speciálně vybudovaný kanál.  
 Tlakové viz obr. 4.5. Nejčastěji se jedná o tlakové potrubí, případně tlakovou stolu.  
 Kombinované viz obr. 4.6, kdy je voda přiváděna kombinací derivačního kanálu a tlakového potrubí.

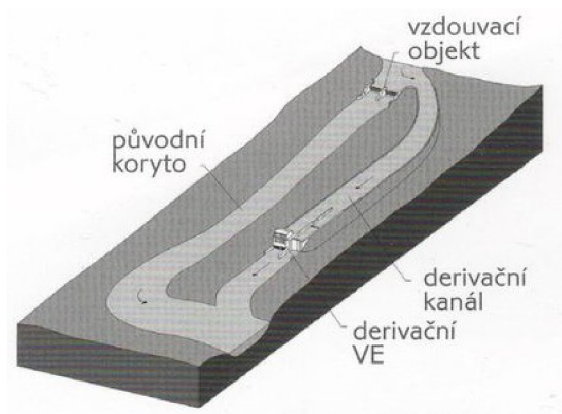
Tyto typy VE obvykle nevyžadují velkou vzdouvací stavbu na vodním toku nebo v údolí. Nejčastěji pracují v průtokovém režimu, některé derivační VE mohou pracovat v režimu regulačním.

Nevýhodou tohoto typu elektráren je nutnost ponechat v původním korytu část původního průtoku, zejména pro migraci ryb a pro přirozeně žijící organismy. Nelze tedy využít plný potenciál vodního toku. To je problém v období sucha, kdy je průtok omezen a často nestačí ani na přirozený průtok. Z hlediska výroby jsou v tomto období tyto elektrárny nevyužitelné.

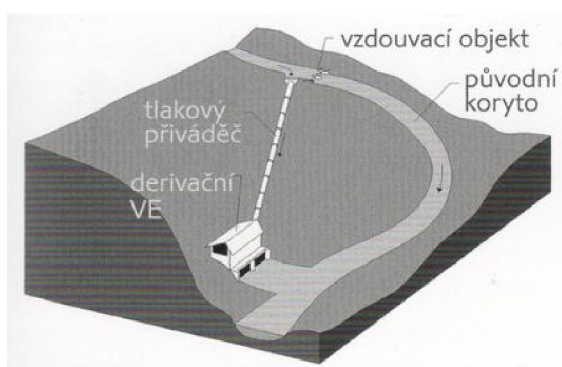
- MVE využívají vodní energii na přiváděcích, které jsou budované pro jiné účely. Nejčastěji se jedná o elektrárny při vodárenských nádržích, kde se provádí odběry pitné nebo technologické vody.

### 4.3 Části vodní elektrárny

Hlavními součástmi VE a MVE jsou dle [5] vtokový objekt, přiváděč a odpad a výrobní objekty. Dále se mohou u elektráren vyskytovat další objekty, například bi-okoridory, či objekty pro plavbu (plavební komory). My si v rámci jednotlivých částí zmíníme také hráz, neboť z hlediska fyzikálních principů se jedná o nejdůležitější část elektráren.



Obrázek 4.4: Derivační VE s beztlakovým přiváděčem [5]



Obrázek 4.5: Derivační VE s tlakovým přiváděčem [5]

### 4.3.1 Vtokový objekt

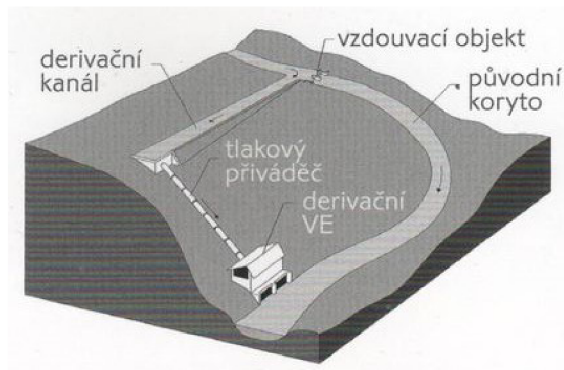
Hlavním účelem této části je zajištění dostatečného přítoku vody z toku, nádrže, či zdrže do přivádeče vedoucího vodu k turbínám elektrárny. Celý vtokový objekt musí být navržen tak, aby zabraňoval vniknutí hrubých naplavenin a aby docházelo k minimálním energetickým ztrátám. Také by měl být navržen k případné regulaci průtoku.

Vtokové objekty se obvykle skládají z dnového prahu, hrubých česlí, norné clony, provizorního hrazení, provozního uzávěru a mohou obsahovat osazovací nádrž s proplachem.

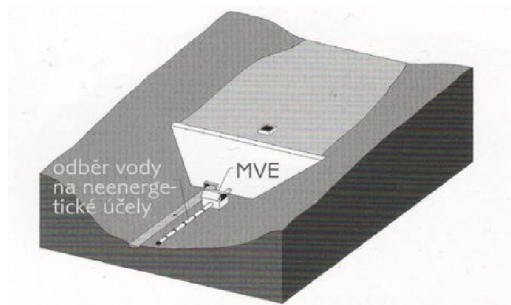
### 4.3.2 Přivádeč a odpad

Této části je věnována největší pozornost z hlediska konstrukčního a dispozičního řešení. Jedná se o nejnákladnější část (z hlediska investice) z celé elektrárny jak při stavbě velkých, tak i malých vodních elektráren. Dělí se, jak již bylo zmíněno, na tlakové a beztlakové.

**Beztlakové přivádeče** neboli náhony jsou navrhovány a stavěny v místech, kde je to vhodné. Hlavním důvodem je pořizovací cena, která je mnohem nižší než



Obrázek 4.6: Derivační VE v kombinaci s tlakovým a beztlakovým přiváděčem [5]



Obrázek 4.7: MVE na přiváděči budovaném pro neenergetické účely [5]

u přiváděčů tlakových. Konstrukčně se navrhují buď otevřené, nebo zakryté, nejčastěji jako kanály obdélníkového tvaru.

V rámci konstrukce musí kanály splňovat několik parametrů. Nejvýznamnějšími z nich jsou stabilita a odolnost vůči podemletí, nesmí prosakovat a významně měnit hladinu podzemní vody. Také musí být navrženo takové převýšení, aby nemohlo dojít k přelití, případně musí být násyp konstrukčně upraven.

**Tlakové přiváděče** se využívají nejčastěji v místech, kde je třeba překonat velký spád a kde je nemožné postavit přiváděč beztlakový. Konstrukčně se dělí na tlaková potrubí a štolu. Tlaková potrubí jsou konstruována z materiálů, které se v podloží přirozeně nevyskytují. Oproti tomu štolu využívají přirozeně se vyskytujícího materiálu, nejčastěji bývají raženy přímo v horninách.

U tohoto typu přiváděče je nutné posuzovat tlakové parametry nastávající při provozu a odstavení turbín. Pro potrubí může být nebezpečný jak příliš vysoký tlak, tak tlak nízký. Při odstavení generátoru totiž může dojít ke zborcení potrubí vlivem vnějšího zatížení.

### 4.3.3 Výrobní objekty

Mezi výrobní objekty patří strojovna, provozní budova, rozvodna a objekty pro doprovodná zařízení (např. montážní prostor, bývá součástí strojovny). Strojovnou rozumíme objekt obsahující technologická zařízení, tedy soubor zařízení určených

k výrobě elektřiny. Skládá se ze dvou částí. Ve vrchní části je vše nad úrovní podlahy (zpravidla na úrovni příjezdové komunikace). Jedná se nejčastěji o převodový systém, generátor a případně transformátor. Spodní částí bývá samotná turbína a případně hřídel propojující turbínu s generátorem (převodovým systémem).

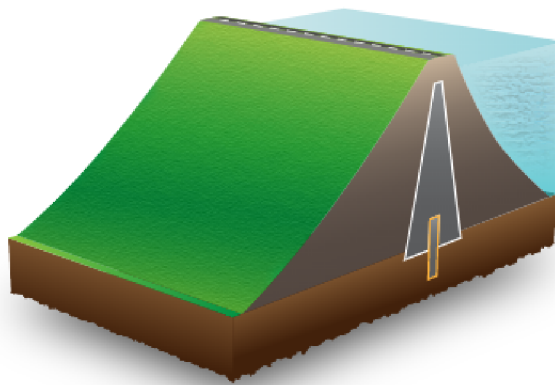
Dříve se v rámci elektráren stavěla také provozní budova s kompletním zázemím pro obsluhu elektrárny. V dnešní době se od této budovy ustupuje, neboť lze téměř všechny elektrárny ovládat dálkově.

Posledním významným objektem je rozvodna. Jedná se o výrobní objekt, přes který je VE připojena k síti. Přes tuto část je veden veškerý výkon elektrárny.

#### 4.3.4 Hráz

Velmi důležitou částí elektrárny, která rozhodně stojí za zmínění je hráz. Dle [6] se hráze dělí na gravitační (sypané nebo betonové), klenuté betonové hráze a hráze s opěrnými pilíři. Typ hráze záleží na druhu terénu a na dostupnosti stavebního materiálu.

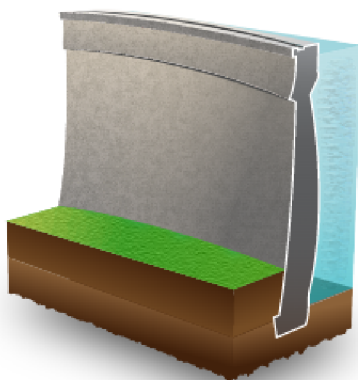
- Sypané gravitační hráze využívají svou hmotnost. Bývají plněny zeminou nebo kamením. Návodní strana bývá pokryta nepropustnou vrstvou z betonu, kamenných desek, ocelových plátů a dalších materiálů. Vodotěsnost bývá zajištěna nepropustnou vrstvou jílu uprostřed hráze. Tato technologie je již zastaralá, modernější je využití asfaltového betonu. Ten je lepší z hlediska odolnosti vůči seismickým aktivitám.



Obrázek 4.8: Schéma sypané gravitační hráze [6]

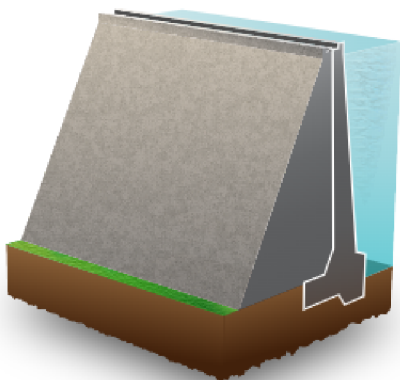
- Betonové klenuté hráze jsou materiálově nejméně náročné. Jedná se o tenkou „skořepinu“ pevně ukotvenou v podloží a ve svazích strmých kaňonů. Její stability je dosaženo díky rozložení působících sil a tíhou samotné hráze. Největší síla hydrostatická je díky tvaru stavby roznesena na okraje hráze a následně do skalnatého masivu.





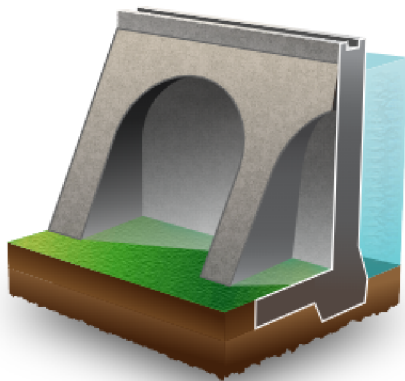
Obrázek 4.9: Schéma betonové klenuté hráze [6]

- Gravitační betonové hráze bývají budovány z obrovského množství betonu a kameniva. Vodu zadržují díky své hmotnosti, která svou silou tlačí přehradu k zemi. Bývá konstruována z více nezávislých částí trojúhelníkového průřezu, kde největší síla působí na patu jejich vzdušné strany (voda se je snaží „převrátit“). Jednou z nejznámějších přehrad, která je postavena nejen s využitím této technologie je Hooverova přehrada ve Spojených státech amerických (v případě této přehrady se jedná o kombinaci více technologií).



Obrázek 4.10: Schéma gravitační betonové hráze [6]

- Hráze s opěrnými pilíři na vzdušné straně mají pilíře postaveny v rozmezí 5 až 30 m v závislosti na velikosti hráze a její konstrukci. Výhodou je možnost použití menšího množství materiálů na samotné těleso hráze.



Obrázek 4.11: Schéma hráze s opěrnými pilíři [6]

## 4.4 Turbíny

Jednou z nejdůležitějších částí strojnětechnologického zařízení vodních elektráren je vodní turbína. Vodní turbíny se dle [7] dělí podle různých hledisek. Tím nejzákladnějším je dělení dle způsobu přenosu energie vodního toku na oběžné kolo.

- Rovnotlaké turbíny (akční), ve kterých se polohová energie vody v rozváděcích kanálech kompletně přemění na energii kinetickou. Tato energie je následně využívána v oběžném kole, které se zpravidla nachází nad dolní hladinou. Je tedy maximálně využito příslušného převýšení. Nejtypičtějšími zástupci tohoto typu jsou turbíny Peltonovy a Bánkiho.
- Přetlakové turbíny (reakční) nevyužívají maximální potenciál kinetické energie. V rozváděcím kanálu se přemění pouze část potenciální energie na kinetickou, zbytek se přemění až v rámci průchodu vody oběžným kolem, kterému je energie předána. V turbíně je kvůli tomu vysoký hydrostatický tlak a z toho důvodu je velká výtoková rychlost. Energii vytékající vody využívá zpětným sáním tzv. savka. Do této skupiny patří Kaplanova a Francisova turbína.

Další možné dělení je dle polohy hřídele:

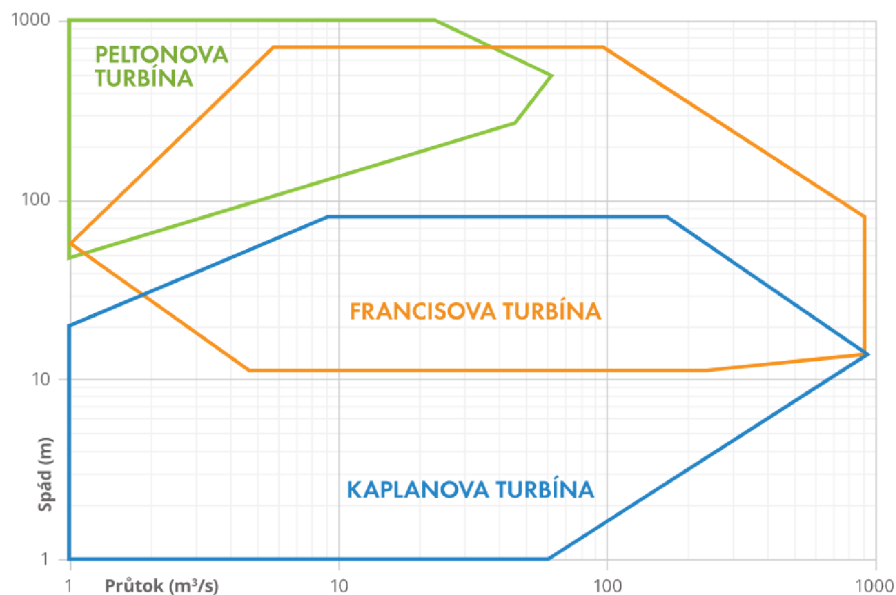
- Vertikální: většina dnes používaných turbín, výjimkou jsou turbíny přímoproudé.
- Horizontální: nejčastěji větší přímoproudé turbíny.
- Šikmé: menší přímoproudé turbíny.

Posledním významným typem turbín jsou přetlakové reverzibilní turbíny. Ty pracují v režimu turbínovém i čerpadlovém. Využití nacházejí v přečerpávacích vodních elektrárnách (PVE). Obvykle se jako reverzibilní využívají Francisovy turbíny.



Vodní turbíny musí být vždy doplňovány dalšími zařízeními. Nazýváme je příslušenstvím vodních turbín. Typickým příkladem jsou spirály, šachty, odsávací roury, uzávěry, převody nebo regulátory. Tato zařízení nalezneme u daných turbín pokaždé, ovšem v závislosti na typu, uspořádání turbíny a jejích parametrech mohou být některá vynechána [6].

Možnosti využití nejčastějších turbín v závislosti na spádu a průtoku lze vidět v následujícím grafu. V grafu chybí níže zmíněná Bánkiho turbína. Tu bychom mohli doplnit do spádů od 5 m do 60 m pro velmi nízké průtoky  $0,01$  až  $0,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  [7].



Obrázek 4.12: Rozsah využití nejpoužívanějších turbín [6]

#### 4.4.1 Kaplanova turbína

Jak již bylo zmíněno, jedná se o přetlakovou turbínu. Využívá se pro menší a střední spády při malém, až středním průtoku. Pro svůj efektivní chod využívá natáčení rozváděcích a oběžných lopatek, což je její obrovská výhoda. Zmíněná vlastnost ji umožňuje získání maximálního výkonu při různých průtocích.

Konstručně je turbína zejména z důvodu natáčecích mechanismů poměrně složitá. Také její pořizovací cena patří mezi vyšší. To je ovšem kompenzováno zmíněnými výhodami, zejména možností využití při proměnlivých průtocích. Nejčastěji je vyráběna z ocelolitiny nebo nerezavějící oceli. Hlavním důvodem je její rychloběžnost (obvodová rychlost turbíny je přibližně dvakrát vyšší než rychlost vody).

Účinnost těchto turbín je přes 90 %, v případě MVE, kde mohou být vyrobeny s pevnými lopatkami bývá nižší. Kaplanovy turbíny jsou v Čechách instalovány například v některých elektrárnách Vltavské kaskády nebo elektrárně Lipno II [6].



Obrázek 4.13: Rotor přetlakové Kaplanovy turbíny [6]

#### 4.4.2 Francisova turbína

Patří také mezi přetlakové turbíny. V energetice se jedná o jednu z nejpoužívanějších. Jedná se o radiaxiální turbínu. To znamená, že voda do turbíny vstupuje radiálně a vystupuje axiálně. Francisova turbína může být také použita pro velký rozsah průtoků i spádů. Její regulace probíhá pomocí natáčení lopatek rozváděcího kola po jejím obvodu.

Voda přitéká do spirální skříně okolo turbíny, kde je rovnoměrně rozdělena do všech mezilopátkových kanálů. Správným nastavením voda získává optimální rychlost a směr pro dopad na lopatky oběžného kola, kde dojde k předání energie. Voda odtéká savkou ven do spodní nádrže. Díky vodotěsnosti savky může být využito maximálního možného spádu.

Účinnost těchto turbín přesahuje 90 %. Pracují až při spádech do cca 500 metrů. Dokáží pohánět generátory o výkonu do 1 GW a jejich turbíny dosahují průměrů až 10 m. Další výhodou tohoto typu je využitelnost v PVE, kde pracují v režimu turbíny nebo v režimu čerpadla, což umožňuje efektivně vyrovnávat nestabilitu v elektrické síti. V České republice jsou reverzní Francisovy turbíny využity například v PVE Dlouhé stráně [6].



Obrázek 4.14: Rotor malé Francisovy turbíny s pevnými lopatkami [6]

### 4.4.3 Peltonova turbína

Jedná se rovnotlakou akční turbínu s parciálním tangenciálním ostřikem oběžného kola. To znamená, že voda je na turbínu přiváděna ve směru tečny k oběžnému kolu a přiváděna je pouze na jeho část.

Peltonova turbína se používá pro velké spády při malém průtoku. Nejčastěji bývá instalována v horizontálním provedení, ovšem lze se setkat i s provedením vertikálním, kdy může dosahovat vyšších výkonů. Do turbíny je voda přiváděna tlakovými přiváděči, které jsou na konci osazeny ostříkovými dýzami (tryskami). V nich se energie vody mění z tlakové na kinetickou. Následně je voda nasměrována na oběžné kolo s lopatkami lžícovitého tvaru. Voda během otočení o polovinu kola předá turbíně téměř veškerou svou energii a v dolní pozici padá do odpadního kanálu, kde je odvedena pryč z elektrárny. Regulace výkonu probíhá odkloněním vodního paprsku a následným zmenšením průměru dýzy pomocí centrální regulační jehly. Jedná se o bezpečnostní postup požadovaný z důvodu možného vzniku rázů v tlakovém potrubí.

Účinnosti těchto turbín dosahují až 90 %, pro jejich menší provedení jsou účinnosti přibližně o 10 % nižší. Výkonem se pohybují přibližně do 200 MW, větší turbíny bývají limitovány konstručními mezemi, zejména odtředivou silou působící na lopatky oběžného kola. Obvykle jsou využívány v horských oblastech, kde jsou malé průtoky, ale velmi velké spády. U nás se tato turbína nevyužívá, nejsou pro ni vhodné podmínky [6].



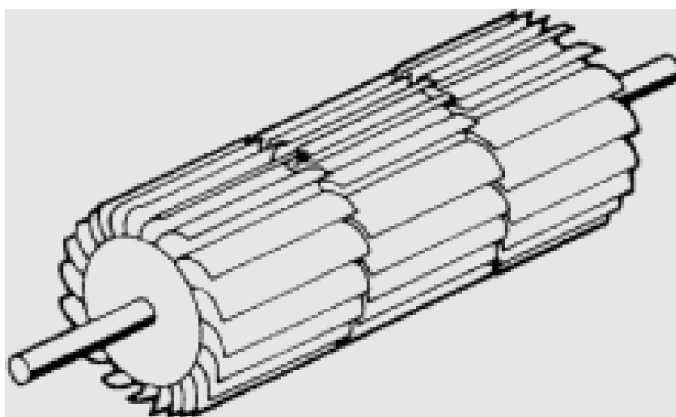
Obrázek 4.15: Oběžné kolo Peltonovy turbíny s dvojitými lžícovitými lopatkami [6]

#### 4.4.4 Bánkiho turbína

Bánkiho turbína patří do skupiny rovnotlakých turbín. Jde o v principu velmi jednoduchou turbínu. V minulosti byla využívána více z důvodu její odolnosti a nenáročnosti. Turbína je montována přímo na přiváděcí potrubí a v dnešní době je již automaticky ovládána.

Provedení může být jak horizontální, tak vertikální. Podle toho je upraven přívod vody. Regulace průtoku je v plném rozsahu prováděna pomocí speciálních klappek. Funguje na principu dvojího průchodu vody přes lopatky (připomíná mlýnské kolo). Voda vtéká dovnitř kola přes lopatky a ven vytéká opět přes ně. Při každém průchodu udevzdá část své kinetické energie.

