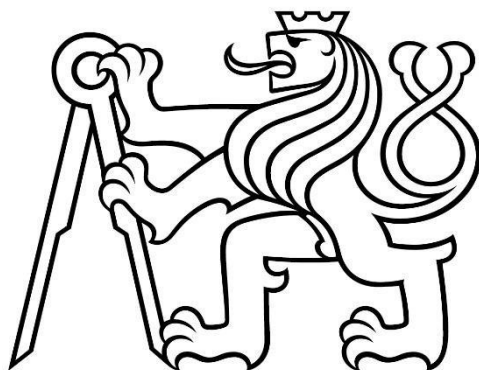


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



BAKALÁRSKA PRÁCA

Tenké vrstvy pro zlepšení zachytu světla solárních článků

Thin films for light capture enhancement of solar cells

Študijný program: Elektrotechnika, energetika a management

Študijný obor: Elektrotechnika a management

Vedúci práce: RNDr. Branislav Dzurňák, Ph.D.

Filip Olejko

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Olejko** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **483853**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Tenké vrstvy pro zlepšení zachytu světla solárních článků

Název bakalářské práce anglicky:

Thin films for light capture enhancement of solar cells

Pokyny pro vypracování:

Bakalářská práce je zaměřena na studium a přípravu fluorescenčních kolektorů na bázi organických barviv, pro využití ve fotovoltaice. Kolektory vykazují vysokou absorpci dopadajícího viditelného světla, jsou využívány jako světlovodný struktury a v kombinaci s konvenčními solárními články mohou vést k úspoře materiálů a snížení celkových nákladů.

Student v bakalářské práci zvládne přípravu vzorků barviv a jejich nanášení ve formě tenkých vrstev. Příprava vzorků bude doprovázena charakterizací různými spektroskopickými metodami, především fluorescenční spektroskopie. V ekonomické části student vypracuje srovnání materiálních nákladů pro výrobu konvenčních solárních článků s články obsahujícími fluorescenční kolektory, s ohledem na jejich účinnost.

Student splní následující cíle:

- vypracuje přehled současných materiálních nákladů pro výrobu fluorescenčního kolektoru a křemíkového solárního článku
- v experimentální části připraví vzorky fluorescenčních kolektorů, charakterizuje spektrální vlastnosti a vyhodnotí optické ztráty, především reabsorpci
- v ekonomické části porovná investiční a provozní náklady článků s fluorescenčním kolektorem a konvenčních křemíkových článků, analyzuje vliv optických ztrát na celkové investice
- navrhne optimální variantu fluorescenčního kolektoru pro křemíkové solární články

Seznam doporučené literatury:

- M. A. Green, Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications, UNSW Photovoltaics, 1986
- T. Markvart, L. Castaner, Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, Elsevier Science, 2003

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

RNDr. Branislav Dzurňák, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **26.01.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

RNDr. Branislav Dzurňák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prehlásenie

Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracoval samostatne a že som uviedol všetky použité informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o dodržovaní etických princípov prípravy vysokoškolských záverečných prác.

V Prahe dňa _____

Filip Olejko

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu svojej práce, pánovi RNDr. Branislavovi Dzurňákovi, Ph.D., za všetky odborné rady, ochotu a pomoc pri experimentoch. Ďalej ďakujem pani Ing. Blanke Kučerковой za užitočné poznámky k ekonomickej časti tejto práce. Pod'akovanie patrí tiež mojej rodine a kamarátom za stálu podporu v priebehu štúdia a počas písania tejto bakalárskej práce.

Abstrakt:

Bakalárska práca analyzuje konkrétny typ solárneho fluorescenčného koncentrátoru. V experimentálnej časti práce dôjde k vytvoreniu prototypu a k zmeraniu jeho optických vlastností. Dôraz sa kladie na zohľadnenie stratových mechanizmov, vrátane reabsorpcie. V ekonomickej časti je tento systém porovnaný s klasickým kremíkovým solárnym článkom. V závere sú optimalizované parametre koncentrátoru, vzhľadom na jeho odhadovanú obstarávaciu cenu.