Turbína dosahuje účinnosti blížící se 90 %. Používají se v závislosti na velikosti pro spády od 5 do 60 metrů, v extrémních případech až do 200 metrů. Obvykle jsou navrhovány pro průtoky přibližně do  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a dosahují výkonů až 3 MW. [7]



Obrázek 4.16: Bánkiho turbína [13]

### 4.5 Malé vodní elektrárny v ČR

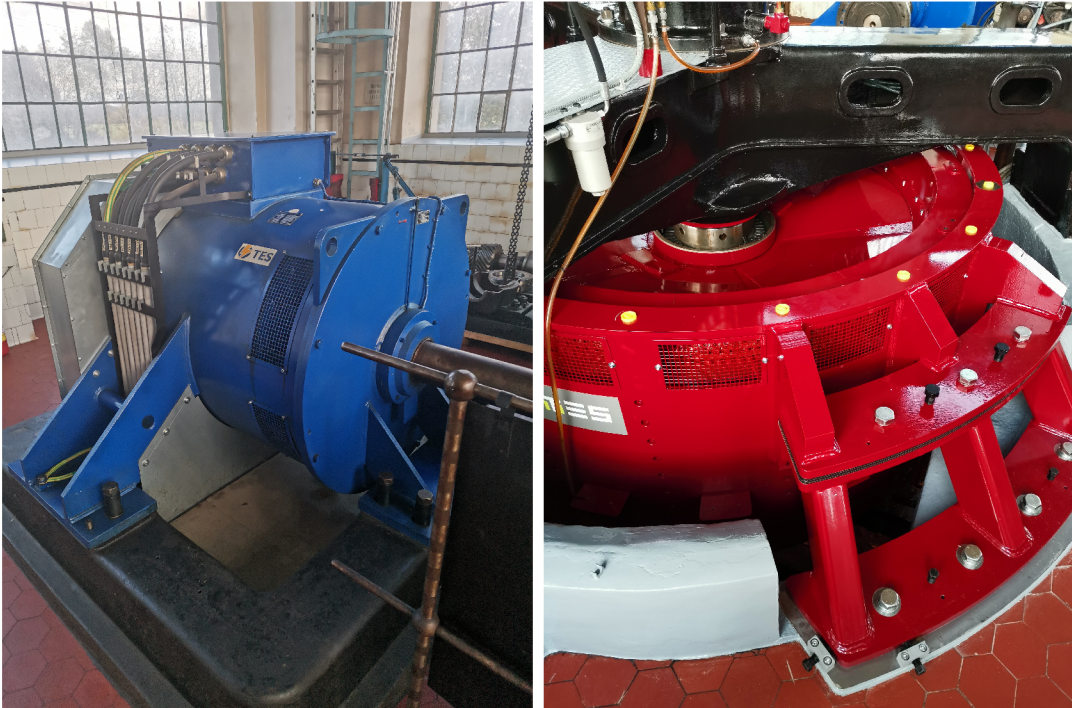
Česká republika je svými geografickými podmínkami velmi vhodná pro stavbu malých vodních elektráren (MVE). Za malou vodní elektrárnu považujeme dle [7] elektrárnu o instalovaném výkonu do 10 MW. V našich podmínkách je energetický potenciál řek necelých 3 400 GWh za rok, ovšem reálně využitých je přibližně 50 %. V roce 2016 byl celkový instalovaný výkon MVE na našem území 348 MW [14].

Tyto vodní elektrárny nejčastěji využívají Francisovy turbíny (Les Království, Hradec Králové), v některých případech turbíny Kaplanovy (Předměřice nad Labem) [6].

Příkladem je elektrárna v Albrechticích nad Orlicí. Jez byl dle [15] vybudován v letech 1922 až 1925 jako součást regulace Orlice. Stavba vodní elektrárny byla následně povolena roku 1925. Elektrárna se nachází na levém břehu v rozšířeném korytě. Vtok chrání 18 ocelových ledolamů, za kterými je umístěna ocelová mříž chránící turbíny.



V elektrárně se nachází tři Francisovy turbíny. Nad turbínami byla vybudována strojovna, kde se nachází převodové systémy a generátory. Celkový instalovaný výkon činí 425 kW, původní spád činil 2,63 m. Za více než 90 let provozu se změnila hydroenergetická parametry lokality, například spád se zvýšil o 45 cm. To vede majitele Ing. Jiřího Čápa k postupné rekonstrukci, kdy momentálně probíhá rekonstrukce druhého generátoru.



Obrázek 4.17: Starý (vlevo) a nový (vpravo) generátor MVE Albrechtice nad Orlicí [foto autora]

## 4.6 Velké vodní elektrárny v ČR

V našich podmínkách je poměrně omezená možnost výstavby velkých vodních elektráren (VE). Za VE považujeme elektrárnu o výkonu nad 10 MW. V České republice bylo takových elektráren v provozu k roku 2016 celkem devět. Jejich celkový instalovaný výkon dosahoval 753 MW. Největší z těchto elektráren je s instalovaným výkonem 364 MW VE Orlická nacházející se na řece Vltavě ve Středočeském kraji [14].

Vodní přehrada dle [6] vznikla v letech 1954 až 1961, kdy elektrárna také zahájila provoz. Zajímavé je, že kompletní investice do elektrárny vč. přehrady se za 4 roky provozu vrátila.

Elektrárna disponuje čtyřmi Kaplanovými turbínami určenými pro spád 70,5 m. V době svého uvedení byly využity turbíny desetilopátkové, dnes jsou již nahrazeny modernějšími osmilopátkovými koly s vyšší účinností. Jedná se o stěžejní vodní dílo vltavské kaskády, přehrada zadržuje až 720 milionů m<sup>3</sup> vody, což ji řadí na první



Obrázek 4.18: Vodní elektrárna Orlík [6]

místo mezi akumulacími nádržemi. Vodní plocha nádrže pokrývá celkem 26 km<sup>2</sup> a Vltavu vzdouvá v délce až 70 km [6].

Vodní plocha je zadržována gravitační betonovou hrází o výšce 91,5 m a délce 450 m. V rámci hráze jsou vybudovány tři přelivy schopné pojmout až stoletou vodu a také dvě výpustě o průměru 4 m. Samotná elektrárna je postavena u paty hráze. Voda je na Kaplanovy turbíny přiváděna čtyřmi potrubími o průměru 6,25 m. Vyrobená elektrická energie má napětí 15 kV a je transformována na 220 kV. Na plný výkon je elektrárna schopna naběhnout za 128 sekund, což ji zařazuje mezi nejvýznamější výrobce energie v rámci celorepublikové soustavy [6].



Obrázek 4.19: Strojovna vodní elektrárny Orlík [6]

## 4.7 Přečerpávací vodní elektrárny v ČR

Česká republika disponuje celkem čtyřmi přečerpávacími vodními elektrárnami (PVE), ovšem [14] uvádí, že pouze tři z nich (Dlouhé stráně, Dalešice a Štěchovice II) dosahují výkonu přes 10 MW. Celkově je výkon instalovaný v našich PVE 1 175 MW.



Princip fungování PVE je velmi jednoduchý. Využívá se dvou nádrží, kde při přebytku energie v síti (nejčastěji v noci) je voda čerpána z dolní do horní nádrže a při nedostatku energie je tomu naopak. Dochází tedy k uložení elektrické energie do potenciální energie vody. Celková účinnost PVE v rámci celého procesu uchování energie je asi 75 %. V dnešní době patří mezi velmi významné části energetické sítě, neboť uvedení do plného provozu trvá přibližně jednu minutu. To dokáže velmi spolehlivě vyrovnávat nestability v síti [14, 16].

Největší PVE u nás jsou Dlouhé stráně. Nachází se nedaleko Šumperka v Jeseníkách. Stavba započala roku 1978, následně byla po dvou letech pozastavena a k obnově stavby došlo po roce 1989. Dokončena byla roku 1996. Horní nádrž o objemu 2,72 milionů  $\text{m}^3$  se nachází v nadmořské výšce 1350 m., spodní s objemem 3,4 mil.  $\text{m}^3$  ve výšce 825 m.n.m. Výškový rozdíl hladin tedy činí 535 m [6].



Obrázek 4.20: Letecký pohled na PVE Dlouhé stráně [6]

Veškeré technologické vybavení elektrárny je umístěno ve skalní kaverně. Soustrojí nacházející se uvnitř se skládá ze dvou reverzních Francisových turbín o výkonu 325 MW. Jedná se o největší reverzní turbíny v Evropě. Současně se v podzemí nachází také komora transformátorů a samozřejmě dva příváděče délky přibližně 1,5 km. Kromě zmíněných objektů se v areálu elektrárny nachází také rozvodna,

budovy pro personál, objekt pro úpravu vody a čistírna odpadních vod [6].

## 4.8 Výhody vodních elektráren

- Energie vody je klasifikována jako obnovitelná, tedy nevyčerpatelná.
- Ekologický provoz, při kterém nedochází k žádné produkci skleníkových plynů.
- Obecně je jejich obsluha jednoduchá a časově minimálně náročná.
- Malé vodní elektrárny téměř nevytváří zaplavenou plochu.
- Zaplavenou plochu lze využít jako nádrž, případně pro chov ryb nebo rekreaci.
- Velmi rychlé uvedení do provozu (v řádu sekund), jsou tedy ideální pro vyrovnávání okamžitých výkyvů v síti.

## 4.9 Nevýhody vodních elektráren

- Stavba je finančně a časově velmi náročná. Obvykle také přináší zatopení obrovského území.
- Produkce elektřiny je značně ovlivněna počasím. V období sucha je průtok a tedy i výroba minimální.
- Jezy, hráze a elektrárny brání lodím v průjezdu. Je nutné stavět plavební komory, což je opět finančně náročné.
- V případě vojenského konfliktu jsou veškeré přehrady potenciálem obrovské katastrofy.
- Přehradní hráze brání migraci ryb, je nutné budovat speciální systém cest.



# Kapitola 5

## Solární elektrárny

Výroba energie ze slunečního záření patří mezi nejčistší a nejšetnější způsoby výroby energie. Jedná se o zdroj, kterého je v přírodě momentálně dostatek a v blízké budoucnosti nehrozí jeho vyčerpání. [6] uvádí, že na  $1 \text{ m}^2$  zemského povrchu dopadá každou sekundu přes 1000 J energie, která se částečně přemění na další formy energie (vítr, fotosyntéza nebo koloběh vody) a částečně dopadá ve formě slunečního záření na zemský povrch.

Energie slunce byla využívána již ve starověku, kdy v Číně využívali koncentrování slunečních paprsků pro vznik ohně. V minulosti lidé také stavěli obytné místnosti na jižních stranách domů, neboť jsou více vyhřívány. Využití sluneční energie napomohl také vynález tabulového skla a s tím související stavba skleníků pro efektivnější pěstování zeleniny [5].

Největší zlom ve výrobě elektřiny ze slunečního záření nastal po objevení fotoelektrického jevu v roce 1839, kdy byl teoreticky objeven princip dnešního fotovoltaického panelu. Vynalezení praktického využití trvalo více než 100 let, konkrétně do roku 1954. V tomto roce vyvinuli vědci Bell Laboratories první fotovoltaický článek na křemíkové bázi [6].

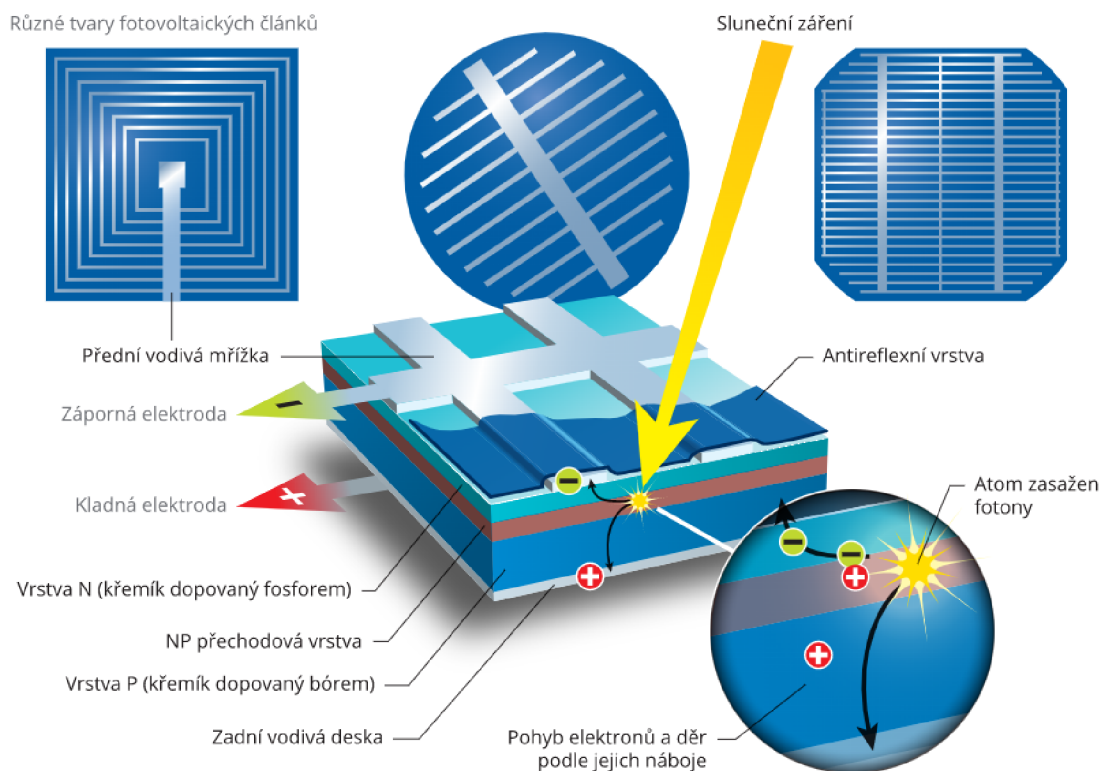
### 5.1 Princip fungování

Elektromagnetické záření dopadající na zemi se fotovoltaicky přeměňuje na energii elektrickou. K tomu se využívají fotovoltaické (PV) články. V dnešní době jsou nejběžnější články na bázi krystalického křemíku [17]. Princip si tedy vysvětlíme na nich.

Základ článku tvoří PN přechod. Spodní vrstva bývá nejčastěji tvořena křemíkem s příměsí prvku se třemi valenčními elektrony (např. B, Al, Ga), jedná se tedy polovodič typu P. Horní vrstva N je tvořena opět křemíkem, ovšem tentokrát s příměsí prvku, který má 5 valenčních elektronů (např. As, P, Sb) [17].

Fotovoltaický článek si lze dle [17] představit jako velkoplošnou diodu, kde dochází k přeměně energie dopadajícího záření na energii elektrickou. Fotony dopadající na PV článek generují páry elektron-díra, čímž odevzdají svou energii a pohlcují se.

Takto generované páry jsou od sebe elektrickým polem odděleny a urychleny. Díry ve směru pole, elektrony opačně. Díky tomu se mezi opačnými elektrodami článku objeví elektrické napětí a po zapojení článku do obvodu jím poteče stejnosměrný elektrický proud.



Obrázek 5.1: Princip práce fotovoltaického článku generujícího stejnosměrný elektrický proud [6]

## 5.2 Solární článek

Jak již bylo zmíněno, v dnešní době je pro konstrukci fotovoltaických článků nejvíce využíván křemík. Hlavním důvodem je jeho hojné zastoupení v zemské kůře. Výroba článků je také proto relativně levná. Další výhodou je bezesporu snadná dostupnost a žádná škodlivost vůči životnímu prostředí a organismům. Základem pro výrobu je křemenný písek, který je zpracováván redukcí uhlíkem v obloukové peci. Takto vyrobený surový křemík se následně zbaví příměsí a putuje na další chemické zpracování. Výsledkem chemických úprav jsou hrudky čistého křemíku. Ty jsou následně taveny a upravovány, čímž vzniknou polykrystalické nebo monokrystalické ingoty. Ingoty jsou následně příčně řezány na destičky, které tvoří základ PV článků. Posledním krok probíhá v difúzních pecích, kde dojde k přidání příměsí a vytvoření PN přechodu. Na takto vyrobený článek se ještě nanáší antireflexní vrstva minimalizující odraz záření [17].

Dle [6] jsou v současné době nejvíce rozšířené 3 druhy fotovoltaických článků. Tyto články se od sebe odlišují procesem výroby.

- Monokrystalický článek je specifický zejména výrobou monokrystalického ingotu, ze kterého se následně články řezou. Výroba probíhá tzv. Czochralskiho metodou. Do taveniny o teplotě přesahující 1400 °C je ponořen zárodek monokrystalu. Ten je pomalu vytahován a přitom je otáčen kolem osy. Tento proces musí probíhat za sníženého tlaku a v inertní atmosféře [17]. Tento článek je často tvaru čtverce nebo osmiúhelníku o rozměrech 156 × 156 mm. Barva tohoto článku bývá velmi tmavá až černá. Účinnost tohoto typu se pohybuje mezi 14 až 20 % [6].
- Polykrystalický článek se od monokrystalického liší procesem výroby ingotu. Výroba polykrystalického ingotu je jednodušší a levnější. Materiál je roztaven a nalit do formy, kde se ponechá velmi pomalu vychladnout, hlavně z důvodu vzniku možných vad, které jsou pochopitelně nežádoucí [17]. Článek je většinou čtvercového tvaru tmavé barvy s výraznými okraji. Vzhledem k jednodušší výrobě jsou tyto články také levnější, což má za důsledek jejich obrovské rozšíření a hojné využití. Účinnost těchto článků dosahuje 12 až 15 %. Jejich hlavní výhodou je lepší schopnost využití rozptýleného světla a také menší potřeba přesné jižní orientace [6].



Obrázek 5.2: Monokrystalický panel (vlevo) a polykrystalický panel (vpravo) [18]

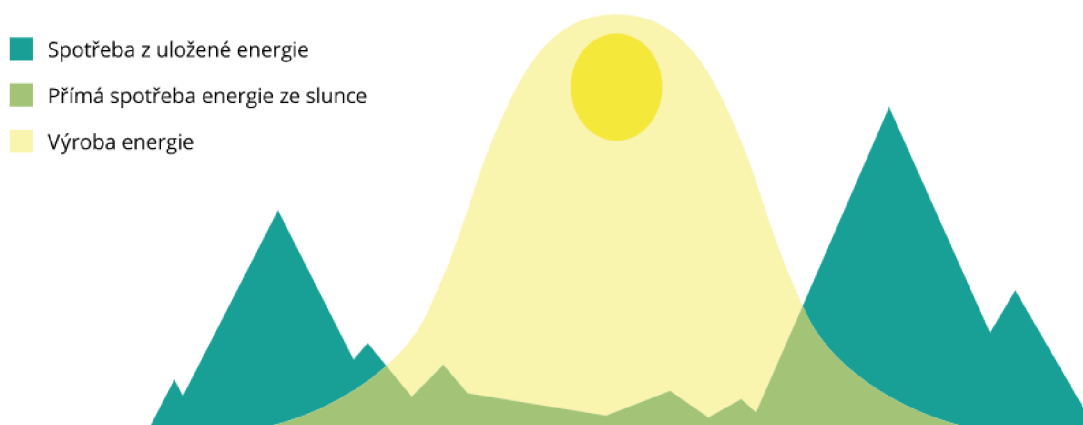
- Amorfní článek má odlišnou stavbu od předchozích dvou článků. Jejich základ tvoří vrstva fotocitlivého materiálu, která je napařena na vhodný podklad (např. sklo, plast). Tyto články jsou ze zmíněných nejlevnější na výrobu, neboť mají nižší spotřebu drahého materiálu. Jejich výhodou je možnost využití na střešní krytinu nebo hydroizolační pásy na rovné střechy. Také dobře pracují při horších světelných podmínkách. Na druhou stranu dosahují mnohem nižších účinností (přibližně 8 až 10 %). Je tedy potřeba zhruba dvojnásobná plocha oproti předchozím typům [17].

## 5.3 Solární panel

Napětí jednotlivých fotovoltaických článků je velmi malé (přibližně 0,6 V). Z toho důvodu se zapojují do série (pro zvýšení napětí), případně paralelně (pro zvýšení proudu). V praxi se tato zapojení kombinují, abychom dosáhli požadovaných hodnot napětí (obvykle 12 nebo 24 V). Dodávaný proud pak přímo odpovídá množství dopadajícího světla. Takto zapojené sestavě článků se říká fotovoltaický panel. Fotovoltaický panel se skládá ze 3 vrstev. Základem je nosná deska, na ní se nachází vrstva článků, která je kryta vhodně upraveným sklem. V dnešní době již mají panely standardizovanou velikost (1950 mm výška, 995 mm šířka) i výstupní napětí. Životnost se pohybuje okolo 30 let v závislosti na jejich odolnosti vůči poškození (mechanické, UV záření) [6].

## 5.4 Ukládání energie

Problémem využívání solární energie je nerovnoměrnost slunečního svitu ať už v průběhu dne, či v průběhu celého roku. Nejvíce energie se ze Slunce vyrobí během denního svitu, kdy je spotřeba energie (zejména u rodinných domů) minimální. Naopak v noci, kdy je energie potřeba nejvíce, fotovoltaika žádnou nevyrobí. Z toho důvodu je vhodné energii akumulovat v době přebytku a využít až v době nedostatku. V případě, že je dostupný vhodně dimenzovaný akumulární systém, klesá velmi výrazně spotřeba objektu z připojené distribuční sítě. Díky tomu lze v případě rodinných domů ušetřit nemalé množství financí. V případě, že bude dostatečná doba denního slunečního svitu může objekt pokrýt veškerou spotřebu elektrické energie pouze za využití fotovoltaické elektrárny a akumulárního systému.



Obrázek 5.3: Výroba a spotřeba elektrické energie v průběhu dne při instalaci fotovoltaické elektrárny s bateriovým úložištěm [6]

### 5.4.1 Kondenzátory

Jedná se úložiště minimálního významu. Kondenzátory s velkou kapacitou dokáží pojmout velmi malé množství energie. Přesto ale nachází využití. Příkladem jsou elektronická zařízení, kde se využívají pro uchování paměti v případě výpadku energie.

Kondenzátor dokáže pojmout energii

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad [\text{J}]$$

kde  $E$  je energie kondenzátoru,  $C$  je jeho kapacita a  $U$  napětí.

Pokud tedy máme kondenzátor na napětí 24 V o poměrně velké kapacitě  $C = 1,2 \text{ F}$ , pak dokáže pojmout přibližně 345 J. To je z pohledu využití energie například v domácnosti velmi málo. Proto se využívají úložiště se schopností uchovat mnohem větší množství energie [17].



Obrázek 5.4: Velkokapacitní kondenzátor  $C = 1,2 \text{ F}$ ,  $U = 2 \text{ V}$  [17]

### 5.4.2 Akumulátory

Nejčastějším úložištěm využívaným v dnešní době jsou dle [17] akumulátory. Během přebytku energie se elektrická energie mění v energii chemickou, v době nedostatku je tomu naopak. Příkladem je olověný akumulátor. Jeho základem jsou olověné elektrody uvolňující při procesu vybíjení elektrony. Tento typ baterií má ovšem řadu nevýhod, zejména kratší životnost, nutnost častější údržby a hlavně jejich velikost. Z toho důvodu byly nahrazeny novějšími lithium-ionovými (zkráceně Li-ion). Lithium-ionové baterie vyřešily množství nedostatků olověných (velikost, životnost, kapa-



cita). Mají ovšem vyšší pořizovací náklady, což se ovšem v porovnání s olovenými velmi brzy vrátí díky jejich výhodám.

### 5.4.3 Další možnosti ukládání energie

V případě, že výroba energie vysoko přesahuje možnosti uložení do akumulátorů (rozsáhlé fotovoltaické elektrárny), lze využít další možnosti uložení energie. Využití zde nalézají přečerpávací vodní elektrárny. Její princip jsem popsal v kapitole 4. Dále lze přebytečnou energii využít pro elektrolýzu vody, díky které se vyrábí vodík. Ten je dále využíván například jako palivo do raketových motorů a v budoucnu by mohl sloužit pro pohon proudových letadel. Z hlediska životního prostředí se jedná o jednu z možných cest boje proti změnám klimatu [17].

## 5.5 Využití fotovoltaiky

Fotovoltaické elektrárny patří v dnešní době mezi velmi populární. Hlavní podíl na tom má vysoká cena energií a relativně nízká pořizovací cena elektrárny. Například v roce 2022 bylo dle [19] připojeno 9354 elektráren. V porovnání s rokem 2021 se jednalo o nárůst o téměř 200 %. Výrazný nárůst nastal také u akumulace energie, kdy je téměř 9 z 10 nových elektráren doplněno o bateriový systém. Tento trend pokračuje dále, ovšem v některých oblastech nastává problém s připojením elektrárny k rozvodné síti. Hlavním důvodem je nestálá výroba elektřiny, což musí výrobci kompenzovat.

Ke konci prvního pololetí bylo v České republice instalováno celkem 60 229 fotovoltaických elektráren o celkovém maximálním výkonu 2 225,7 MW. Celková kapacita akumulačních systémů činila 209,5 MWh [19].

Aktuálně jsou solární elektrárny stále velmi intenzivně stavěny, nejvíce na rodinných domech. Velmi často se také setkáváme s elektrárnami na střechách skladovacích hal, průmyslových, či sportovních areálů.



Obrázek 5.5: Solární panely na rodinném domě [6]

## 5.6 Výhody solárních elektráren

- Proces výroby a ukládání energie nemá žádný negativní vliv na životní prostředí.
- Neprodukuje žádný hluk.
- V případě instalace na domy nezabírá žádnou půdu, využívá místa (střechy), která by jinak využití nenašla.
- Samotná elektrárna je velmi levná (nejdražší jsou bateriové systémy).

## 5.7 Nevýhody solárních elektráren

- Solární panely nejsou zcela ekologické, zejména proces likvidace.
- V případě instalace na ornou půdu zabírají značné množství místa.
- Nestálá výroba kolísající v závislosti na denním svitu.
- Poměrně malá účinnost pohybují se okolo 10 až 15 %.

# Kapitola 6

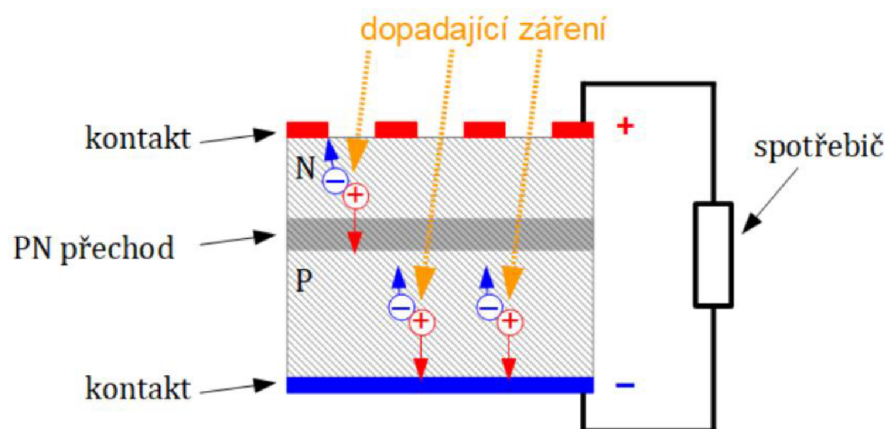
## Praktická část

### 6.1 Úloha č. 1 - Měření výkonu nezatíženého solárního panelu v závislosti na intenzitě ozáření.

**Úkol:** Proměřte závislost proudu a napětí nezatíženého solárního panelu na intenzitě ozáření. Vypočtete výkon solárního panelu v různých vzdálenostech od zdroje záření. Sestrojte graf závislosti výkonu na vzdálenosti od zdroje záření.

**Teorie:** Fotočlánek je polovodičová součástka. Slouží k přeměně energie dopadajícího slunečního záření na energii elektrickou. Fotočlánek tvoří dva polovodiče s různými příměsemi, díky kterým vznikne PN přechod. Ke každému polovodiči jsou následně připojeny kontakty.

Dopadající záření (fotony) předá svou energii polovodičům, kde vznikají volné páry elektron-díra. V polovodičích opačné polarity vzniká v důsledku rozdílu potenciálů napětí. V případě, že připojíme spotřebič, začne obvodem protékat proud [17, 20].



Obrázek 6.1: Princip fotočlánku [20]

Fotočlánek bývá charakterizován řadou veličin. Základními jsou proud nakrátko  $I_{SC}$  (v obvodu, kde dochází ke zkratu) a napětí naprázdno  $U_{OC}$  (v obvodu, kde neteče proud, tedy když je zapojen nekonečně velký odpor). Tyto veličiny nejsou pro



všechny články stejné. Jsou značně ovlivněny například stářím článku, intenzitou dopadajícího záření, či teplotou [20].

Sluneční záření do prostoru přenáší zářivou energii  $Q_e$ . Vzhledem k vyjádření přenesené energie za jednotku času se zavádí jednotka zářivý tok  $\Phi_e$ . Jednotkou je vzhledem k definici 1 watt.

Zářivost zdroje bude definována jako podíl zářivého toku  $\phi_e$  vyslaného zdrojem do malého úhlu  $d\omega$  a tohoto úhlu

$$I_e = \frac{d\phi_e}{d\omega} \quad [\text{cd}]$$

Následně definujeme intenzitu ozáření  $E_e$  jako

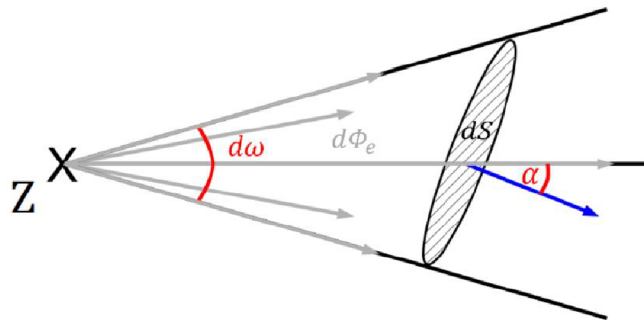
$$E_e = \frac{d\phi_e}{dS} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$$

kde  $d\phi_e$  je zářivý tok a  $dS$  plocha, na kterou záření dopadá.

Existuje vztah mezi intenzitou ozáření a zářivostí zdroje

$$E_e = \frac{I_e}{d^2} \cdot \cos \alpha \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (6.1)$$

kde  $\alpha$  je úhel, jenž svírá normála plochy  $dS$  a dopadající záření,  $d$  je vzdálenost této plochy od zdroje.



Obrázek 6.2: Objasnění radiometrických veličin [20]

Vzhledem k tomu, že nebudeme měřit přímo intenzitu ozáření  $E_e$ , ale budeme měřit intenzitu osvětlení  $E$  za využití luxmetru, je třeba zmínit vztah pro přepočtení intenzity osvětlení  $E$  na intenzitu ozáření  $E_e$ .

Pro přepočtení využijeme převodní vztah dle [21]:

$$1 \text{ lx} = 0,0079 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (6.2)$$

V našem případě budeme pracovat se solárním panelem. Jedná se o sestavu solárních článků vhodně zapojených do série, případně paralelně pro dosažení požadovaných parametrů.

Výkon solárního panelu nebudeme měřit přímo, ale vypočteme ho z naměřených hodnot proudu a napětí vztahem:

$$P = U \cdot I \quad [\text{W}] \quad (6.3)$$

kde  $P$  je výkon solárního panelu,  $U$  je jeho napětí a  $I$  jeho proud.

**Pomůcky:** Digitální multimetr METEX M 3890D, zdroj světla, solární panel (parametry viz příloha), metr, luxmetr VOLTcraft MS-1300.



Obrázek 6.3: Luxmetr VOLTcraft MS-1300 [foto autora]



Obrázek 6.4: Multimetr METEX M 3890D a solární panel využité pro měření [foto autora]

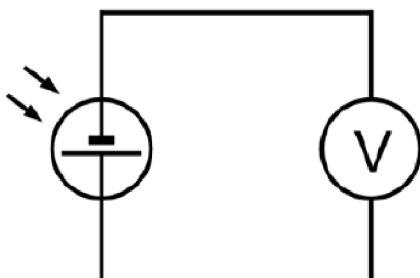
### Postup měření:

1. Proměřte závislost intenzity ozáření na vzdálenosti. Měření provádějte kolmo ke zdroji. Výsledky měření zanepte do následující tabulky 6.1. Hodnotu  $E_e$  dopočítejte pomocí vztahu 6.2. Nezapomeňte také změřit intenzitu osvětlení v místnosti (přirozená intenzita osvětlení).

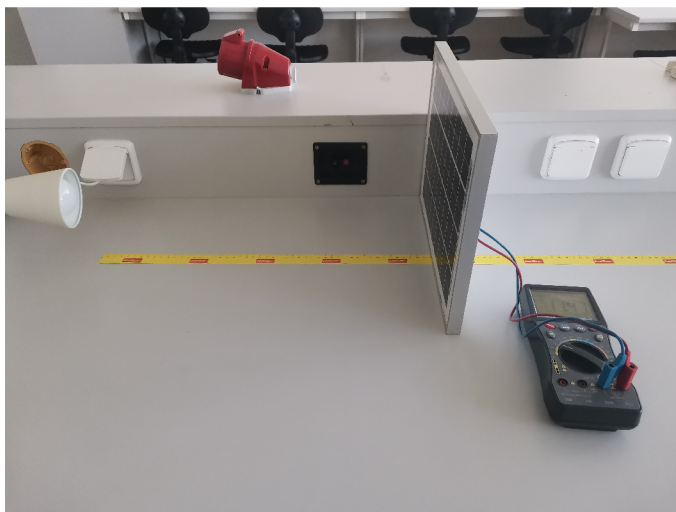
$d$ [cm]	$E$ [lx]	$E_e$ [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
10		
20		
...		
100		

Tabulka 6.1: Tabulka pro zpracování hodnot měření intenzity ozáření

- Proměřte proud nakrátko a napětí naprázdno nezatíženého solárního panelu v různých vzdálenostech od zdroje. Vypočtete pomocí vztahu 6.3 výkon solárního panelu. Panel nastavte kolmo ke zdroji. Výsledky měření zanepte do tabulky 6.2.



Obrázek 6.5: Obvod pro určení napětí naprázdno a proudu nakrátko [22]



Obrázek 6.6: Obvod pro určení napětí naprázdno a proudu nakrátko [foto autora]

Využité pro toto měření mají vnitřní odpor  $10 \text{ M}\Omega$ . Díky velkému vnitřnímu odporu je lze využít pro měření napětí naprázdno, jsou ale vhodné také pro měření proudu nakrátko.

$d$ [cm]	$U$ [V]	$I$ [mA]	$P$ [mW]
10			
20			
...			
100			

Tabulka 6.2: Tabulka pro zpracování hodnot měření proudu a napětí a výpočet výkonu

3. Vyneste graf závislosti výkonu nezatíženého panelu na vzdálenosti od zdroje. Graf proložte mocninou funkcí, následně v grafu zobrazte rovnici spojnice trendu. Do závěru uveďte, zda rovnice přibližně odpovídá teoretickému předpokladu (vztah 6.4).

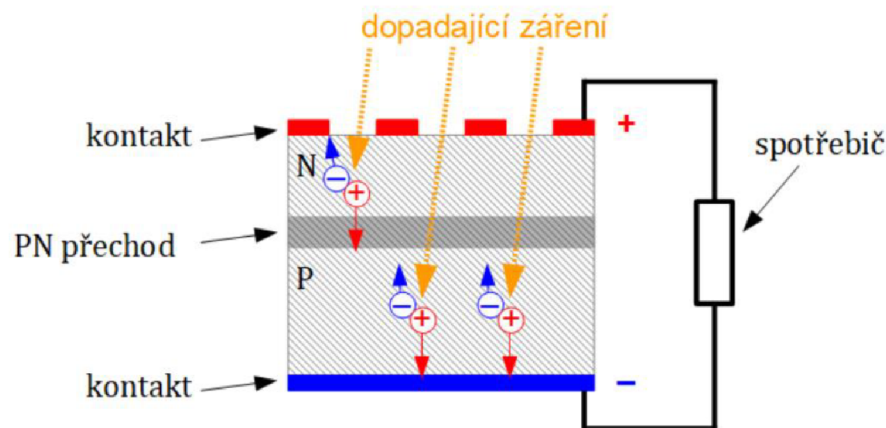
**Závěr:** Uveďte, jak se se vzdáleností mění napětí, proud a výkon solárního panelu. Odpovídají naměřené hodnoty teoretickým předpokladům? Kde mohlo dojít k chybám měření?

## 6.2 Úloha č. 2 - Měření výkonu nezatíženého solárního panelu v závislosti na úhlu, pod kterým dopadá záření

**Úkol:** Proměřte závislost proudu a napětí nezatíženého solárního panelu na úhlu, pod kterým dopadá záření při konstantním osvětlení. Vypočtete výkon nezatíženého solárního panelu.

**Teorie:** Fotočlánek je polovodičová součástka. Slouží k přeměně energie dopadajícího slunečního záření na energii elektrickou. Fotočlánek tvoří dva polovodiče s různými příměsemi, díky kterým vznikne PN přechod. Ke každému polovodiči jsou následně připojeny kontakty.

Dopadající záření (fotony) předá svou energii polovodičům, kde vznikají volné páry elektron-díra. V polovodičích opačné polaritě vzniká v důsledku rozdílu potenciálů napětí. V případě, že připojíme spotřebič, začne obvodem protékat proud [17, 20].



Obrázek 6.7: Princip fotočlánku [20]

Fotočlánek bývá charakterizován řadou veličin. Základními jsou proud nakrátko  $I_{SC}$  (v obvodu, kde dochází ke zkratu) a napětí naprázdno  $U_{OC}$  (v obvodu, kde neteče proud, tedy když je zapojen nekonečně velký odpor). Tyto veličiny nejsou pro všechny články stejné. Jsou značně ovlivněny například stářím článku, intenzitou dopadajícího záření, či teplotou [20].

Sluneční záření do prostoru přenáší zářivou energii  $Q_e$ . Vzhledem k vyjádření přenesené energie za jednotku času se zavádí jednotka zářivý tok  $\Phi_e$ . Jednotkou je vzhledem k definici 1 watt.

Zářivost zdroje bude definována jako podíl zářivého toku  $\phi_e$  vyslaného zdrojem do malého úhlu  $d\omega$  a tohoto úhlu

$$I_e = \frac{d\phi_e}{d\omega} \quad [\text{cd}]$$

Následně definujeme intenzitu ozáření  $E_e$  jako

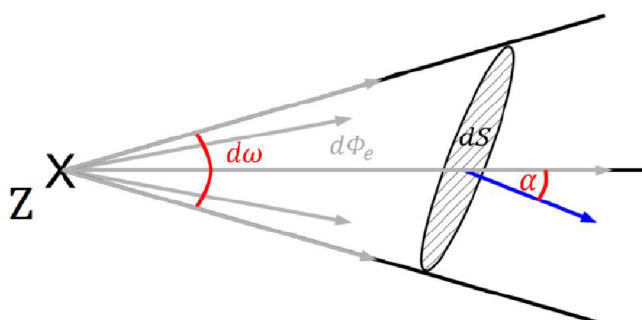
$$E_e = \frac{d\phi_e}{dS} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$$

kde  $d\phi_e$  je zářivý tok a  $dS$  plocha, na kterou záření dopadá.

Existuje vztah mezi intenzitou ozáření a zářivostí zdroje

$$E_e = \frac{I_e}{d^2} \cdot \cos \alpha \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (6.4)$$

kde  $\alpha$  je úhel, jenž svírá normála plochy  $dS$  a dopadající záření,  $d$  je vzdálenost této plochy od zdroje.



Obrázek 6.8: Objasnění radiometrických veličin [20]

Vzhledem k tomu, že nebudeme měřit přímo intenzitu ozáření  $E_e$ , ale budeme měřit intenzitu osvětlení  $E$  za využití luxmetru, je třeba zmínit vztah pro přepočtení intenzity osvětlení  $E$  na intenzitu ozáření  $E_e$ .

Pro přepočtení využijeme převodní vztah dle [21]:

$$1 \text{ lx} = 0,0079 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (6.5)$$

V našem případě budeme pracovat se solárním panelem. Jedná se o sestavu solárních článků vhodně zapojených do série, případně paralelně pro dosažení požadovaných parametrů.

Výkon solárního panelu nebudeme měřit přímo, ale vypočteme ho z naměřených hodnot proudu a napětí vztahem:

$$P = U \cdot I \quad [\text{W}] \quad (6.6)$$

kde  $P$  je výkon solárního panelu,  $U$  je jeho napětí a  $I$  jeho proud.

**Pomůcky:** Digitální multimetr METEX M 3890D, zdroj světla, solární panel (parametry viz příloha), metr, luxmetr VOLTcraft MS-1300, úhломěr.





Obrázek 6.9: Luxmetr VOLTcraft MS-1300 [foto autora]



Obrázek 6.10: Multimetr METEX M 3890D a solární panel využitý pro měření [foto autora]

### Postup měření:

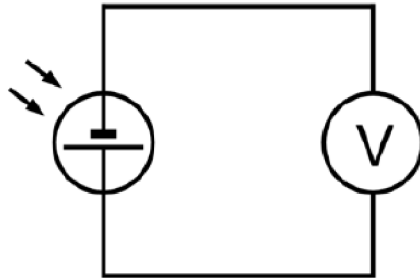
1. Proměřte závislost intenzity ozáření na vzdálenosti. Výsledky měření zanepte do následující tabulky 6.3. Hodnotu  $E_e$  dopočítejte pomocí vztahu 6.5. Nezapomeňte také změřit intenzitu osvětlení v místnosti (přirozená intenzita osvětlení).

$d$ [cm]	$E$ [lx]	$E_e$ [ $W \cdot m^{-2}$ ]
10		
20		
...		
100		

Tabulka 6.3: Tabulka pro zpracování hodnot měření intenzity ozáření

2. Proměřte proud nakrátko a napětí naprázdno nezatíženého solárního panelu v různých vzdálenostech od zdroje (25 cm, 50 cm, 75 cm, 100 cm) při měnícím se úhlu, pod kterým dopadá záření. Vypočítejte pomocí vztahu 6.6 výkon solárního

panelu. Výsledky měření zaneste do tabulky 6.4.



Obrázek 6.11: Obvod pro určení napětí naprázdno a proudu nakrátko [22]



Obrázek 6.12: Zapojení panelu a měření úhlu naklonění panelu vzhledem ke zdroji [foto autora]

Vzhledem k tomu, že multimetry využitě pro toto měření mají odpor  $10\text{ M}\Omega$ , lze je využít i jako ampérmetry. Obvod pro měření proudu nakrátko tedy bude stejný, pouze přepneme multimetr na měření proudu.

$\alpha$ [°]	$U$ [V]	$I$ [mA]	$P$ [mW]
0			
15			
...			
90			

Tabulka 6.4: Tabulka pro zpracování hodnot měření výkonu článku pro různé úhly

- Sestrojte graf závislosti výkonu solárního panelu v závislosti na úhlu, pod kterým dopadá záření. Do závěru uveďte, zda naměřené hodnoty odpovídají teoretickým předpokladům.

**Závěr:** Uveďte, jak se s úhlem (podle jaké funkce) mění výkon solárního článku. Odpovídají přibližně naměřené hodnoty teoretickým předpokladům? Kde mohlo dojít k chybám měření?



## 6.3 Úloha č. 3 - Výpočet energie vyrobené vodní elektrárnou v různých částech roku.

**Úkol:** Navrhněte optimální provoz generátorů (které budou spuštěny). Vypočtěte, kolik energie vyrobí MVE Albrechtice při různých průtocích vody během jednoho dne všech 3 zmíněných období.

**Zadání:** MVE Albrechtice má instalovány tři Francisovy turbíny, které mají stejný spád 2,63 m. Výkon turbín souvisí s jejich hltností. První turbína dosahuje výkonu 105 kW a její hltnost je až  $7,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Druhá a třetí turbína dosahují shodně výkonů 160 kW a mají vyšší hltnost  $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Průměrný roční dlouhodobý průtok činí  $19,154 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . V suchých letních měsících dosahuje průměrný průtok pouze  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . V období dešťů (jarní měsíce, ne- uvažujeme extrémní počasí) dosahuje průtok přibližně průměru  $35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Uvažujeme efektivitu celého výrobního procesu 75 %.

V praxi bývá turbína spuštěna pouze pokud je překročeno alespoň 50 % její hltnosti. Uvažujte i s tímto případem.

Pro výpočty uvažujeme hustotu vody  $\rho = 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

**Určete a vypočtěte:**

- Které turbíny je vhodné v každém období spustit, aby byl pokryt minimální potřebný průtok? Budou turbíny pracovat na plný výkon?
- Vypočtěte množství vyrobené energie za 1 den (24 hodin) ve výše zmíněných obdobích (celoroční průměr, období sucha, období dešťů).
- Pro každé ze tří zmíněných období určete, jak dlouho by energie vyrobená za 1 den stačila pro účely sportovního areálu (zimního stadionu) o spotřebě 2,5 MWh za den.

### Nápověda k úloze č. 3:

**Na jakém principu funguje vodní elektrárna?**

Vodní elektrárna přeměňuje potenciální energii vody na energii elektrickou.

**Jaký je vztah pro výpočet potenciální energie protékající vody?**

Potenciální energie je dána vztahem:

$$E_p = mgh \quad [\text{J}]$$

kde  $m$  je hmotnost vody,  $g$  je tíhové zrychlení a  $h$  je výškový rozdíl hladin.

**Jak lze vypočítat hmotnost?**

Hmotnost lze vypočítat za využití vzorce pro hustotu:

$$m = \rho V \quad [\text{kg}]$$

kde  $V$  je objem protékající vody a  $\rho$  je její hustota.

**Jak lze vypočítat objem?**

Objem vody, která proteče elektrárnou lze určit jako množství vody, které protéká po určitou dobu. V našem případě využijeme objemového průtoku:

$$V = Qt \quad [\text{m}^3]$$

kde  $Q$  je objemový průtok vody a  $t$  je čas.

**Dochází ke ztrátám energie?**

Ano, dochází, elektrárna pracuje s určitou účinností. Část potenciální energie vody se v elektrárně přemění na jiné formy energie, než je elektrická. Vyrobená elektrická energie tedy bude:

$$E = E_p \eta \quad [\text{J}]$$

kde  $E_p$  je potenciální energie vody a  $\eta$  je účinnost elektrárny.

## 6.4 Úloha č. 4 - Výpočet výkonu vodní elektrárny při změně parametrů.

**Úkol:** Určete, jak se změní výkon MVE Albrechtice, pokud se změní spád, výkon turbín, jejich hltnost a efektivita výrobního procesu.

**Zadání:** MVE Albrechtice má instalovaný výkon  $1 \times 105$  kW a  $2 \times 160$  kW při spádu 2,63 m, celkové hltnosti  $31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Efektivitu celého procesu uvažujme 75 %. Pro účely našich výpočtů budeme uvažovat průtok MVE větší, než  $31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , tedy všechny turbíny pracují na plný výkon.

Pro výpočty uvažujme hustotu vody  $\rho = 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

**Určete:**

- Maximální možný výkon elektrárny (odvoďte vztah pro výpočet výkonu ze zadaných údajů). Odpovídá vypočtená hodnota skutečnosti? Pokuste se zdůvodnit.
- Jak by se změnil výkon, pokud bychom zvýšili spád na 5 m a dosáhli účinnosti výrobního procesu 85 %.
- Výkon elektrárny, pokud bychom měli v provozu pouze dvě turbíny o spádu 12 m a celkové hltnosti  $24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Efektivitu procesu výroby elektřiny uvažujme 80 %.
- Pro předchozí případy určete, kolika rodinným domům o průměrné spotřebě 1,5 kW je tato elektrárna schopna dodávat energii.

#### Nápověda k úloze č. 4:

#### Na jakém principu funguje vodní elektrárna?

Vodní elektrárna přeměňuje potenciální energii vody na energii elektrickou.

#### Jak se vypočítá výkon?

Výkon se vypočítá:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{E}{t} \quad [\text{W}]$$

kde  $t$  značí čas a  $W$  stejně jako  $E$  značí energii.

#### Jaký je vztah pro výpočet potenciální energie protékající vody?

Potenciální energie je dána vztahem:

$$E_p = mgh \quad [\text{J}]$$

kde  $m$  je hmotnost vody,  $g$  je tíhové zrychlení a  $h$  je výškový rozdíl hladin.

#### Jak lze vypočítat hmotnost?

Hmotnost lze vypočítat za využití vzorce pro hustotu:

$$m = \rho V \quad [\text{kg}]$$

kde  $V$  je objem protékající vody a  $\rho$  je její hustota.

#### Jak lze vypočítat objem?

Objem vody, která proteče elektrárnou lze určit jako množství vody, které protéká po určitou dobu. V našem případě využijeme objemového průtoku:

$$V = Qt \quad [\text{m}^3]$$

kde  $Q$  je objemový průtok vody a  $t$  je čas.

#### Dochází ke ztrátám energie?

Ano, dochází, elektrárna pracuje s určitou účinností. Část potenciální energie vody se v elektrárně přemění na jiné formy energie, než je elektrická. Vyrobená elektrická energie tedy bude:

$$E = E_p \eta \quad [\text{J}]$$

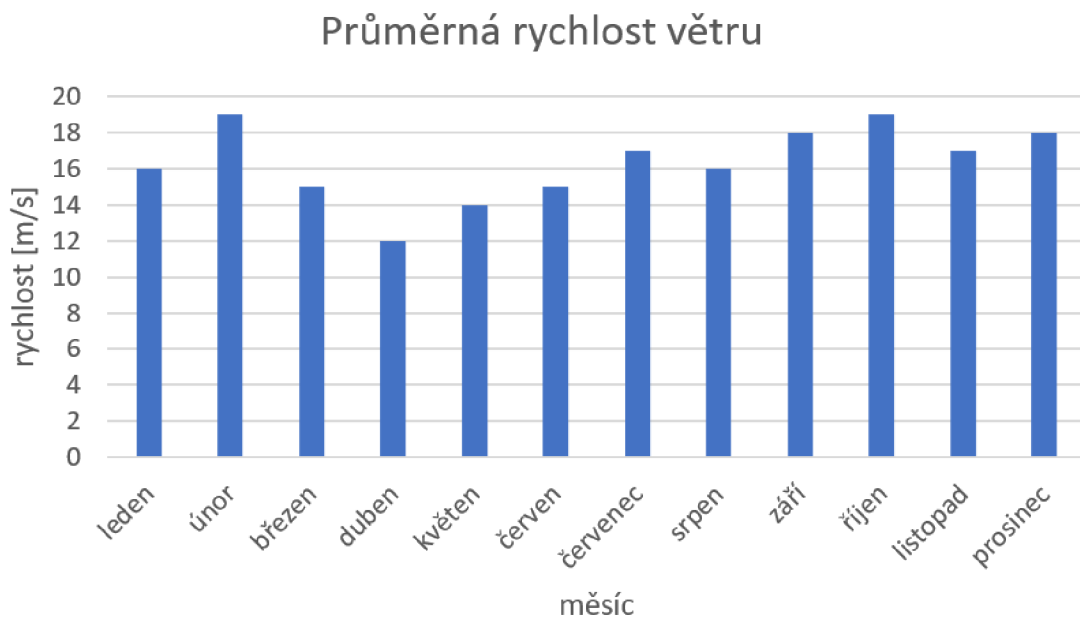
kde  $E_p$  je potenciální energie vody a  $\eta$  je účinnost elektrárny.

## 6.5 Úloha č. 5 - Výpočet výkonu větrné elektrárny.

**Úkol:** Vypočítejte výkon větrné elektrárny a cenu takto vyrobené elektrické energie.

**Zadání:** Délka jednoho listu větrné elektrárny je 35 m, průměrné rychlosti větru v měsících zobrazuje graf. 1 kWh elektrické energie se prodává za 7 Kč. Při procesu výroby elektrické energie také dochází ke ztrátám, pro výpočty uvažujte účinnost elektrárny 65 %.

Pro výpočty uvažujte změnu rychlosti větru za okamžitý děj, hodnotu součinitele odporu  $c_p = 0,5$ . Potřebné údaje odečtete z grafu.



Obrázek 6.13: Graf závislosti průměrné rychlosti větru na měsíci

**Určete:**

- Výkon elektrárny v jednotlivých měsících.
- Výkon elektrárny v libovolném měsíci pro případ, že by byl součinitel odporu  $c_p = 0,59$  a účinnost převodu mechanické energie na elektrickou by byla 100 % (dosáhli bychom maximální možné účinnosti).
- Kolik Kč bychom získali z provozu této elektrárny v únoru, dubnu a listopadu? Uvažujte parametry ze zadání.  
Pozn.: únor má 28 dní, duben 30 dní a listopad 30 dní.

## Nápověda k úloze č. 5:

### Na jakém principu funguje větrná elektrárna?

Větrná elektrárna přeměňuje kinetickou energii větru na energii elektrickou. Využívá zpomalení proudícího vzduchu.

### Jak se vypočítá výkon?

$$P = \frac{W}{t} = \frac{E}{t} \quad [\text{W}]$$

kde  $t$  značí čas a  $W$  stejně jako  $E$  značí energii.

### Jak se vypočítá kinetická energie větru?

Kinetická energie větru se určí pomocí vztahu

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad [\text{J}]$$

kde  $E_k$  značí celkovou kinetickou energii větru,  $m$  je hmotnost proudícího vzduchu a  $v$  je jeho rychlost.

### Jak se hmotnost proudícího vzduchu?

Hmotnost lze vypočítat za využití vzorce pro hustotu:

$$m = \rho V \quad [\text{kg}]$$

kde  $V$  je objem proudícího vzduchu a  $\rho$  je jeho hustota.

### Jak lze určit objem proudícího vzduchu?

Objem proudícího vzduchu  $V$  je možné upravit za využití vztahu:

$$V = Svt \quad [\text{m}^3]$$

kde  $S$  je plocha větru,  $t$  značí čas, po který děj probíhá a  $v$  je rychlost proudění.

### Využije se veškerá kinetická energie proudícího vzduchu?

Nevyužije, elektrárna proudění pouze zpomalí. Tuto skutečnost zohledňuje součinitel odporu  $c_p$ , který nám říká, jaká část energie se využije. Celková využitá energie proudění se vypočte:

$$E_c = E_k c_p \quad [\text{J}]$$

kde  $E_k$  značí kinetickou energii větru a  $c_p$  je součinitel odporu.

**Dochází ke ztrátám energie v rámci procesu přeměna energií?**

Ano, dochází. V elektrárně se část energie přemění na teplo, případně další formy energií. Elektrárna tedy pracuje s určitou účinností. Vyrobená energie se vypočte:

$$E_v = E_c \eta \quad [\text{J}]$$

kde  $E_c$  značí celkovou využitou energii proudění a  $\eta$  značí účinnost elektrárny.

## 6.6 Řešení úloh

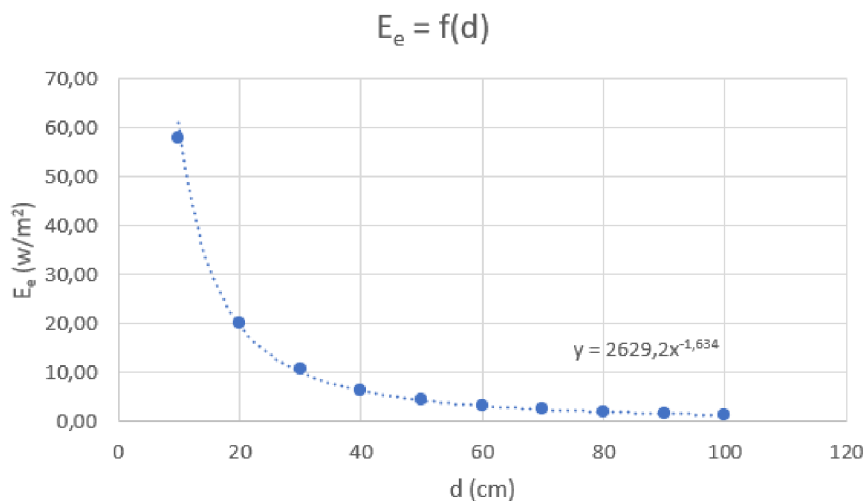
### 6.6.1 Řešení úlohy č. 1

Nejprve jsme změřili hodnotu osvětlení v místnosti. I když jsme místnost co nejvíce zatemnili, bylo osvětlení v místnosti  $E = 4$  lx. Dále jsme pomocí luxmetru měřili osvětlení v jednotlivých vzdálenostech od zdroje.

$d$ [cm]	$E$ [lx]	$E_e$ [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
10	7340	57,99
20	2530	19,99
30	1381	10,91
40	820	6,48
50	561	4,43
60	409	3,23
70	317	2,50
80	252	1,99
90	214	1,69
100	177	1,40

Tabulka 6.5: Naměřené hodnoty osvětlení a vypočtené hodnoty intenzity ozáření

Pro zajímavost přikládáme graf závislosti intenzity ozáření  $E_e$  na vzdálenosti  $d$



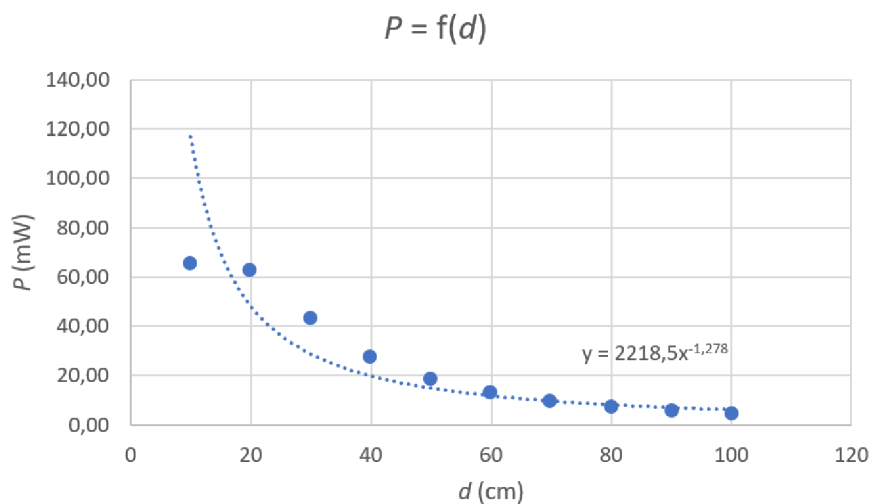
Obrázek 6.14: Graf závislosti intenzity ozáření na vzdálenosti

Z grafu je dobře vidět, že intenzita ozáření klesá přibližně s druhou mocninou vzdálenosti, lze tedy říci, že vztah 6.4 odpovídá naměřeným hodnotám ( $\cos(\alpha)$  neuvážujeme, neboť měříme kolmo ke zdroji, jeho hodnota je tedy rovna 1). Vznik možných chyb je diskutován v závěru.



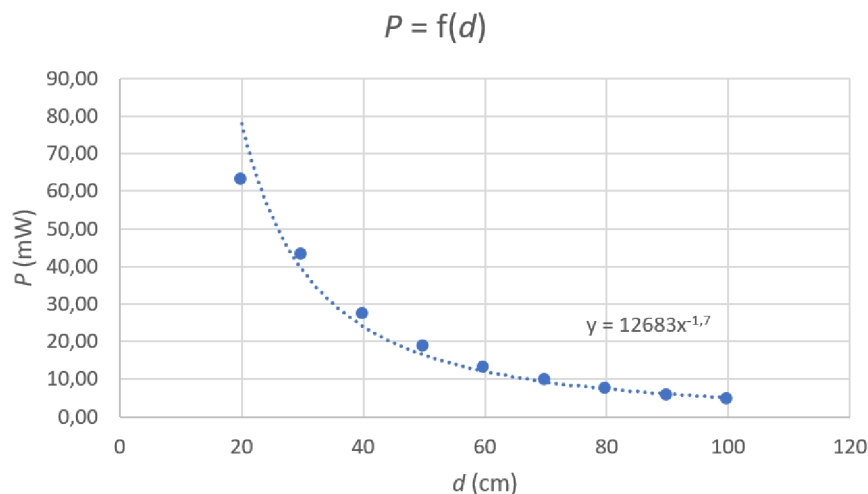
$d$ [cm]	$U$ [V]	$I$ [mA]	$P$ [mW]
10	17	3,86	65,62
20	16,22	3,88	62,93
30	15,16	2,82	42,75
40	14,13	1,94	27,41
50	13,2	1,4	18,48
60	12,38	1,04	12,88
70	11,66	0,82	9,56
80	11,05	0,66	7,29
90	10,49	0,54	5,66
100	9,96	0,44	4,38

Tabulka 6.6: Tabulka pro zpracování hodnot měření proudu a napětí a výpočet výkonu



Obrázek 6.15: Graf závislosti výkonu solárního panelu na vzdálenosti

Z grafu je patrná závislost mající klesající charakter. První hodnota měření je zřejmě zkreslená, pro zpracování a určení mocniny v předpisu spojnice trendu ji proto vynecháme. V závěru provedeme diskusi vzniku takovéto chyby.



Obrázek 6.16: Graf závislosti výkonu solárního panelu na vzdálenosti

Upravený graf (bez první hodnoty) již poměrně přesně odpovídá spojnici trendu. Z předpisu lze určit mocninu u  $x$ . Její hodnota je  $-1,7$ . Teoretický předpoklad udává hodnotu  $-2$ . Vznik chyb opět diskutujeme v závěru.

**Závěr:** Provedli jsme měření závislosti výkonu na vzdálenosti od zdroje záření. Jako zdroj jsme použili LED žárovku. Nejednalo se tedy o ideální zdroj. V rámci měření jsme také zjišťovali závislost intenzity ozáření na vzdálenosti od zdroje záření. První částí byla závislost intenzity ozáření na vzdálenosti. V tomto měření jsme dostali rovnici spojnice trendu:

$$y = 2629,2x^{-1,634}$$

Teoretický předpoklad (vztah 6.4) udává hodnotu exponentu  $-2$ . Námí naměřená hodnota se této hodnotě blíží, lze tedy měření považovat za přesné. Největších chyb jsme se mohli dopustit při měření vzdálenosti, neboť měříme nad metrem. Vzdálenost tedy nedostaneme s maximální přesností. Také samotný odečet z luxmetru může zkreslovat. Nemusí se nám podařit držet luxmetr kolmo ke zdroji, případně s ním můžeme lehce pohnout. Navíc hodnoty osvětlení jsou kolísavé, takže zapisujeme „střední“ hodnotu měření.

V rámci měření výkonu nezatíženého solárního panelu jsme potvrdili předchozí hypotézu. Také hodnota výkonu klesá přibližně s druhou mocninou vzdálenosti. V případě, že jsme zahrnuli veškeré hodnoty bylo měření zkreslené první nepřesnou hodnotou. Po jejím vynechání nám vyšla hodnota exponentu  $-1,7$ . Z těchto důvodů považujeme měření za úspěšně provedené. Největší chyba, kvůli které jsme museli vynechat první hodnotu nastala kvůli zdroji. My jsme využili LED žárovku, což je v podstatě bodový zdroj. Panel je ale navrhován pro zdroj v nekonečnu, který ho rovnoměrně osvětluje. Zdroj v malé blízkosti panelu tedy měření zkresluje a dochází ke vzniku chyb.

[23] uvádí, že k nalezení vhodné funkční závislosti lze využít jak funkci polynomic-kou (vhodného stupně), tak například funkci logaritmickou. V našem případě jsme vycházeli z teoretického předpokladu, který využívá funkci mocninou. V případě vypracovávání této laboratorní úlohy se studenty by tato problematika rozhodně byla vhodným námětem do diskuse. Zejména z důvodu prohloubení jejich zkušeností s regresní analýzou.

Na závěr uvedeme, proč výkon solárního panelu neodpovídá jeho parametrům. Primárním důvodem je intenzita ozáření. Panel je navrhován pro hodnotu  $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ . My této hodnoty v žádném případě nedosahujeme. Samozřejmě také došlo k chybám měření, ovšem v případě výkonu panelu to hlavním důvodem není.

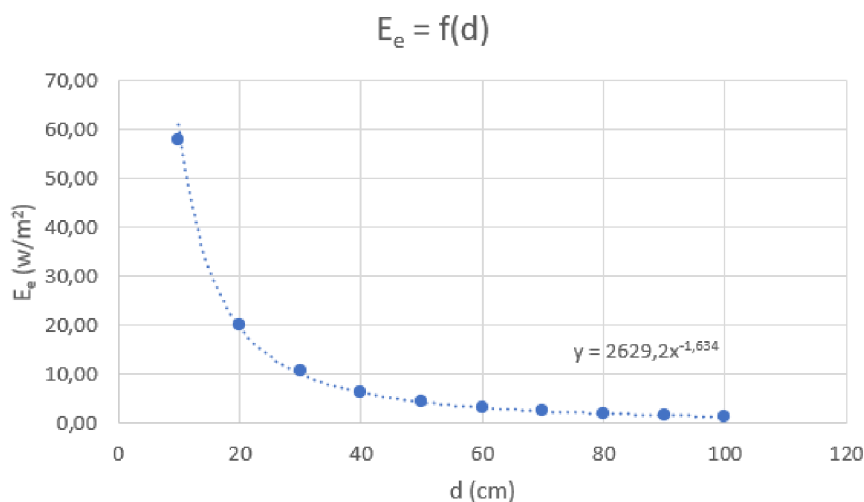
## 6.6.2 Řešení úlohy č. 2

První část je stejná jako v předcházející úloze. Nejprve jsme změřili hodnotu osvětlení v místnosti. I když jsme místnost co nejvíce zatemnili, bylo osvětlení  $E = 4$  lx. Dále jsme pomocí luxmetru měřili osvětlení v jednotlivých vzdálenostech od zdroje.

$d$ [cm]	$E$ [lx]	$E_e$ [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
10	7340	57,99
20	2530	19,99
30	1381	10,91
40	820	6,48
50	561	4,43
60	409	3,23
70	317	2,50
80	252	1,99
90	214	1,69
100	177	1,40

Tabulka 6.7: Naměřené hodnoty osvětlení a vypočtené hodnoty intenzity ozáření

Pro zajímavost přikládáme graf závislosti intenzity ozáření  $E_e$  na vzdálenosti  $d$



Obrázek 6.17: Graf závislosti intenzity ozáření na vzdálenosti

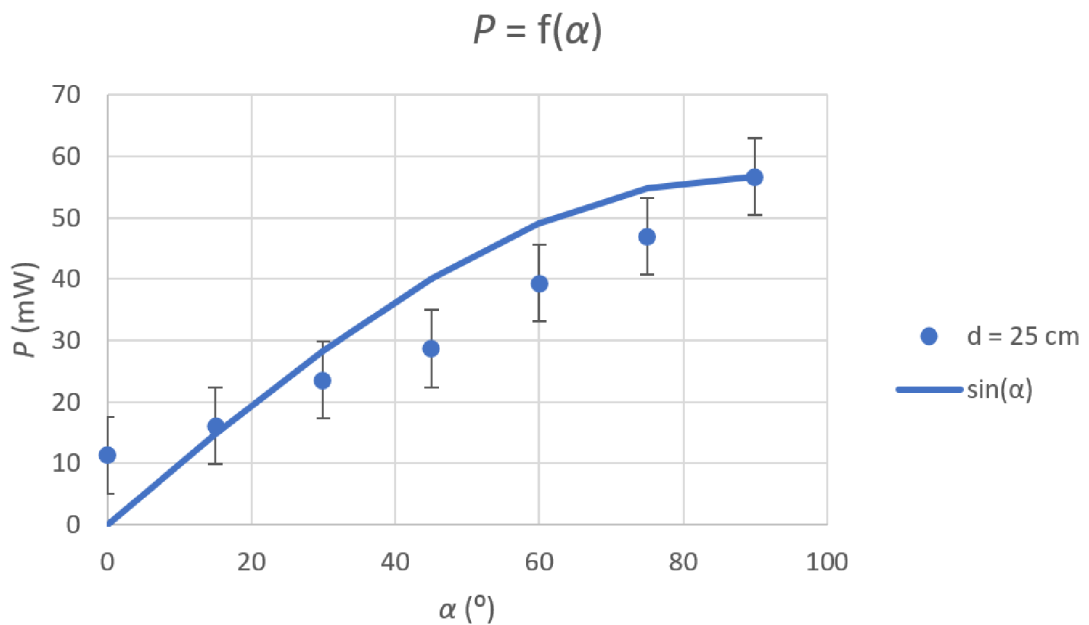
Z grafu je dobře vidět, že intenzita ozáření klesá přibližně s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje, lze tedy říci, že vztah 6.4 odpovídá naměřeným hodnotám ( $\cos(\alpha)$  neuvažujeme, neboť měříme kolmo ke zdroji, jeho hodnota je tedy rovna 1). Vznik možných chyb je diskutován v závěru.

Dále jsme měřili napětí naprázdno a proud nakrátko pro měnící se úhel při různé vzdálenosti od zdroje.

Vzdálenost  $d = 25$  cm:

$\alpha$ [°]	$U$ [V]	$I$ [mA]	$P$ [mW]
0	12,58	0,88	11,31
15	13,84	1,16	16,05
30	14,73	1,6	23,56
45	14,94	1,92	28,68
60	15,11	2,6	39,28
75	15,59	3,01	46,92
90	15,91	3,56	56,63

Tabulka 6.8: Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření výkonu při měnícím se úhlu dopadajícího záření.

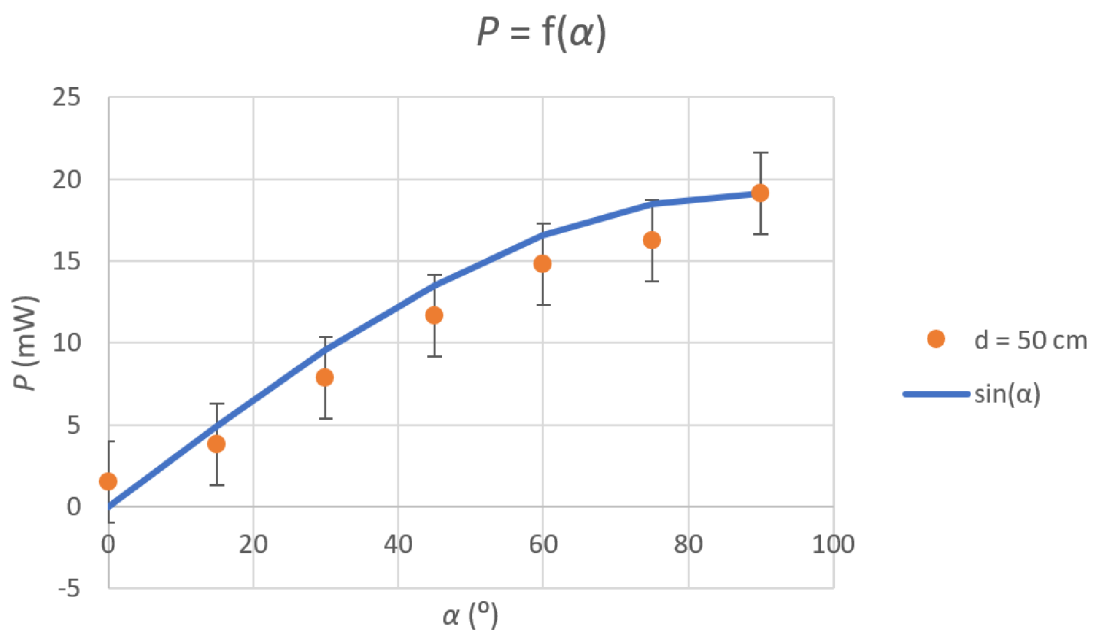


Obrázek 6.18: Graf výkonu nezátíženého solárního panelu v závislosti na úhlu ve vzdálenosti 25 cm od zdroje

Vzdálenost  $d = 50$  cm:

$\alpha$ [°]	$U$ [V]	$I$ [mA]	$P$ [mW]
0	8,28	0,18	1,49
15	9,97	0,38	3,78
30	11,87	0,66	7,83
45	12,7	0,92	11,68
60	12,96	1,14	14,77
75	13,11	1,24	16,25
90	13,27	1,44	19,11

Tabulka 6.9: Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření výkonu při měnícím se úhlu dopadajícího záření.

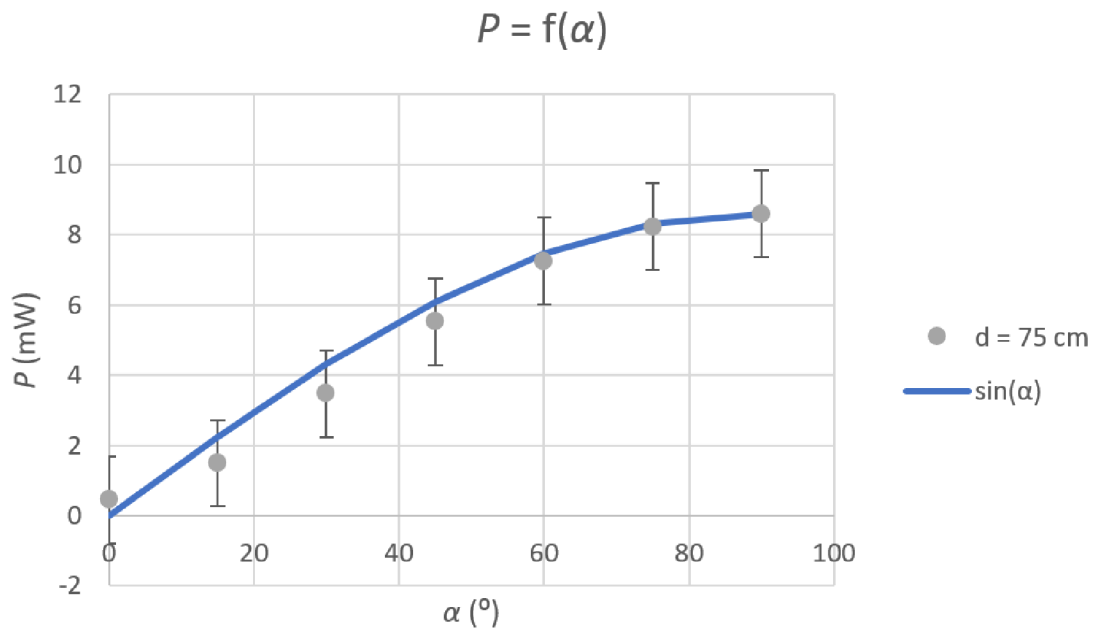


Obrázek 6.19: Graf výkonu nezátíženého solárního panelu v závislosti na úhlu ve vzdálenosti 50 cm od zdroje

Vzdálenost  $d = 75$  cm:

$\alpha$ [°]	$U$ [V]	$I$ [mA]	$P$ [mW]
0	5,55	0,08	0,44
15	8,32	0,18	1,49
30	9,65	0,36	3,47
45	10,62	0,52	5,52
60	11,32	0,64	7,24
75	11,43	0,72	8,22
90	11,62	0,74	8,59

Tabulka 6.10: Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření výkonu při měnícím se úhlu dopadajícího záření.



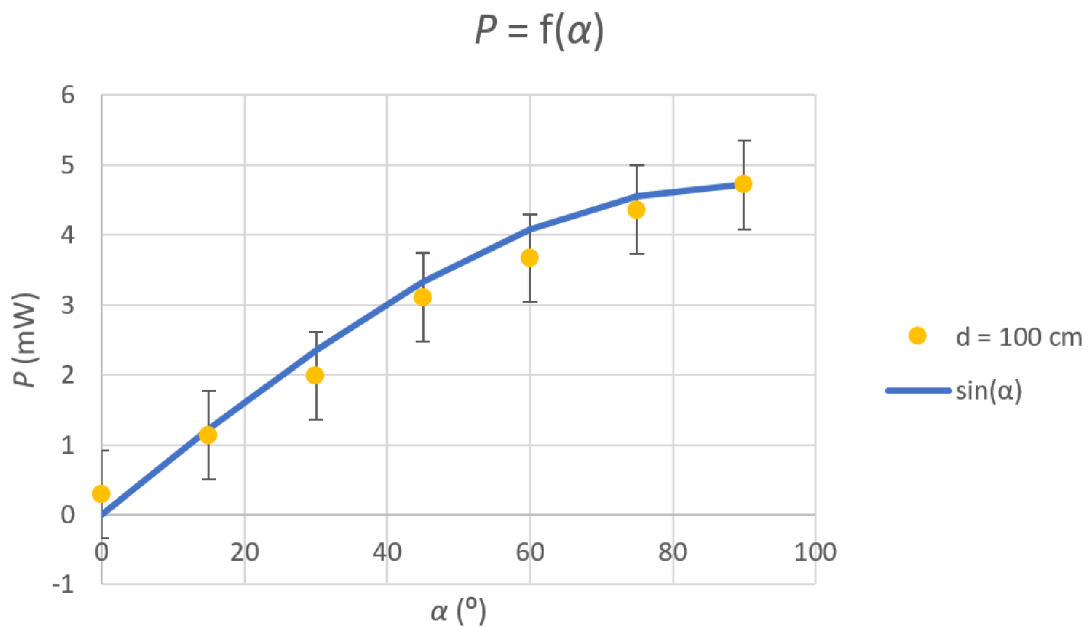
Obrázek 6.20: Graf výkonu nezátíženého solárního panelu v závislosti na úhlu ve vzdálenosti 75 cm od zdroje



Vzdálenost  $d = 100$  cm:

$\alpha$ [°]	$U$ [V]	$I$ [mA]	$P$ [mW]
0	4,83	0,06	0,29
15	7,09	0,16	1,13
30	8,26	0,24	1,94
45	9,14	0,34	3,11
60	9,64	0,38	3,66
75	9,91	0,44	4,36
90	10,25	0,46	4,71

Tabulka 6.11: Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření výkonu při měnícím se úhlu dopadajícího záření.



Obrázek 6.21: Graf výkonu nezátíženého solárního panelu v závislosti na úhlu ve vzdálenosti 100 cm od zdroje

U všech měření je patrná rostoucí hodnota výkonu s rostoucí velikostí úhlu. Grafická zpracování výsledků jsou také doplněna o chybové úsečky. Díky těmto úsečkám je dobře vidět, že naměřené hodnoty odpovídají předpokladům. Lze tedy říci, že hodnota výkonu poroste přibližně s funkcí sinus (jediná z goniometrických funkcí roste podobným způsobem na měřeném intervalu). Zároveň měření potvrzuje, že se výkon snižuje přibližně s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje.

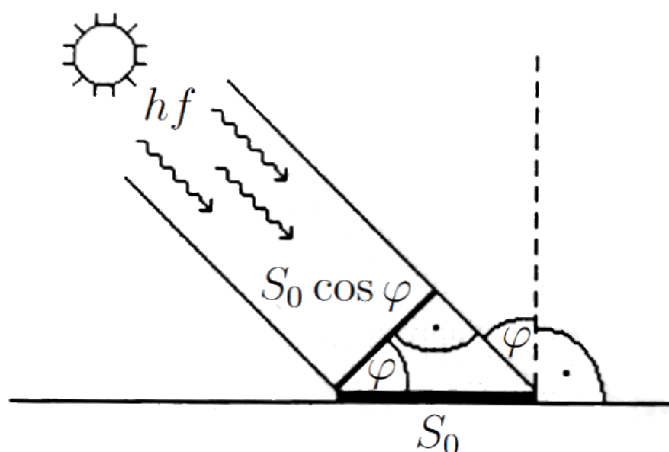
S rostoucí velikostí úhlu roste také výkon, kdy pro největší úhel dosahuje výkon nejvyšší hodnoty.

**Závěr:** Provedli jsme měření závislosti výkonu solárního panelu na úhlu, pod kterým dopadá záření. Jako zdroj jsme použili LED žárovku. Nejednalo se tedy o ideální zdroj. V rámci měření jsme také zjišťovali závislost intenzity ozáření na vzdálenosti. První částí byla závislost intenzity ozáření na vzdálenosti. V tomto měření jsme dostali rovnici spojnice trendu:

$$y = 2629,2x^{-1,634}$$

Teoretický předpoklad (vztah 6.4) udává hodnotu exponentu  $-2$ . Největších chyb jsme se mohli dopustit při měření vzdálenosti, neboť měříme nad metrem. Vzdálenost tedy nedostaneme s maximální přesností. Také samotný odečet z luxmetru může zkreslovat. Nemusí se nám podařit držet luxmetr kolmo ke zdroji, případně s ním můžeme lehce pohnout. Navíc hodnoty osvětlení jsou kolísavé, takže zapisujeme „střední“ hodnotu měření.

V rámci druhé části jsme zjišťovali, jak závisí výkon solárního panelu na úhlu, pod kterým záření dopadá. Úhel jsme měřili od roviny panelu (viz. teoretická část úlohy č. 2). V teoretických předpokladech je ale uvedena funkce cosinus. S tím můžeme souhlasit, neboť funkce cosinus pracuje s úhlem měřeným od kolmice, tedy pracuje s úhlem posunutým o 90 stupňů. Situaci zobrazuje následující obrázek.



Obrázek 6.22: Průmět roviny panelu kolmo do roviny dopadajícího záření [17]

Námi dosažené závislosti výkonu solárního panelu na úhlu velmi přesně odpovídají funkci sinus. Jedinou výjimkou je měření ve vzdálenosti  $d = 25$  cm, kde nám tato závislost nevyšla. nepřenosnost výsledků lze přisoudit chybám měření.

Měření bylo nejvíce ovlivněno skutečností, že vzdálenost panelu a zdroje záření měříme od středu panelu, tuto vzdálenost ovšem nelze určit přesně. Dále měření určitě zkreslilo měření úhlu. Ten měříme úhломěrem, což opět nelze provést s maximální možnou přesností. Dále dle předpokladů by hodnota výkonu solárního panelu měla být pro úhel 0 stupňů rovna 0. Na panel ale dopadalo i rozptýlené záření, naměřené hodnoty tedy nulové nebudou.

Pro naše závěry je důležitý charakter výsledků. Tedy, zda má hodnota rostoucí, či klesající trend.

### 6.6.3 Řešení úlohy č. 3

Pro tuto úlohu uvažujeme různé průtoky ve 3 zadaných obdobích. Zadané hodnoty jsou:  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $19,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a  $35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Dále známe hltnosti jednotlivých turbín. První turbína má hltnost  $7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , druhá a třetí  $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

- První část se týká spuštění turbín v jednotlivých obdobích. Je třeba si uvědomit, že u každé turbíny je nutné překročit alespoň 50 % její hltnosti.

**1.** Průtok v období sucha je pouze  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Z toho vyplývá, že jediná turbína, která může být uvedena do provozu je první. 50 % její hltnosti odpovídá  $3,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Tato hodnota je tedy překročena. V případě ostatních turbín průtok nedosahuje poloviny jejich hltnosti.

**2.** Průměrný roční průtok činí  $19,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Máme 2 možnosti, jak turbíny spustit:

a) Lze spustit první a druhou nebo třetí turbínu. Hltnost spuštěných turbín pak dosáhne  $19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . V tomto případě ovšem nevyužijeme plný potenciál vodního toku, neboť  $0,15 \text{ m}^3$  proteče každou sekundu přes hráz.

b) Můžeme spustit obě výkonnější turbíny. Dosáhneme tak možné hltnosti  $24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . V tomto případě ovšem nebudou turbíny pracovat na plný výkon.

**3.** Průtok v období dešťů je  $35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Tato hodnota je vyšší, než celková hltnost vše 3 turbín ( $31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Z toho důvodu lze spustit všechny na plný výkon.

- Druhá část se týká množství vyrobené energie za 1 den pro každé období. Pro výpočty je nutné si uvědomit základní princip výroby elektrické energie z vody. Jedná o přeměnu potenciální energie vody.

Potenciální energie je dána vztahem:

$$E_p = mgh \quad [\text{J}] \quad (6.7)$$

kde  $m$  je hmotnost vody,  $g$  je tíhové zrychlení a  $h$  je výškový rozdíl hladin.

Dále lze hmotnost upravit s využitím vzorce pro hustotu:

$$E_v = \rho ghV \quad [\text{J}] \quad (6.8)$$

kde  $E_v$  značí energii protékající vody,  $V$  je objem vody a  $\rho$  hustota vody.

Vzhledem k tomu, že každou sekundu protéká turbínou  $Q$  [ $\text{m}^3$ ] vody, lze vztah 6.8 upravit následovně:

$$E_v = Qt\rho gh \quad [\text{J}] \quad (6.9)$$

kde  $Q$  je průtok a  $t$  čas. Vztah 6.9 vyjadřuje vyrobenou energii za předpokladu, že nedochází ke ztrátám, jedná se tedy o 100 % účinnost. V praxi je ovšem

účinnost nižší. Je tedy nutné vztah upravit:

$$E_v = Qt\rho gh\eta \quad [\text{J}] \quad (6.10)$$

kde  $\eta$  je účinnost výrobního procesu.

Zadané hodnoty:

$$t = 1 \text{ d} = 86400 \text{ s}$$

$$h = 2,63 \text{ m}$$

$$\rho = 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\eta = 0,75$$

$$Q_1 = 4,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Q_2 = 19,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$Q_3 = 31,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  Je třeba si uvědomit, že pro výpočet uvažujeme pouze množství vody, která proteče turbínami, přebytečná voda se pro výrobu elektrické energie nevyužije.

Pro výpočty využijeme výše odvozený vztah 6.10.

$$E_1 = Q_1 \cdot t \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot \eta$$

$$E_1 = 4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 86400 \text{ s} \cdot 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 2,63 \text{ m} \cdot 0,75$$

$$E_1 = 6,67 \cdot 10^9 \text{ J} \doteq 6,7 \text{ GJ}$$

V období suchý letních měsíců vyrobí elektrárna za 1 den přibližně 6,7 GJ.

$$E_2 = Q_2 \cdot t \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot \eta$$

$$E_2 = 19,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 86400 \text{ s} \cdot 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 2,63 \text{ m} \cdot 0,75$$

$$E_2 = 3,192 \cdot 10^{10} \text{ J} \doteq 32 \text{ GJ}$$

Při průměrném ročním průtoku vyrobí elektrárna za 1 den 32 GJ.

$$E_3 = Q_3 \cdot t \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot \eta$$

$$E_3 = 31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 86400 \text{ s} \cdot 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 2,63 \text{ m} \cdot 0,75$$

$$E_3 = 5,167 \cdot 10^{10} \text{ J} \doteq 52 \text{ GJ}$$

V období dešťů vyrobí elektrárna za 1 den přibližně 52 GJ.

- Ve třetí části budeme zjišťovat, na kolik dnů stačí energie vypočtená v předchozí části na provoz zimního stadionu se spotřebou energie 2,5 MWh za den.

Nejdříve musíme zjistit, jakému množství energie odpovídá denní spotřeba 2,5 MWh.

Výše zmíněný údaj znamená výkon 2,5 MW po dobu 1 h. energii lze vypočítat za využití vztahu

$$P = \frac{E}{t} \quad [\text{W}] \quad (6.11)$$

kde  $P$  je výkon,  $E$  energie a  $t$  čas.

Úpravou 6.11 získáme vztah pro výpočet energie  $E = P \cdot t$ .

Dosazením do tohoto vztahu dostaneme množství energie  $E = 9 \cdot 10^9 \text{ J}$

Dále budeme postupovat pro 3 uvažované situace, kdy počet dnů vypočteme vztahem

$$N = \frac{E_v}{E_s} \quad (6.12)$$

kde je:  $N$  počet dní,  $E_v$  energie vyrobená elektrárnou a  $E_s$  energie potřebná pro denní provoz stadionu.

$$N_1 = \frac{E_1}{E_s}$$

$$N_1 = \frac{6,67 \cdot 10^9 \text{ J}}{9 \cdot 10^9 \text{ J}}$$

$$N_1 = 0,74 \text{ dne} \doteq 17,8 \text{ h}$$

V období suchý letních měsíců vystačí energie vyrobená za 1 den na necelých 18 hodin provozu sportovního areálu.

$$N_2 = \frac{E_1}{E_s}$$

$$N_2 = \frac{3,192 \cdot 10^{10} \text{ J}}{9 \cdot 10^9 \text{ J}}$$

$$N_2 = 3,54 \text{ dne} \doteq 3,5 \text{ dne}$$

Při průměrném ročním průtoku vystačí energie vyrobená za 1 den na provoz sportovního areálu po dobu 3,5 dne.

$$N_3 = \frac{E_1}{E_s}$$

$$N_3 = \frac{5,167 \cdot 10^{10} \text{ J}}{9 \cdot 10^9 \text{ J}}$$

$$N_3 = 5,74 \text{ dne} \doteq 6 \text{ dní}$$

V období dešťů bude energie vyrobená za 24 hodin stačit na provoz po dobu 6 dní.

### 6.6.4 Řešení úlohy č. 4

Pro řešení této úlohy je nutné odvodit vztah pro výpočet výkonu vodní elektrárny. Elektrárna pracuje na principu přeměny potenciální energie protékající vody na energii elektrickou. Tento proces neprobíhá s účinností 100 %, dochází zde ke ztrátám.

Budeme vycházet ze vztahu

$$P = \frac{E}{t} \quad [\text{W}] \quad (6.13)$$

kde  $P$  je výkon,  $E$  energie a  $t$  čas.

Voda protékající vodní elektrárnou má potenciální energii:

$$E_p = mgh \quad [\text{J}] \quad (6.14)$$

kde  $m$  je hmotnost vody,  $g$  je tíhové zrychlení a  $h$  je výškový rozdíl hladin.

Dále lze 6.14 upravit s využitím vzorce pro hustotu:

$$E_p = V\rho gh \quad [\text{J}] \quad (6.15)$$

kde  $V$  je objem vody a  $\rho$  hustota vody.

Vzhledem k tomu, že každou sekundu protéká turbínou  $Q$  [ $\text{m}^3$ ] vody, lze vztah 6.8 upravit následovně:

$$E_p = Qt\rho gh \quad [\text{J}] \quad (6.16)$$

kde  $Q$  je průtok a  $t$  čas. Vztah 6.16 vyjadřuje vyrobenou energii za předpokladu, že nedochází ke ztrátám, jedná se tedy o 100 % účinnost. V praxi je ovšem účinnost nižší. Je tedy nutné vztah upravit:

$$E_v = Qt\rho gh\eta \quad [\text{J}] \quad (6.17)$$

kde  $\eta$  je účinnost výrobního procesu.

Dále vztah 6.17 dosadíme do 6.13 a dostaneme výsledný vzorec pro výpočet výkonu:

$$P = \frac{Qt\rho gh\eta}{t} = Q\rho gh\eta \quad [\text{W}] \quad (6.18)$$

- První část je nutné řešit dvěma způsoby:
  - a) Stačí pouze sečíst zadané hodnoty výkonu. tedy hodnoty 105 kW, 160 kW a 160 kW. Sečtením těchto hodnot dostaneme skutečný maximální výkon MVE Albrechtice, tedy hodnotu 425 kW.
  - b) Ve druhé části musíme využít odvozeného vzorce 6.18, do kterého dosadíme známé hodnoty.

Zadané hodnoty:

$$h = 2,63 \text{ m}$$

$$\rho = 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$



$$\eta = 0,75$$

$$Q = 31,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$P = Qt\rho gh\eta$$

$$P = 31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 2,63 \text{ m} \cdot 0,75$$

$$P = 598 \text{ kW} \doteq 600 \text{ kW}$$

Vypočtená hodnota neodpovídá skutečnosti. K nepřesnosti mohly vést nepřesně zadané hodnoty, to ovšem v konečném důsledku neudělá tak značný rozdíl. Největší rozdíl je pravděpodobně v uvažované účinnosti celého zařízení (turbína, převodový systém, generátor, ...). Reálná účinnost bude nižší než uvažovaná hodnota 75 %.

- Druhá část se zabývá výkonem při změně parametrů vodní VE. V tomto případě máme k dispozici větší spád 5m a vyšší účinnost 85 %. Pro výpočet opět využijeme výše odvozený vztah 6.18.

Zadané hodnoty:

$$h = 5 \text{ m}$$

$$\rho = 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\eta = 0,85$$

$$Q = 31,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$P = Qt\rho gh\eta$$

$$P = 31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 5 \text{ m} \cdot 0,85$$

$$P = 1,289 \text{ MW} \doteq 1,3 \text{ MW}$$

Výkon vodní elektrárny se zvýší na 1,289 MW.

- Ve třetí části jsou opět změněné parametry elektrárny. Došlo ke zvýšení spádu na 12 m a účinnost se změnila na 80 %. Zároveň máme k dispozici pouze 2 výkonnější turbíny o celkové hltnosti  $24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Zadané hodnoty:

$$h = 12 \text{ m}$$

$$\rho = 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\eta = 0,8$$

$$Q = 24,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$P = Qt\rho gh\eta$$

$$P = 24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 12 \text{ m} \cdot 0,80$$

$$P = 2,253 \text{ MW} \doteq 2,3 \text{ MW}$$

Výkon vodní elektrárny dosáhne 2,253 MW.

- Závěrečná část této úlohy se zabývá situací, kdy je vyrobená energie poskytována domácnostem (lze říci, že výkon je distribuován do domácností). Každá domácnost má okamžitý výkon 1,5 kW. Budeme tedy zjišťovat, kolik domácností má dohromady spotřebu rovnou okamžitému výkonu elektrárny. Pro výpočet využijeme vztahu

$$N = \frac{P_e}{P_d} \quad (6.19)$$

kde  $N$  je počet domácností,  $P_e$  označuje výkon VE (v našem případě všechny výše vypočtené hodnoty) a  $P_d$  značí spotřebu jedné domácnosti.

Pro výpočty budeme uvažovat několik různých výkonů VE.  $P_{e1} = 425$  kW,  $P_{e2} = 598$  kW,  $P_{e3} = 1,288$  GW a  $P_{e4} = 2,253$  GW. Ve všech situacích je okamžitý výkon 1 domácnosti  $P_d = 1,5$  kW. Výpočet provedeme za využití vztahu 6.19.

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{P_{e1}}{P_d} \\ N_1 &= \frac{425 \cdot 10^3 \text{ W}}{1,5 \cdot 10^3 \text{ W}} \\ N_1 &= 283,3 \doteq 280 \end{aligned}$$

Elektrárna o výkonu 425 kW je schopna dodávat energii přibližně 280 domácnostem.

$$\begin{aligned} N_2 &= \frac{P_{e2}}{P_d} \\ N_2 &= \frac{598 \cdot 10^3 \text{ W}}{1,5 \cdot 10^3 \text{ W}} \\ N_2 &= 398,6 \doteq 400 \end{aligned}$$

Elektrárna o výkonu 598 kW je schopna dodávat energii 400 domácnostem.

$$\begin{aligned} N_3 &= \frac{P_{e3}}{P_d} \\ N_3 &= \frac{1,288 \cdot 10^6 \text{ W}}{1,5 \cdot 10^3 \text{ W}} \\ N_3 &= 858,6 \doteq 860 \end{aligned}$$

Elektrárna o výkonu 1,288 MW je schopna dodávat energii 860 domácnostem.

$$\begin{aligned} N_4 &= \frac{P_{e4}}{P_d} \\ N_4 &= \frac{2,253 \cdot 10^6 \text{ W}}{1,5 \cdot 10^3 \text{ W}} \\ N_4 &= 1502 \doteq 1500 \end{aligned}$$

Elektrárna o výkonu 2,253 MW je schopna dodávat energii přibližně 1500 domácnostem.

### 6.6.5 Řešení úlohy č. 5

Abychom tuto úlohu mohli řešit, je třeba odvodit vztah pro výpočet výkonu větrné elektrárny. Výkon odvodíme na základě principu, na kterém elektrárna pracuje. Elektrárna využívá kinetické energie větru, která je přeměněna na energii rotační a následně na energii kinetickou. Kinetická energie se poté v generátoru přemění na energii elektrickou.

Kinetické energie větru se určí pomocí vztahu

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad [\text{J}] \quad (6.20)$$

kde  $E_k$  značí celkovou kinetickou energii větru,  $m$  je hmotnost proudícího vzduchu a  $v$  je jeho rychlost.

Hmotnost  $m$  lze upravit za využití rovnice pro výpočet hustoty:

$$m = \rho V \quad [\text{kg}]$$

kde  $\rho$  značí hustotu a  $V$  objem vzduchu.

Dosazením do 6.20 dostáváme

$$E_k = \frac{1}{2}\rho V v^2 \quad [\text{J}] \quad (6.21)$$

Objem proudícího vzduchu  $V$  je možné upravit za využití vztahu:

$$V = Svt \quad [\text{m}^3]$$

kde  $S$  je plocha větru a  $t$  značí čas, po který děj probíhá.

Tento výraz dosadíme do 6.21 a dostaneme výsledný vztah pro kinetickou energii větru

$$E_k = \frac{1}{2}\rho Stv^3 \quad [\text{J}] \quad (6.22)$$

Při výrobě energie nedochází k přeměně veškeré kinetické energie větru. Elektrárna vítr pouze zpomaluje. Toto zohledňuje tzv. součinitel odporu  $c_p$ . Tato hodnota nám říká, jaká část kinetické energie se využije. Teoreticky je maximální možná hodnota 0,593, reálně se ale pohybuje okolo 0,5. Je tedy nutné násobit kinetickou energii touto hodnotou, abychom získali hodnotu skutečně využitě energie.

$$E_k = \frac{1}{2}\rho Stv^3 c_p \quad [\text{J}]$$

Také je třeba zohlednit skutečnost, že část energie získané z větru se přemění na teplo, ať už v rámci mechanických částí rotoru, převodního systému, případně generátoru. Musíme tedy také brát v úvahu účinnost  $\eta$  celé elektrárny.

$$E_k = \frac{1}{2}\rho Stv^3 c_p \eta \quad [\text{J}] \quad (6.23)$$

Vzhledem k tomu, že nás zajímá výkon, musíme ještě vztah 6.23 dosadit do vzorce pro výkon

$$P = \frac{W}{t} = \frac{E_k}{t} \quad [\text{W}]$$

$$P = \frac{\frac{1}{2}\rho S t v^3 c_p \eta}{t} \quad [\text{W}]$$

$$P = \frac{1}{2}\rho S v^3 c_p \eta \quad [\text{W}] \quad (6.24)$$

- První část se zabývá výkonem elektrárny v jednotlivých měsících. Pro snazší práci označíme rychlost větru v jednotlivých měsících číslicemi. Tedy leden odpovídá číslu 1, únor 2, ... . Pro výpočty využijeme odvozený vztah 6.24, do kterého dosadíme známé hodnoty.

Pro výpočty potřebujeme určit plochu popisovanou rotorem elektrárny.

$$S = \pi r^2 \quad [\text{m}^2]$$

kde  $S$  je plocha popisovaná rotorem a  $r$  je poloměr této plochy.

V našem případě je  $r$  rovno délce jednoho listu elektrárny.

$$S = \pi(35 \text{ m})^2$$

$$S = 3846,5 \text{ m}^2$$

Zadané hodnoty:

$$\rho = 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$S = 3846,5 \text{ m}^2$$

$$\eta = 0,65$$

$$c_p = 0,5$$

$v_1, v_2, \dots, v_{12}$  odečteme z grafu

$$P_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

$$P_1 = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 3846,5 \text{ m}^2 \cdot (16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^3 \cdot 0,5 \cdot 0,65$$

$$P_1 = 3302 \text{ kW} \doteq 3,3 \text{ MW}$$

V lednu má elektrárna výkon 3,3 MW.

$$P_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_2^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 3846,5 \text{ m}^2 \cdot (19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^3 \cdot 0,5 \cdot 0,65$$

$$P_2 = 5530 \text{ kW} \doteq 5,5 \text{ MW}$$

V únoru má elektrárna výkon 5,5 MW.

$$P_3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_3^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

$$P_3 = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 3846,5 \text{ m}^2 \cdot (15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^3 \cdot 0,5 \cdot 0,65$$

$$P_3 = 2721 \text{ kW} \doteq 2,7 \text{ MW}$$

V březnu má elektrárna výkon 2,7 MW.

$$P_4 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_4^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

$$P_4 = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 3846,5 \text{ m}^2 \cdot (12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^3 \cdot 0,5 \cdot 0,65$$

$$P_4 = 1393 \text{ kW} \doteq 1,4 \text{ MW}$$

V dubnu má elektrárna výkon 1,4 MW.

$$P_5 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_5^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

$$P_5 = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 3846,5 \text{ m}^2 \cdot (14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^3 \cdot 0,5 \cdot 0,65$$

$$P_5 = 2212 \text{ kW} \doteq 2,2 \text{ MW}$$

V květnu má elektrárna výkon 2,2 MW.

V červnu je průměrná rychlost větru stejná jako v březnu, tedy  $v_6 = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Výkon v červnu tedy bude stejný, jako v březnu. To odpovídá 2,7 MW.

$$P_7 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_7^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

$$P_7 = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 3846,5 \text{ m}^2 \cdot (17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^3 \cdot 0,5 \cdot 0,65$$

$$P_7 = 3961 \text{ kW} \doteq 3,9 \text{ MW}$$

V červenci má elektrárna výkon 3,9 MW.

V srpnu je průměrná rychlost větru stejná jako v lednu, tedy  $v_8 = 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Výkon v červnu tedy bude stejný, jako v březnu. To odpovídá 3,3 MW.

$$P_9 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_9^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

$$P_9 = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 3846,5 \text{ m}^2 \cdot (18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^3 \cdot 0,5 \cdot 0,65$$

$$P_9 = 4702 \text{ kW} \doteq 4,7 \text{ MW}$$

V září má elektrárna výkon 4,7 MW.

V říjnu je průměrná rychlost větru stejná jako v únoru, tedy  $v_{10} = 19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Výkon v říjnu tedy bude stejný, jako v únoru. To odpovídá 5,5 MW.

V listopadu je průměrná rychlost větru  $v_{11} = 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  stejná jako v červenci. Výkon v listopadu tedy bude stejný, jako v červenci. To odpovídá 3,9 MW.

V prosinci je průměrná rychlost větru stejná jako v září, tedy  $v_{12} = 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Výkon v prosinci tedy bude stejný, jako v září. To odpovídá 4,7 MW.

- Ve druhé části máme za úkol vypočítat výkon elektrárny v libovolném měsíci za předpokladu, že se změní účinnost celého zařízení a součinitel odporu dosáhne hodnoty 0,59.

Zadané hodnoty:

$$\rho = 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$S = 3846,5 \text{ m}^2$$

$\eta = 1$  - účinnost tedy ve výpočtu nemusí vystupovat

$$c_p = 0,59$$

$v_1, v_2, \dots, v_{12}$  odečteme z grafu

$$P_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot c_p$$

$$P_1 = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 3846,5 \text{ m}^2 \cdot (16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^3 \cdot 0,59$$

$$P_1 = 5995 \text{ kW} \doteq 6,0 \text{ MW}$$

V lednu má elektrárna výkon 6,0 MW.

$$P_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_2^3 \cdot c_p$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 3846,5 \text{ m}^2 \cdot (19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^3 \cdot 0,59$$

$$P_2 = 10040 \text{ kW} \doteq 10,0 \text{ MW}$$

V únoru má elektrárna výkon 10040 kW.

$$P_3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_3^3 \cdot c_p$$

$$P_3 = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 3846,5 \text{ m}^2 \cdot (15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^3 \cdot 0,59$$

$$P_3 = 4940 \text{ kW} \doteq 4,9 \text{ MW}$$

V březnu má elektrárna výkon 4,9 MW.

$$P_4 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_4^3 \cdot c_p$$

$$P_4 = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 3846,5 \text{ m}^2 \cdot (12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^3 \cdot 0,59$$

$$P_4 = 2529 \text{ kW} \doteq 2,5 \text{ MW}$$

V dubnu má elektrárna výkon 2,5 MW.

$$P_5 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_5^3 \cdot c_p$$

$$P_5 = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 3846,5 \text{ m}^2 \cdot (14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^3 \cdot 0,59$$

$$P_5 = 4016 \text{ kW} \doteq 4,0 \text{ MW}$$

V květnu má elektrárna výkon 4,0 MW.

V červnu je průměrná rychlost větru stejná jako v březnu, tedy  $v_6 = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Výkon v červnu tedy bude stejný, jako v březnu. To odpovídá 4,9 MW.

$$P_7 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_7^3 \cdot c_p$$

$$P_7 = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 3846,5 \text{ m}^2 \cdot (17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^3 \cdot 0,59$$

$$P_7 = 7191 \text{ kW} \doteq 7,2 \text{ MW}$$

V červenci má elektrárna výkon 7,2 MW.

V srpnu je průměrná rychlost větru stejná jako v lednu, tedy  $v_8 = 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Výkon v červnu tedy bude stejný, jako v březnu. To odpovídá 6,0 MW.

$$P_9 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_9^3 \cdot c_p$$

$$P_9 = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 3846,5 \text{ m}^2 \cdot (18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^3 \cdot 0,59$$

$$P_9 = 8536 \text{ kW} \doteq 8,5 \text{ MW}$$

V září má elektrárna výkon 8,5 MW.

V říjnu je průměrná rychlost větru stejná jako v únoru, tedy  $v_{10} = 19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Výkon v říjnu tedy bude stejný, jako v únoru. To odpovídá 10,0 MW.

V listopadu je průměrná rychlost větru  $v_{11} = 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  stejná jako v červenci. Výkon v listopadu tedy bude stejný, jako v červenci. To odpovídá 7,2 MW.

V prosinci je průměrná rychlost větru stejná jako v září, tedy  $v_{12} = 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Výkon v prosinci tedy bude stejný, jako v září. To odpovídá 8,5 MW.

Tato část má za úkol ukázat, jakého výkonu bychom teoreticky mohli dosáhnout, pokud by součinitel odporu dosáhl maximální teoretické hodnoty a zároveň by nedošlo k žádným energetickým ztrátám v průběhu výroby elektřiny (žádné tření). Při porovnání výsledků první a druhé části je vidět, že teoretická maximální hodnota výkonu je téměř dvojnásobná.

- Třetí část navazuje na část první. Náš úkol je vypočítat množství vyrobené energie v kWh a následně vypočítat, kolik Kč bychom za takto vyrobenou energii získali.



Uvažujeme energii vyrobenou ve 3 měsících (únor, duben a listopad)  
Energie se vypočítá ze vzorce pro výkon

$$P = \frac{W}{t} = \frac{E}{t} \quad [\text{W}]$$

kde  $W$  značí práci,  $E$  energii a  $t$  čas.  
Z tohoto vztahu lze vyjádřit  $E$

$$E = Pt \quad [\text{J}] \quad (6.25)$$

V praxi se pro energii nevyužívá jednotka J, ale jednotka Wh, případně kWh nebo MWh. Pro výpočet tedy potřebujeme určit, po jak dlouhou dobu (kolik hodin) daná elektrárna pracuje na zadaný výkon.

Dále máme za úkol určit celkovou cenu vyrobené elektrické energie. Cena 1 kWh činí 7 Kč, celkovou cenu tedy vypočteme vztahem

$$C = 7E \quad [\text{Kč}] \quad (6.26)$$

kde  $C$  označuje celkovou cenu a  $E$  vyrobenou energii

Únor má dle zadání 28 dní, tedy 672 hodin. Výkon elektrárny v únoru je 5530 kW.

Vyrobena energie se vypočte dle vztahu 6.25.

$$E_1 = P_2 \cdot t$$

$$E_1 = 5530 \text{ kW} \cdot 672 \text{ h}$$

$$E_1 = 3716160 \text{ kWh}$$

Cena elektrické energie se vypočte vztahem 6.26.

$$C_1 = E \cdot 7$$

$$C_1 = 3716160 \text{ kWh} \cdot 7$$

$$C_1 = 26013120 \text{ Kč}$$

V únoru vyrobí elektrárna elektřinu v hodnotě přibližně 26 mil. Kč.

Duben má dle zadání 30 dní, tedy 720 hodin. Výkon elektrárny v dubnu je 1393 kW.

Vyrobena energie se vypočte dle vztahu 6.25.

$$E_2 = P_4 \cdot t$$

$$E_2 = 1393 \text{ kW} \cdot 720 \text{ h}$$

$$E_2 = 1002960 \text{ kWh}$$

Cena elektrické energie se vypočte vztahem 6.26.

$$C_2 = E \cdot 7$$

$$C_2 = 1002960 \text{ kWh} \cdot 7$$

$$C_2 = 7020720 \text{ Kč}$$

V únoru vyrobí elektrárna elektřinu v hodnotě přibližně 7 mil. Kč.

Listopad má dle zadání 30 dní, tedy 720 hodin. Výkon elektrárny v listopadu je 3961 kW.

Vyrobená energie se vypočte dle vztahu 6.25.

$$E_3 = P_1 \cdot t$$

$$E_3 = 3961 \text{ kW} \cdot 720 \text{ h}$$

$$E_3 = 2851920 \text{ kWh}$$

Cena elektrické energie se vypočte vztahem 6.26.

$$C_3 = E \cdot 7$$

$$C_3 = 2851920 \text{ kWh} \cdot 7$$

$$C_3 = 19963440 \text{ Kč}$$

V únoru vyrobí elektrárna elektřinu v hodnotě přibližně 20 mil. Kč.

# Závěr

V rámci bakalářské práce jsem vytvořil text pojednávající o základní fyzikální podstatě výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů. Dále jsem vytvořil celkem 5 úloh. První dvě jsou laboratorní. Jedná se o měření výkonu nezatíženého solárního panelu v závislosti na intenzitě ozáření (v našem případě vzdálenosti od zdroje) a v závislosti na úhlu, pod kterým záření dopadá. Obě úlohy jsou navrženy jako laboratorní cvičení na 90 minut. Následující tři úlohy jsou početního charakteru. V rámci úlohy č. 3 student počítá energii vyrobenou vodní elektrárnou v závislosti na průtoku. Následně určuje, jak dlouho ji lze využívat pro účely sportovního objektu. Úloha č. 4 využívá obdobného principu výpočtů, nicméně je počítán výkon elektrárny v závislosti na změně jejich parametrů. Dále je pak zjišťováno, kolik domácností může v daném okamžiku takto vyráběnou energii využívat. Poslední úlohou je výpočet výkonu větrné elektrárny, kde musí žáci nejdříve odečítat rychlosti větru z grafu a následně počítat výkon. V rámci této úlohy také musí přepočítat vyrobenou energii na její cenu.

Laboratorní cvičení jsou navržena pro procvičení práce s grafy (tvorba grafů, regresních funkcí, odečítání z grafu), uvědomění si vzniku chyb a práci s nimi a také jako práce s textem (porovnání naměřených hodnot s teoretickými předpoklady). Početní úlohy pracují se základními poznatky z mechaniky a dává do souvislosti žákům méně známé vztahy. Uvědomuji si, že navržené úlohy jsou pro žáky příliš obtížné zejména z pohledu odvození příslušných vztahů. Z toho důvodu jsou úlohy doplněné o nápovědu, která je „dovede“ k výslednému vztahu. Výsledný vztah ovšem v nápovědě není, musí si ho sami odvodit.

V rámci zpětné vazby jsem požádal několik studentů prvního ročníku gymnázia o vypracování úloh č. 3 až 5. Vybraná řešení jsou přiložena v příloze. Získaná vypracování byla velmi dobře zpracovaná s minimem chyb. Z toho usuzuji, že se mi podařilo úlohy vhodně naformulovat a zvolit adekvátní náročnost.

# Seznam obrázků

2.1	Výkonová křivka elektrárny o výkonu 3 MW [8] . . . . .	13
2.2	Graf účinnosti větrných turbín [9] . . . . .	14
2.3	Dvoustupňová převodovka větrné elektrárny od firmy Bosch-Rexroth s označením Redulus GPV pro výkon 2 MW [9] . . . . .	14
2.4	Synchronní generátor větrné elektrárny o výkonu 2 MW. Generované jmenovité napětí 6,3 kV [9] . . . . .	15
2.5	Řada větrných elektráren postavených na pobřeží, Holandsko [6] . . .	17
2.6	Mlýny u vesnice Kinderdijk [6] . . . . .	17
2.7	Mnoholistý odporový větrný mlýn používaný k čerpání vody především ve Spojených Státech, jižní Africe a v Austrálii [6] . . . . .	18
2.8	Střešní Savoninova turbína [6] . . . . .	18
2.9	Typy Darrierovy turbíny [6] . . . . .	19
3.1	Vstupy a výstupy procesu fermentace [6] . . . . .	22
3.2	Kogenerační jednotky v areálu bioplynové stanice [6] . . . . .	23
4.1	Přehrada Les Království na jaře 2017 [12] . . . . .	25
4.2	Podpřehradová VE [5] . . . . .	28
4.3	Jezová VE [5] . . . . .	29
4.4	Derivační VE s beztlakovým přiváděčem [5] . . . . .	30
4.5	Derivační VE s tlakovým přiváděčem [5] . . . . .	30
4.6	Derivační VE v kombinaci s tlakovým a beztlakovým přiváděčem [5] .	31
4.7	MVE na přiváděči budovaném pro neenergetické účely [5] . . . . .	31
4.8	Schéma sypané gravitační hráze [6] . . . . .	32
4.9	Schéma betonové klenuté hráze [6] . . . . .	33
4.10	Schéma gravitační betonové hráze [6] . . . . .	33
4.11	Schéma hráze s opěrnými pilíři [6] . . . . .	34
4.12	Rozsah využití nejpoužívanějších turbín [6] . . . . .	35
4.13	Rotor přetlakové Kaplanovy turbíny [6] . . . . .	36
4.14	Rotor malé Francisovy turbíny s pevnými lopatkami [6] . . . . .	36
4.15	Oběžné kolo Peltonovy turbíny s dvojitými lžícovitými lopatkami [6] .	37
4.16	Bánkiho turbína [13] . . . . .	38
4.17	Starý (vlevo) a nový (vpravo) generátor MVE Albrechtice nad Orlicí [foto autora] . . . . .	39

4.18	Vodní elektrárna Orlík [6] . . . . .	40
4.19	Strojovna vodní elektrárny Orlík [6] . . . . .	40
4.20	Letecký pohled na PVE Dlouhé stráně [6] . . . . .	41
5.1	Princip práce fotovoltaického článku generujícího stejnosměrný elektrický proud [6] . . . . .	44
5.2	Monokrystalický panel (vlevo) a polykrystalický panel (vpravo) [18] .	45
5.3	Výroba a spotřeba elektrické energie v průběhu dne při instalaci fotovoltaické elektrárny s bateriovým úložištěm [6] . . . . .	46
5.4	Velkokapacitní kondenzátor $C = 1,2 \text{ F}$ , $U = 2 \text{ V}$ [17] . . . . .	47
5.5	Solární panely na rodinném domě [6] . . . . .	48
6.1	Princip fotočlánku [20] . . . . .	50
6.2	Objasnění radiometrických veličin [20] . . . . .	51
6.3	Luxmetr VOLTCRAFT MS-1300 [foto autora] . . . . .	52
6.4	Multimetr METEX M 3890D a solární panel využité pro měření [foto autora] . . . . .	52
6.5	Obvod pro určení napětí naprázdno a proudu nakrátko [22] . . . . .	53
6.6	Obvod pro určení napětí naprázdno a proudu nakrátko [foto autora] .	53
6.7	Princip fotočlánku [20] . . . . .	55
6.8	Objasnění radiometrických veličin [20] . . . . .	56
6.9	Luxmetr VOLTCRAFT MS-1300 [foto autora] . . . . .	57
6.10	Multimetr METEX M 3890D a solární panel využité pro měření [foto autora] . . . . .	57
6.11	Obvod pro určení napětí naprázdno a proudu nakrátko [22] . . . . .	58
6.12	Zapojení panelu a měření úhlu naklonění panelu vzhledem ke zdroji [foto autora] . . . . .	58
6.13	Graf závislosti průměrné rychlosti větru na měsíci . . . . .	63
6.14	Graf závislosti intenzity ozáření na vzdálenosti . . . . .	66
6.15	Graf závislosti výkonu solárního panelu na vzdálenosti . . . . .	67
6.16	Graf závislosti výkonu solárního panelu na vzdálenosti . . . . .	68
6.17	Graf závislosti intenzity ozáření na vzdálenosti . . . . .	70
6.18	Graf výkonu nezatíženého solárního panelu v závislosti na úhlu ve vzdálenosti 25 cm od zdroje . . . . .	71
6.19	Graf výkonu nezatíženého solárního panelu v závislosti na úhlu ve vzdálenosti 50 cm od zdroje . . . . .	72
6.20	Graf výkonu nezatíženého solárního panelu v závislosti na úhlu ve vzdálenosti 75 cm od zdroje . . . . .	73
6.21	Graf výkonu nezatíženého solárního panelu v závislosti na úhlu ve vzdálenosti 100 cm od zdroje . . . . .	74
6.22	Průmět roviny panelu kolmo do roviny dopadajícího záření [17] . . . .	75
A.1	Parametry solárního panelu využitého pro měření [foto autora] . . . .	98

A.2	Přeložená tabulka parametrů solárního panelu využitého pro měření . . . . .	99
B.1	Řešení prvního studenta . . . . .	101
B.2	Řešení prvního studenta . . . . .	102
B.3	Řešení prvního studenta . . . . .	103
B.4	Řešení prvního studenta . . . . .	104
B.5	Řešení druhého studenta . . . . .	105
B.6	Řešení druhého studenta . . . . .	106
B.7	Řešení druhého studenta . . . . .	107
B.8	Řešení druhého studenta . . . . .	108
B.9	Řešení druhého studenta . . . . .	109
B.10	Řešení druhého studenta . . . . .	110

# Seznam tabulek

6.1	Tabulka pro zpracování hodnot měření intenzity ozáření . . . . .	53
6.2	Tabulka pro zpracování hodnot měření proudu a napětí a výpočet výkonu . . . . .	54
6.3	Tabulka pro zpracování hodnot měření intenzity ozáření . . . . .	57
6.4	Tabulka pro zpracování hodnot měření výkonu článku pro různé úhly	58
6.5	Naměřené hodnoty osvětlení a vypočtené hodnoty intenzity ozáření .	66
6.6	Tabulka pro zpracování hodnot měření proudu a napětí a výpočet výkonu . . . . .	67
6.7	Naměřené hodnoty osvětlení a vypočtené hodnoty intenzity ozáření .	70
6.8	Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření výkonu při měnícím se úhlu dopadajícího záření. . . . .	71
6.9	Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření výkonu při měnícím se úhlu dopadajícího záření. . . . .	72
6.10	Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření výkonu při měnícím se úhlu dopadajícího záření. . . . .	73
6.11	Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření výkonu při měnícím se úhlu dopadajícího záření. . . . .	74



# Literatura

- [1] ČESKO. Zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 25. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-165>
- [2] Obnovitelné zdroje. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2022-10-24]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelne-zdroje>
- [3] STROUHAL, Jan. *Emisní povolenky pro začátečníky. Jak fungují a proč jejich cena roste? - Forbes* [online]. 2021 [cit. 2022-10-24]. Dostupné z: <https://forbes.cz/emisni-povolenky-pro-zacatecniky-jak-funguji-a-proc-jejich-cena-roste/>
- [4] Jaké jsou hlavní výhody a nevýhody obnovitelných zdrojů energie?. *FINANCE.CZ* [online]. 2022, 28.3.2022 [cit. 2022-10-24]. Dostupné z: <https://www.finance.cz/>
- [5] *Obnovitelné zdroje energie*. Praha : FCC PUBLIC, 1994. 174s.
- [6] ENERGETIKA ZBLÍZKA. *Svět Energie* [online]. [cit. 2022-11-01]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka>
- [7] BENDA, Vítězslav. *Obnovitelné zdroje energie*. Praha: Profi Press, 2012, 208 s. : il. (převážně barev.), mapy ; 31 cm. ISBN 978-80-86726-48-9.
- [8] WAGNER, Vladimír. Větrné elektrárny včera, dnes a zítra. *OSEL (Objective Source E- Learning)* [online]. 2017, 1.9.2017 [cit. 2022-11-01]. Dostupné z: <https://www.osel.cz/9535-vetrne-elektrarny-vcera-dnes-a-zitra.html>
- [9] Z čeho se skládá větrná elektrárna. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. [cit. 2022-11-01]. Dostupné z: <https://www.csve.cz/cz/kategorie/z-ceho-se-sklada-vetrna-elektrarna/82>
- [10] JAK FUNGUJE KOGENERAČNÍ JEDNOTKA. *ČEZ Energo* [online]. [cit. 2022-11-14]. Dostupné z: <https://www.cezenergo.cz/cs/o-kogeneraci/jak-funguje-kogeneracni-jednotka>
- [11] DOLEŽAL, Jan a Adam MORAVEC. Bioplynky jako druhé Dlouhé stráně. *Biom.cz* [online]. 2021 [cit. 2022-11-14]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplynky-jako-druhe-dlouhe-strane>

- [12] VÁLEK, Ladislav. *Přehrada Les Království* [online]. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://prehrada-les-kralovstvi.cz/galerie/>
- [13] Bánkiho turbína. *Výkladový slovník energetiky* [online]. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/banki\\_turb.html](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/banki_turb.html)
- [14] VOBOŘIL, David. Vodní elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR. *O Energetice* [online]. 24.11.2016 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje-energie/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni>
- [15] ČÁP, Jiří, majitel malé vodní elektrárny Albrechtice nad Orlicí [ústní sdělení]. Hradec Králové, 27.1.2023.
- [16] BUDÍN, Jan. Přecerpávací vodní elektrárna - princip a uspořádání. *O Energetice* [online]. 3.3.2015 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/typy-elektraren/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip-usporadani-2>
- [17] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. *Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie*. Praha: Ilsa, 2009, 160 s. : il. (některé barev.), mapy, portréty ; 24 cm. ISBN 978-80-904311-0-2.
- [18] Monokrystalický nebo polykrystalický solární panel? Jaký vybrat?. *Abctech SMART TECHNOLOGIES* [online]. 2013 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.abctech.cz/default.asp?show=wmwmpart=articlewmaid=99>
- [19] Česko ve fotovoltaice přerazuje na vyšší rychlost. Ani tak ale růst nestačí, stát musí jednat výrazně pružněji. *Solární asociace* [online]. 21.7.2022 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.solarniasociace.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/28864-cesko-ve-fotovoltaice-prerazuje-na-vyssi-rychlost-ani-tak-ale-rust-nestaci-stat-musi-jednat-vyrazne-pruzneji>
- [20] KOS, Jiří. *Inovace Fyzikálního praktika 2* [online]. Hradec Králové, 2020 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/o545xt/>. Bakalářská práce. Univerzita Hradec Králové, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Ing. Karol Radocha, Ph.D.
- [21] PŘEVOD LUX NA W/M2. *SYSTÉM MĚŘENÍ A REGULACE* [online]. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.domat-int.com/cs/prevod-lux-na-w-m2>
- [22] KOS, Jiří. *Využití moderních technologií ve výuce fyziky na SŠ* [online]. Hradec Králové, 2022 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/z68et0/>. Diplomová práce. Univerzita Hradec Králové, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce RNDr. Michaela Křížová, Ph.D.

- [23] Kos, J., Křížová, M. (2023). Napětí naprázdno fotovoltaického článku v závislosti na intenzitě ozáření. *Matematika–Fyzika–Informatika*, 32(1), 38–47. Získáno z <https://www.mfi.upol.cz/index.php/mfi/article/view/706>
- [24] VYBÍRAL, Bohumil. *Technické aplikace fyziky : kniha o fyzikálních principech, realizaci a funkci technických systémů*. Vydání: první. [Hradec Králové] : Univerzita Hradec Králové, Přírodovědecká fakulta, 2019. 2 svazky (522 stran). ISBN 978-80-7435-753-4.

# Příloha A

## Parametry využitého solárního panelu

Parametry solárního panelu využitého pro měření v rámci úloh č. 1 a 2:

多晶太阳能电池板技术参数

产品型号	RY-10P
输出功率	10 Wp
短路电流	0.62 A
开路电压	21.6 V
峰值电压	17.6 V
峰值电流	0.56 A
功率公差	± 3%
外形尺寸	360×260×17
重量	1 KG

所有电性能参数均在标准测试条件下测得  
 $E = 1000\text{W/m}^2$   $AM = 1.5$ ,  $TC = 25\text{ }^\circ\text{C}$

Obrázek A.1: Parametry solárního panelu využitého pro měření [foto autora]

Technické parametry polykrystalického solárního panelu		
Číslo produktu	RY - 10P	
Výstupní výkon	10 Wp	
Zkratový proud	0,62 A	
Napětí naprázdno	21,6 V	
Špičkové napětí	17,6 V	
Špičkový proud	0,56A	
Tolerance výkonu	3%	
Rozměry v mm	360x260x17	
Hmotnost	1 kg	
Všechny parametry elektrického výkonu jsou měřeny za standardních testovacích podmínek		
$E = 1000 \text{ W/m}^2$	$AM = 1,5$	$TC = 25^\circ$

Obrázek A.2: Přeložená tabulka parametrů solárního panelu využitého pro měření

# Příloha B

## Vybraná řešení úloh č. 3 až 5

Přikládáme řešení 2 studentů. Obrázky B.1 až B.4 jsou řešením prvního studenta, obrázky B.5 až B.10 jsou řešením druhého studenta.

6.3

- 1) 1... turbína (hltnost  $7 \frac{m^3}{s}$ )
- 2... turbína (hltnost  $12 \frac{m^3}{s}$ )
- 3... — " —

- a) celoroční průměr... 1; 2 ... ano
- b) letní měsíce... 1... ne ✓
- c) jarní měsíce... 1; 2; 3 ... ano

2) a) celoroční průměr...  $E = E_p \cdot \eta$   
 $E = mgh \cdot \eta$   
 $E = \rho V \cdot gh \cdot \eta$   
 $E = \rho \cdot Q \cdot t \cdot gh \cdot \eta$   
 $E = 997 \cdot 19 \cdot 86400 \cdot 9,81 \cdot 2,63 \cdot 0,75$   
 $E = 3,767 \cdot 10^{10} \text{ J}$  ✓

b) letní měsíce...  $E = \rho Q t g h \eta$   
 $E = 997 \cdot 4 \cdot 86400 \cdot 9,81 \cdot 2,63 \cdot 0,75$   
 $E = 6,667 \cdot 10^9 \text{ J}$  ✓

c) jarní měsíce...  $E = \rho Q t g h \eta$   
 $E = 997 \cdot 37 \cdot 86400 \cdot 9,81 \cdot 2,63 \cdot 0,75$   
 $E = 5,767 \cdot 10^{10} \text{ J}$  ✓

3)  $1 \text{ MWh} = 3,6 \cdot 10^9 \text{ J}$

a) celoroční průměr...  $8,797 \text{ MWh} \Rightarrow \frac{\text{MWh}}{\text{d}} = 3,5189 \text{ dní}$  ✓

b) letní měsíce...  $1,8519 \text{ MWh} \Rightarrow \text{---} = 0,7408 \text{ dní}$  ✓

c) jarní měsíce...  $14,3528 \text{ MWh} \Rightarrow \text{---} = 5,7611 \text{ dní}$  ✓

Obrázek B.1: Řešení prvního studenta

6.4

1)  $P = \frac{E}{t}$

$P = \frac{\rho \cdot Q \cdot k \cdot g \cdot h \cdot n}{t}$

$P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot h \cdot n$

$P = 997 \cdot 31 \cdot 9,81 \cdot 2,63 \cdot 0,75$

$P = 5,98 \cdot 10^5 \text{ W}$

$598 \text{ kW} \quad 320 + 105 \text{ kW}$   
 $598 \text{ kW} > 425 \text{ kW}$

✓

2)  $P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot h \cdot n$

$P = 997 \cdot 31 \cdot 9,81 \cdot 5 \cdot 0,85$

$P = 1,288 \cdot 10^6 \text{ W}$

zvyšil by se

3)  $P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot h \cdot n$

$P = 997 \cdot 24 \cdot 9,81 \cdot 12 \cdot 0,8$

$P = 2,253 \cdot 10^6 \text{ W}$

4)  $p_1 = \frac{P_1}{1500}$  ✓  
 $p_2 = 1502 \text{ domku}$

$p_1 \dots$  počet domku

zbyva obdobně dopočítat ostatní období.

Obrázek B.2: Řešení prvního studenta



6.5

$$S = 3846,5 \text{ m}^2$$

$$r = 35 \text{ m}$$

→ 12stý vrstev opisují kružnici  
o poloměru  $r = 35 \text{ m}$ .

$$P = \frac{E}{t}$$
$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

a) leden, srpen

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \cdot 35 \cdot 16^3 \cdot 0,5 \cdot 0,65$$

$$P = 30\,051,84 \text{ W}$$

b) únor, říjen

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \cdot 35 \cdot 19^3 \cdot 0,5 \cdot 0,65$$

$$P = 50\,323,63 \text{ W}$$

c) březen, červen

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \cdot 35 \cdot 15^3 \cdot 0,5 \cdot 0,65$$

$$P = 24\,761,95 \text{ W}$$

d) duben

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \cdot 35 \cdot 12^3 \cdot 0,5 \cdot 0,65$$

$$P = 12\,678,12 \text{ W}$$

e) květen

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \cdot 35 \cdot 14^3 \cdot 0,5 \cdot 0,65$$

$$P = 20\,132,385 \text{ W}$$

f) červenec, listopad

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \cdot 35 \cdot 17^3 \cdot 0,5 \cdot 0,65$$

$$P = 36\,046,07 \text{ W}$$

g) září, prosinec

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \cdot 35 \cdot 18^3 \cdot 0,5 \cdot 0,65$$

$$P = 42\,388,66 \text{ W}$$

pro hodnotu  $S = 35 \text{ m}^2$  jsou

výsledky správné.

2) únor

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \cdot 35 \cdot 19^3 \cdot 0,59 \cdot 1$$

$$P = 91\,356,74 \text{ W}$$

Obrázek B.3: Řešení prvního studenta

$$3) E = \frac{1}{2} \cdot S \cdot S \cdot t \cdot v^3 \cdot c_p \cdot \eta$$

~~12/17~~

a) únor

$$E = 1,217 \cdot 10^{11} \text{ J}$$

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

$$\text{zisk} = \frac{E}{3,6 \cdot 10^6} \cdot t$$

$$\text{zisk} = 236 \, 722 \text{,-}$$

b) duben

$$E = 3,286 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

$$\text{zisk} = \frac{E}{3,6 \cdot 10^6} \cdot t$$

$$\text{zisk} = 63 \, 897 \text{,-}$$

c) listopad

$$E = 9,343 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

$$\text{zisk} = \frac{E}{3,6 \cdot 10^6} \cdot t$$

$$\text{zisk} = 181 \, 672 \text{,-}$$

pro hodnoty  $t$  vypočtu jsou výsledky správné, ovšem pro  $S = 3846,5 \text{ m}^2$  jsou jiné.

Zpětná vazba:

1) 4

2) ano, bylo

3) byly zajímavé

4) něco takového jsme ještě vypočítaly, zajímavé téma

5) možná pár gramatických chyb při (turbína)

Moc děkuji. Měměně turbína se píše s i. :)

tak snad se mi povedlo vše opravit.

Obrázek B.4: Řešení prvního studenta

### 6.3 Úloha č. 3 - Výpočet energie vyrobené vodní elektrárnou v různých částech roku.

**Úkol:** Navrhněte optimální provoz generátorů (které budou spuštěny). Vypočtete, kolik energie vyrobí MVE Albrechtice při různých průtocích vody během jednoho dne všech 3 zmíněných období.

**Zadání:** MVE Albrechtice má instalovány 3 Francisovy Turbíny, které mají stejný spád 2,63 m. Výkon turbín souvisí s jejich hltností. První turbína dosahuje výkonu 105 kW a její hltnost je až 7 m<sup>3</sup>/s. Druhá a třetí turbína dosahují shodně výkonů 160 kW a mají vyšší hltnost 12 m<sup>3</sup>/s.

Průměrný roční dlouhodobý průtok činí 19,154 m<sup>3</sup>/s. V suchých letních měsících dosahuje průměrný průtok pouze 4 m<sup>3</sup>/s. V období dešťů (jarní měsíce, neuvažujeme extrémní počasí) dosahuje průtok přibližně průměru 35 m<sup>3</sup>/s. Uvažujme efektivitu celého výrobního procesu 75%.

V praxi bývá/je turbína spuštěna pouze, pokud je překročeno alespoň 50% její hltnosti. Uvažujte i s tímto případem.

Pro výpočty uvažujme hustotu vody  $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$  a  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ .

Určete a vypočtete:

- 1) Které turbíny je vhodné v každém období spustit, aby byl pokryt minimální potřebný průtok. Budou turbíny pracovat na plný výkon?
- 2) Vypočtete množství vyrobené energie za 1 den (24 hodin) ve výše zmíněných obdobích (celoroční průměr, období sucha, období dešťů).
- 3) Pro každé ze 3 zmíněných období určete, jak dlouho by energie vyrobená za 1 den stačila pro účely sportovního areálu (zimního stadionu) o spotřebě 2,5 MWh/den

1) průměrný roční průtok  
 19,154 m<sup>3</sup>/s  
 ( 2. turbína ... hltnost 12 m<sup>3</sup>/s  
 → 7,154 m<sup>3</sup>/s  
 ( 3. turbína ... hltnost 12 m<sup>3</sup>/s  
 → 0 m<sup>3</sup>/s  
 2. turbína bude pracovat na plný výkon.  
 3. turbína nebude pracovat na plný výkon.  
 1. turbína je vypnutá.

průtok v letních měsících  
 4 m<sup>3</sup>/s  
 ( 1. turbína ... 7 m<sup>3</sup>/s  
 → 0 m<sup>3</sup>/s  
 1. turbína nebude pracovat na plný výkon.  
 2. a 3. turbína jsou vypnuté.

průtok v období dešťů  
 35 m<sup>3</sup>/s  
 ( 2. turbína ... 12 m<sup>3</sup>/s  
 → 23 m<sup>3</sup>/s  
 ( 3. turbína ... 12 m<sup>3</sup>/s  
 → 11 m<sup>3</sup>/s  
 ( 1. turbína ... 7 m<sup>3</sup>/s  
 → 4 m<sup>3</sup>/s  
 Všechny 3 turbíny musí pracovat na plný výkon.

51

Obrázek B.5: Řešení druhého studenta

### 6.4 Úloha č. 4 - Výpočet výkonu vodní elektrárny při změně parametrů.

**Úkol:** Určete, jak se změní výkon MVE Albrechtice, pokud se změní spád, výkon turbín, jejich hltnost a efektivita výrobního procesu.

**Zadání:** MVE Albrechtice má instalovaný výkon 1x105 kW a 2x160 kW při spádu 2,63 m, celkové hltnosti 31 m<sup>3</sup>/s. Efektivitu celého procesu uvažujeme 75%. Pro účely našich výpočtů budeme uvažovat průtok MVE větší, než 31 m<sup>3</sup>/s, tedy všechny turbíny pracují na plný výkon.

Pro výpočty uvažujeme hustotu vody  $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$  a  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ .

**Určete:**

- 1) Maximální možný výkon elektrárny (odvoďte vztah pro výpočet výkonu ze zadaných údajů). Odpovídá vypočtená hodnota skutečnosti? Pokuste se zdůvodnit.
- 2) Jak by se změnil výkon, pokud bychom zvýšili spád na 5 m a dosáhli účinnosti výrobního procesu 85%.
- 3) Výkon elektrárny, pokud bychom měli v provozu pouze 2 turbíny o spádu 12 m a celkové hltnosti 24 m<sup>3</sup>/s. Efektivitu procesu výroby elektřiny uvažujeme 80%.
- 4) Pro předchozí případy určete, kolika rodinným domům o průměrné spotřebě 1,5 kW je tato elektrárna schopna dodávat energii.

1)  $1 \times \dots 105 \text{ kW}$   
 $2 \times \dots 160 \text{ kW} = 320 \text{ kW}$   
 $\star$

$\frac{105}{150} \text{ kW} + \frac{2}{3} \cdot 160 \text{ kW} = \frac{425}{510} \text{ kW}$   
 Odpovídá vypočtená hodnota skutečnosti? ne, mohlo by docházet k nějakým útratám - **toto je skutečná hodnota**

2)  
 $h = 5 \text{ m}$   
 $\eta = 85\% = 0,85$   
 $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 997 \text{ kg/m}^3$   
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$   
 $t = 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$   
 $Q = 31 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $P = ? [\text{W}]$

$m = \rho \cdot V$   
 $m = 997 \cdot 2678400$   
 $m = 2670364800 \text{ kg}$   
 $E_p = m \cdot g \cdot h$   
 $E_p = 2670364800 \cdot 9,81 \cdot 5$   
 $E_p = 130981393470 \text{ J}$   
 $E = E_p \cdot \eta$   
 $E = 130981393470 \cdot 0,85$   
 $E = 111334184424 \text{ J}$

$P = \frac{E}{t}$   
 $P = \frac{111334184424}{86400}$   
 $P = 1288590,0975 \text{ W}$   
 $P = 1288,6 \text{ kW}$

$V = Q \cdot t$   
 $V = 31 \cdot 86400$   
 $V = 2678400 \text{ m}^3$

**\* výkon lze vypočítat obdobně, jako u ostatních úloh. Následně je vypočtený výkon  $P = 598 \text{ kW}$ .**

Obrázek B.6: Řešení druhého studenta



6.3 Úloha č. 3

2)

průměrný roční průtok

$$Q = 19,154 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t = 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 997 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$h = 2,63 \text{ m}$$

$$\eta = 75\% = 0,75$$

$$E = ? \text{ [J]}$$

$$V = Q \cdot t$$

$$V = 19,154 \cdot 86400$$

$$V = 1654905,6 \text{ m}^3$$

$$m = \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V$$

$$m = 997 \cdot 1654905,6$$

$$m = 1649940883,2 \text{ kg}$$

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

$$E_p = 1649940883,2 \cdot 9,81 \cdot 2,63$$

$$E_p = 42568969768,82496 \text{ J}$$

$$E = E_p \cdot \eta$$

$$E = 42568969768,82496 \cdot 0,75$$

$$E = 31926727326,61872 \text{ J}$$

$$E \approx 31,9 \text{ GJ}$$

průtok v letních měsících

$$Q = 4 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t = 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 997 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$h = 2,63 \text{ m}$$

$$\eta = 75\% = 0,75$$

$$E = ? \text{ [J]}$$

$$V = Q \cdot t$$

$$V = 4 \cdot 86400$$

$$V = 345600 \text{ m}^3$$

$$m = \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V$$

$$m = 997 \cdot 345600$$

$$m = 344563200 \text{ kg}$$

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

$$E_p = 344563200 \cdot 9,81 \cdot 2,63$$

$$E_p = 8889833928,96 \text{ J}$$

$$E = E_p \cdot \eta$$

$$E = 8889833928,96 \cdot 0,75$$

$$E = 6667375446,72 \text{ J}$$

$$E \approx 6,7 \text{ GJ}$$

průtok v období deště

$$Q = 35 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow \text{pozor!} *$$

$$t = 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 997 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$h = 2,63 \text{ m}$$

$$\eta = 75\% = 0,75$$

$$E = ? \text{ [J]}$$

$$V = Q \cdot t$$

$$V = 3 \cdot 86400$$

$$V = 3024000 \text{ m}^3$$

$$m = \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V$$

$$m = 997 \cdot 3024000$$

$$m = 3015928000 \text{ kg}$$

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

$$E_p = 3015928000 \cdot 9,81 \cdot 2,63$$

$$E_p = 77786046878,4 \text{ J}$$

$$E = E_p \cdot \eta$$

$$E = 77786046878,4 \cdot 0,75$$

$$E = 58339535158,8 \text{ J}$$

$$E \approx 58,3 \text{ GJ}$$

$$51,6761$$

Obrázek B.7: Řešení druhého studenta

3)

průměrný roční průtok

energie vyrobená za 1 den ... 31 962 727 326,618 72 J

spotřeba zimního stadionu ... 2,5 MWh/den

1 Wh = 3600 J

$$31\,962\,727\,326,618\,72 : 3600 = 8\,878\,535,368\,522\,7 \text{ Wh} \approx 8,9 \text{ MWh}$$

$$8,9 : 2,5 = 3,56 \text{ d} = \underline{\underline{3 \text{ d } 13 \text{ h } 26 \text{ min}}}$$

průtok v letních měsících

energie vyrobená za 1 den ... 6 667 375 446,72 J

spotřeba zimního stadionu ... 2,5 MWh/den

1 Wh = 3600 J

$$6\,667\,375\,446,72 : 3600 = 1852\,048,735\,2 \text{ Wh} \approx 1,9 \text{ MWh}$$

$$1,9 : 2,5 = 0,76 \text{ d} = \underline{\underline{18 \text{ h } 14 \text{ min}}}$$

průtok v období deště

energie vyrobená za 1 den ... 58 339 535 158,8 J ... *chybně vypočteno*

spotřeba zimního stadionu ... 2,5 MWh/den

*v předchozí části*

1 Wh = 3600 J

$$58\,339\,535\,158,8 : 3600 = 16\,205\,375,877 \text{ Wh} \approx 16,2 \text{ MWh}$$

$$16,2 : 2,5 = 6,48 \text{ d} = \underline{\underline{6 \text{ d } 11 \text{ h } 31 \text{ min}}}$$

*s uvařenou energií správný výsledek, správně má vycházet*

*5,74 dne.*

6.4 Úloha č. 4

3)  $h = 12 \text{ m}$

$$Q = 24 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\eta = 80\% = 0,8$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 997 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$t = 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$$

$$P = ? [\text{W}]$$

$$V = Q \cdot t$$

$$V = 24 \cdot 86400$$

$$V = \underline{\underline{2\,073\,600 \text{ m}^3}}$$

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = 997 \cdot 2\,073\,600$$

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

$$E_p = 2\,067\,379\,200 \cdot 9,81 \cdot 12$$

$$E_p = \underline{\underline{243\,371\,879\,424 \text{ J}}}$$

$$E = E_p \cdot \eta$$

$$E = 243\,371\,879\,424 \cdot 0,8$$

$$E = \underline{\underline{194\,697\,503\,539,2 \text{ J}}}$$

$$P = \frac{E}{t}$$

$$P = \frac{194\,697\,503\,539,2}{86\,400}$$

$$P = \underline{\underline{2\,253\,443,328 \text{ W}}}$$

$$P \approx \underline{\underline{2\,253,4 \text{ kW}}}$$

Obrázek B.8: Řešení druhého studenta

6.4 Úloha č. 4

4)

pro případ 2)

$$1288,6 : 1,5 = \underline{859}$$

Elektrárna může energii  
dodávat asi 859 domům.

pro případ 3)

$$2253,4 : 1,5 = \underline{1502}$$

Elektrárna může energii  
dodávat asi ~~859~~ domům.  
**1502 j**

6.5 Úloha č. 5 *V všech úloh S = 3846,5 m<sup>2</sup> (r = 35m). Proto výsledky vycházejí jinak.*

1) leden, srpen

$$v = 16 \text{ m/s}$$

$$t = 1 \text{ s}$$

$$c_p = 0,5$$

$$\eta = 65\% = 0,65$$

$$S = \underline{3846,5 \text{ m}^2} \quad (r = 35 \text{ m})$$

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$V = S \cdot v \cdot t$$

$$V = 35 \cdot 16 \cdot 1$$

$$V = \underline{560 \text{ m}^3}$$

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = 1,25 \cdot 560$$

$$m = \underline{700 \text{ kg}}$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot 700 \cdot 16^2$$

$$E_k = \underline{89600 \text{ J}}$$

$$E_c = E_k \cdot c_p$$

$$E_c = 89600 \cdot 0,5$$

$$E_c = \underline{44800 \text{ J}}$$

$$E_v = E_c \cdot \eta$$

$$E_v = 44800 \cdot 0,65$$

$$E_v = \underline{29120 \text{ J}}$$

$$P = \frac{E_v}{t}$$

$$P = \frac{29120}{1}$$

$$P = \underline{29120 \text{ W}}$$

únor, říjen

$$v = 19 \text{ m/s}$$

$$t = 1 \text{ s}$$

$$c_p = 0,5$$

$$\eta = 65\% = 0,65$$

$$S = 35 \text{ m}^2$$

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$V = S \cdot v \cdot t$$

$$V = \underline{665 \text{ m}^3}$$

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = \underline{831,25 \text{ kg}}$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$E_k = \underline{150040,6 \text{ J}}$$

$$E_c = E_k \cdot c_p$$

$$E_c = \underline{75020,3 \text{ J}}$$

$$E_v = E_c \cdot \eta$$

$$E_v = \underline{48763,2 \text{ J}}$$

$$P = \frac{E_v}{t}$$

$$P = \underline{48763,2 \text{ W}}$$

duben

$$v = 12 \text{ m/s}$$

$$t = 1 \text{ s}$$

$$c_p = 0,5$$

$$\eta = 65\% = 0,65$$

$$S = 35 \text{ m}^2$$

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$V = S \cdot v \cdot t$$

$$V = \underline{420 \text{ m}^3}$$

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = \underline{525 \text{ kg}}$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$E_k = \underline{37800 \text{ J}}$$

$$E_c = E_k \cdot c_p$$

$$E_c = \underline{18900 \text{ J}}$$

$$E_v = E_c \cdot \eta$$

$$E_v = \underline{12285 \text{ J}}$$

$$P = \frac{E_v}{t}$$

$$P = \underline{12285 \text{ W}}$$

\* pro S = 35m<sup>2</sup>  
jsou výsledky  
správné.

Obrázek B.9: Řešení druhého studenta



6.5 Úloha č. 5

1) květen

$$v = 14 \text{ m/s}$$

$$t = 1 \text{ s}$$

$$c_p = 0,5$$

$$\eta = 65\% = 0,65$$

$$S = 35 \text{ m}^2$$

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$V = S \cdot v \cdot t$$

$$V = 490 \text{ m}^3$$

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = 612,5 \text{ kg}$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$E_k = 60\,025 \text{ J}$$

$$E_c = E_k \cdot c_p$$

$$E_c = 30\,012,5 \text{ J}$$

$$E_v = E_c \cdot \eta$$

$$E_v = 19\,508,1 \text{ J}$$

$$P = \frac{E_v}{t}$$

$$P = 19\,508,1 \text{ W}$$

červenec, listopad

$$v = 17 \text{ m/s}$$

$$t = 1 \text{ s}$$

$$c_p = 0,5$$

$$\eta = 65\% = 0,65$$

$$S = 35 \text{ m}^2$$

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$V = S \cdot v \cdot t$$

$$V = 595 \text{ m}^3$$

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = 743,75 \text{ kg}$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$E_k = 107\,571,9 \text{ J}$$

$$E_c = E_k \cdot c_p$$

$$E_c = 53\,785,95 \text{ J}$$

$$E_v = E_c \cdot \eta$$

$$E_v = 34\,928,4 \text{ J}$$

$$P = \frac{E_v}{t}$$

$$P = 34\,928,4 \text{ W}$$

září, prosinec

$$v = 18 \text{ m/s}$$

$$t = 1 \text{ s}$$

$$c_p = 0,5$$

$$\eta = 65\% = 0,65$$

$$S = 35 \text{ m}^2$$

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$V = S \cdot v \cdot t$$

$$V = 630 \text{ m}^3$$

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = 787,5 \text{ kg}$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$E_k = 127\,575 \text{ J}$$

$$E_c = E_k \cdot c_p$$

$$E_c = 63\,787,5 \text{ J}$$

$$E_v = E_c \cdot \eta$$

$$E_v = 41\,461,9 \text{ J}$$

$$P = \frac{E_v}{t}$$

$$P = 41\,461,9 \text{ W}$$

2) červen (březen) *Opět S = 3846,5 m<sup>2</sup>.*

$$v = 15 \text{ m/s}$$

$$t = 1 \text{ s}$$

$$c_p = 0,59$$

$$\eta = 100\% = 1$$

$$S = 35 \text{ m}^2$$

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$V = S \cdot v \cdot t$$

$$V = 525 \text{ m}^3$$

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = 656,25 \text{ kg}$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$E_k = 59\,062,5 \text{ J}$$

$$E_c = E_k \cdot c_p$$

$$E_c = 43\,558,6 \text{ J}$$

$$E_v = E_c \cdot \eta$$

$$E_v = 43\,558,6 \text{ J}$$

$$P = \frac{E_v}{t}$$

$$P = 43\,558,6 \text{ W}$$

*Pro S = 35 m<sup>2</sup> jsou výsledky  
Správné.*

3) únor

$$28 \text{ dní} = 672 \text{ h}$$

$$P = 48\,763,2 \text{ W}$$

$$48\,763,2 \cdot 672 = 32\,768\,870,4$$

$$Wh = 32\,768 \text{ kWh}$$

$$32\,768 \cdot 7 = 229\,376 \text{ Kč}$$

duben

$$30 \text{ dní} = 720 \text{ h}$$

$$P = 12\,285 \text{ W}$$

$$12\,285 \cdot 720 = 8\,845\,200 \text{ Wh} = 8\,845 \text{ kWh}$$

$$8\,845 \cdot 7 = 61\,915 \text{ Kč}$$

listopad

$$30 \text{ dní} = 720 \text{ h}$$

$$P = 34\,928,4 \text{ W}$$

Obrázek B.10: Řešení druhého studenta



# Příloha C

## Článek pro časopis Matematika-fyzika-informatika

### Elektrické parametry fotovoltaických článků v závislosti na ozáření

*Adam Klásek – Jan Šlégr*

*Katedra fyziky, Přírodovědecká fakulta Univerzity Hradec Králové,  
Rokitanského 62, 500 03 Hradec Králové*

Se zájmem jsme si přečetli článek [1], ve kterém autoři proměřovali závislost napětí naprázdno fotovoltaického článku v závislosti na ozáření. Překvapilo nás, že podle některých pramenů (např. v článku uvedeného zdroje [2]) může být závislost tohoto napětí na vzdálenosti od zdroje logaritmická. Proto jsme se rozhodli proměřit závislosti napětí naprázdno, proudu nakrátko a maximálního výkonu (jako součinu předchozích dvou veličin) na vzdálenosti společně se závislosti osvětlení měřeného luxmetrem. Rovněž jsme provedli měření závislosti těchto veličin na úhlu, pod kterým na panel dopadá světlo, a měření VA charakteristik, které se pro solární panely používá v praxi. I tato měření se mohou stát námětem pro laboratorní práci na střední škole.

Teoretická východiska jsou přehledně uvedena v článku [1], proto se zde omezíme pouze na nejdůležitější vztahy. Intenzita ozáření klesá se čtvercem vzdálenosti:

$$E_e = \frac{I_e}{d^2} \cos \alpha,$$

kde  $I_e$  je zářivost zdroje,  $d$  vzdálenost od zdroje a  $\alpha$  úhel svíraný dopadajícím zářením s normálou uvažované plochy, na kterou záření dopadá.

#### Použité vybavení

K měření byl použit polykrystalický solární panel čínské provenience RY-10P, jehož parametry jsou na obrázku 1 vlevo. Díky moderním překladačům bylo možné identifikovat jednotlivé parametry (obr. 1 vpravo): Maximální výkon panelu je 10 W,

napětí naprázdno 21,6 V a maximální proud 0,56 A při teplotě 25 °C, pokud na panel dopadá tok záření  $1\,000\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

K osvětlení solárního panelu byla použita úsporná žárovka, která sice neposkytovala tok záření  $1\,000\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , i tak ale považujeme výsledky za průkazné.

Protože školy obvykle nedisponují zařízeními pro radiometrická měření, byl použit luxmetr VOLTcraft MS-1300, kterým bylo měřeno osvětlení solárního panelu. Rozsah použitého luxmetru je 0,1 až 50 000 lx s relativní odchylkou 5 %. K měření elektrických veličin byl použit multimetr METEX M-3890D, ale vyhoví jakýkoliv voltmetr se vstupním odporem pro měření napětí kolem  $10\text{ M}\Omega$  a zanedbatelným vnitřním odporem pro měření proudu.

Pro měření voltampérových charakteristik jsou zapotřebí multimetry dva, jeden pro měření napětí a jeden pro měření proudu. Různé body VA charakteristiky jsou měřeny pro různé hodnoty zatěžovacího odporu, přičemž je vhodné využít dostatečně dimenzovaný reostat. Ještě vhodnější je využít reostaty dva, jeden s menším odporem (pro oblast vyšších proudů) a jeden s větším odporem (pro oblast VA charakteristiky s nižším proudem).

多晶太阳能电池板技术参数		Technické parametry polykrystalického solárního panelu	
产品型号	RV-10P	Číslo produktu	RY - 10P
输出功率	10 Wp	Výstupní výkon	10 Wp
短路电流	0.62 A	Zkratový proud	0,62 A
开路电压	21.6 V	Napětí naprázdno	21,6 V
峰值电压	17.6 V	Špičkové napětí	17,6 V
峰值电流	0.56 A	Špičkový proud	0,56A
功率公差	± 3%	Tolerance výkonu	3%
外形尺寸	360×260×17	Rozměry v mm	360x260x17
重量	1 KG	Hmotnost	1 kg
所有电性能参数均在标准测试条件下测得 E = 1000W/m <sup>2</sup> AM = 1.5, TC = 25 °C		Všechny parametry elektrického výkonu jsou měřeny za standardních testovacích podmínek	
		E = 1000 W/m <sup>2</sup>	AM = 1,5 TC = 25°

Obr. 1: Parametry použitého solárního panelu

### Měření závislosti výkonu na vzdálenosti

Pro zjištění, která veličina závisí na druhé mocnině vzdálenosti, bylo měřeno napětí naprázdno a proud nakrátko v závislosti na vzdálenosti. Následně byl vypočten maximální výkon jako součin těchto dvou veličin. Zároveň byla měřena i závislost osvětlení solárního panelu na vzdálenosti (přičemž předpokládáme, že mezi osvětlením a ozářením panelu je přímá úměrnost).

Na obr. 2 je závislost osvětlení, napětí naprázdno, proudu nakrátko a maximálního výkonu na vzdálenosti. Proložení mocninnou funkcí zjistíme, že osvětlení klesá se vzdáleností  $d$  podle funkce  $E_e \sim d^{-1,6}$ . Není to sice  $d^{-2}$ , odchylka exponentu je 20 %, ale exponent je celkem v souladu s teorií.

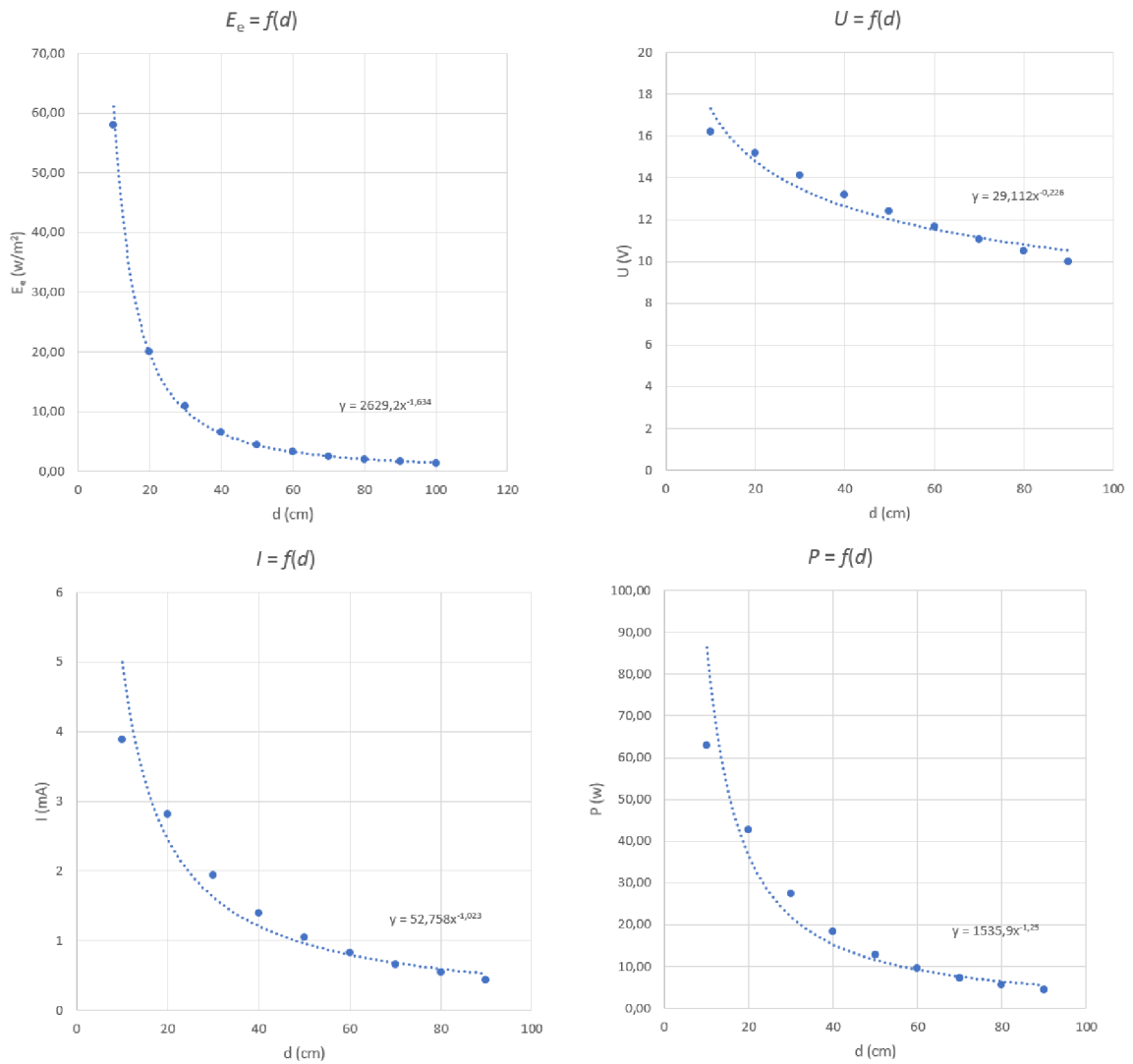
Z elektrických parametrů je nejbližší hledané závislosti maximální výkon se závislostí  $P \sim d^{-1,3}$ . U napětí je exponent roven  $-0,23$ , což je v souladu se hodnotami naměřenými autory v [1], kde vyšel exponent na dvě platné číslice stejný.

Pokud bychom chtěli zjistit, jak závisí elektrické veličiny na intenzitě ozářením (osvětlení), nabízí se další metoda, často používaná ve vědě a kterou je vhodné žákům ukázat: Sestavení korelačního diagramu (anglicky *scatter plot*), což je bodový graf, který zobrazuje v kartézských souřadnicích hodnoty dvou proměnných. V našem případě půjde o napětí, proud a výkon v závislosti na osvětlení.

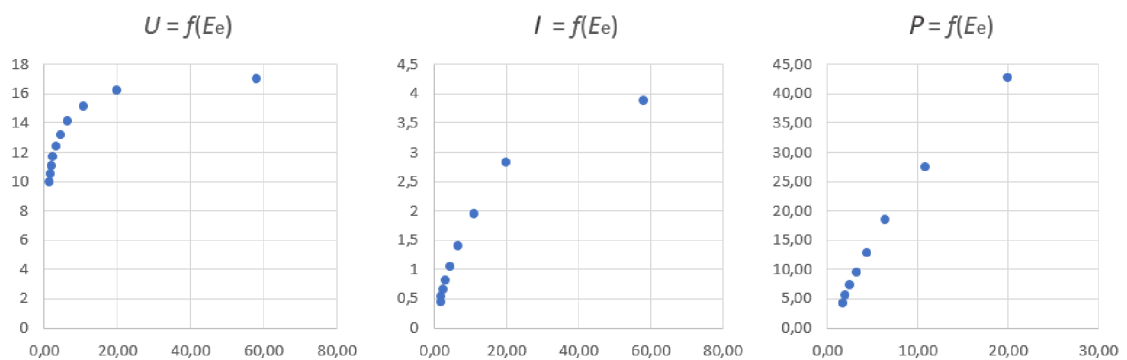
Z grafů plyne, že mezi maximální výkonem a osvětlením je téměř přímá úměra. Pokud osvětlení závisí na druhé mocnině vzdálenosti, tak na velmi podobné mocnině závisí i výkon. Protože je výkon součinem napětí a proudu, nemohou tyto dvě veličiny záviset obě dvě najednou na druhé mocnině vzdálenosti (pokud by jedna závisela na  $d^{-2}$ , druhá by musela záviset na  $d^{-1}$ ). Podle diagramů se závislosti  $d^{-2}$  blíží závislost proudu na osvětlení, napětí je sice s osvětlením korelováno, ale ne přímo úměrně. Závěrem tedy je, že na  $d^{-2}$  závisí pravděpodobně výkon a proud je více než napětí ovlivněn osvětlením. To lze ověřit měřením voltampérových charakteristik solárního panelu.

## **Měření VA charakteristik solárního panelu**

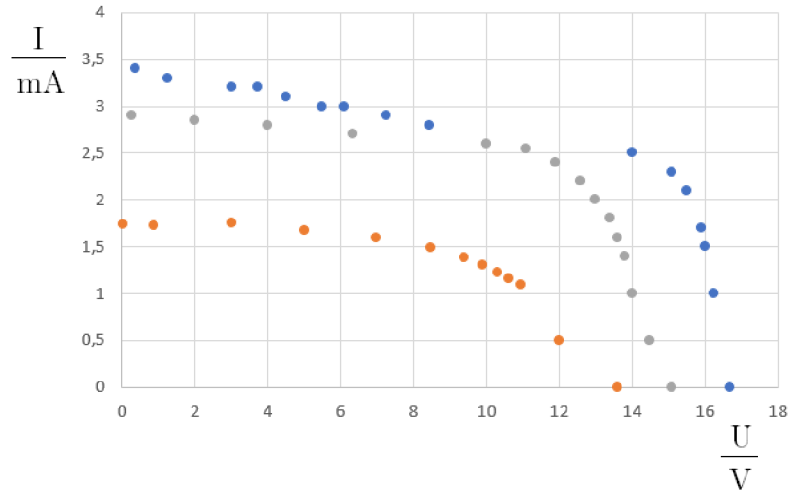
Pokud připojíme k solárnímu panelu reostat, můžeme změnou jeho odporu proměřit různé body voltampérové charakteristiky solárního panelu.



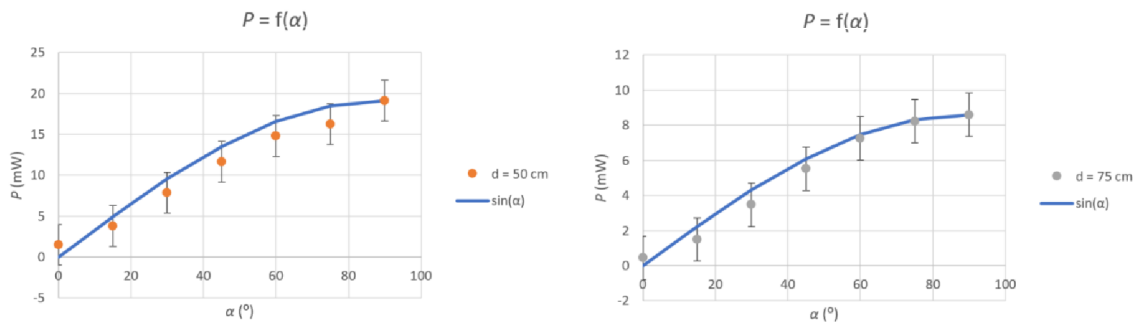
Obr. 2: Závislost osvětlení, napětí naprázdno, proudu nakrátko a maximálního výkonu na vzdálenosti.



Obr. 3: Korelační diagramy elektrických veličin



Obr. 4: VA charakteristiky solárního panelu



Obr. 5: Závislost maximálního výkonu v závislosti na úhlu dopadu paprsků

Výsledky pro tři různé vzdálenosti (tři různá osvětlení) jsou na obr. 4. Graf ukazuje, že napětí se skutečně s osvětlením příliš nemění, ale čím je panel dále od zdroje světla, tím nižšího proudu dosahuje. S tím se k nižším hodnotám posouvá i bod, kdy je dosaženo maximálního výkonu.

### Měření maximálního výkonu v závislosti na úhlu dopadu paprsků

Ve vzorci (1) je uvedena závislost podle funkce kosinus, přičemž se jedná o úhel mezi dopadajícími paprsky a normálou plochy. Pokud budeme měřit úhel solárního panelu vůči vodorovné podložce, bude závislost podle funkce sinus. Naměřená data včetně chybových úseček jsou na obr. 5, a to pro vzdálenost solárního panelu 50 a 75 cm od žárovky. Daty lze v Excelu snadno proložit funkcí sinus.

## **Závěr**

Popsané úlohy se mohou stát základem laboratorních prací na střední škole, případně příležitosti k ukázce toho, k čemu slouží korelační diagramy. Nelze opomenout ani to, že náš článek inspiruje odbornou veřejnost k návrhu vlastních měření, tak jako nás inspiroval článek [1].

# Literatura

- [1] Kos, J., Křížová, M. (2023). Napětí naprázdno fotovoltaického článku v závislosti na intenzitě ozáření. *Matematika–Fyzika–Informatika*, 32(1), 38–47. Získáno z <https://www.mfi.upol.cz/index.php/mfi/article/view/706>
  
- [2] Honsberg, Ch. a Bowden, S.: Effect of Light Intensity. *PVCEducation* [online], [cit. 2022-11-06]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-light-intensity>