Kľúčové slová:

Fluorescenčný solárny koncentrátor, reabsorpcia, kremíkový solárny článok, FV systém.

Abstract:

The bachelor thesis analyzes a specific type of solar fluorescent concentrator. In the experimental part, a prototype is created and the optical properties are measured. Emphasis is also placed on taking loss mechanisms into account, including reabsorption. In the economic part, this system is compared with a classic silicon solar cell. Finally, the parameters of the concentrator are optimized, with respect to its estimated purchase price.

Keywords:

Fluorescent solar concentrator, reabsorption, silicon solar cell, PV system.

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Teoretická časť	3
2.1 Príprava vrstvy	3
2.1.1 Základné chemické vlastnosti roztokov	3
2.1.2 Nanosenie vrstvy pomocou rotačného nanášania	3
2.2 Optické vlastnosti	4
2.2.1 Index lomu, Snellov zákon, absorpcia, fluorescencia	4
2.2.2 Optická účinnosť, reabsorpcia, účinnosť kolekcie	8
2.3 Charakterizácia solárneho článku.....	9
2.3.1 Energia fotónu, výkonová účinnosť, kvantová účinnosť.....	9
2.3.2 Princíp funkcie a voltampérová charakteristika solárneho článku	10
2.3.3 Štandardizované solárne spektrum	12
2.4 Analýza luminiscenčného solárneho koncentrátoru	13
2.4.1 Odraz pri dopadne svetla	13
2.4.2 Absorpcia fotónu, Stokesov posun, kvantový výťažok	13
2.4.3 Straty únikovým kužeľom a reabsorpciou.....	13
2.4.4 Účinnosť kolekcie pre LSK.....	14
2.4.5 Prúd nakrátko, napätie naprázdno, maximálny výkon pre LSK.....	15
3. Experimentálna časť.....	16
3.1 Príprava vrstvy	16
3.1.1 Príprava roztoku	16
3.1.2 Nanosenie roztoku	17
3.2 Merania.....	18
3.2.1 Meranie absorpčných spektier.....	18
3.2.2 Meranie fluorescencie a reabsorpcie	20
3.2.3 Meranie externej kvantovej účinnosti	26
3.2.4 Meranie voltampérovej charakteristiky	27
3.3 Optimalizácia parametrov LSK.....	28
3.3.1 Aproximácia absorptancie	28
3.3.2 Aproximácia reabsorpcie.....	29
3.3.3 Výpočet účinnosti LSK	32
3.3.4 Optimalizácia LSK.....	34
3.3.5 Zmena účinnosti LSK v čase.....	35
4. Ekonomická časť	36
4.1 Ekonomické ukazovatele.....	36
4.1.1 NPV a IRR.....	36

4.1.2 Rozdielová investícia	36
4.2 Obstarávacia cena FV systému.....	37
4.2.1 Zloženie obstarávacej ceny.....	37
4.2 Ekonomické porovnanie LSK a kremíkovej fotovoltaiiky	39
4.2.1 Prehľad súčasných materiálnych nákladov laboratórneho LSK a kremíkového článku	39
4.2.2 Náklady na modul LSK	42
4.2.3 Obstarávacia cena LSK systému	44
4.2.4 Zníženie optických strát s cieľom optimalizácie obstarávacej ceny LSK	50
Záver:	52
Použitá literatúra:	54
Zoznam použitých skratiek a symbolov:.....	57
Zoznam príloh:	62

1. Úvod

Luminiscenčný solárny koncentrátor (LSK) je lacný a jednoduchý druh optického systému, pomocou ktorého je snaha optimalizovať vlastnosti solárnych článkov. Bol skúmaný už v rokoch 1975 – 1985. [3] Teraz sa vďaka novým technológiám a potrebe nových energetických zdrojov, ktoré negatívne nezaťažujú životné prostredie, stáva opäť predmetom výskumu. Pracuje na princípe luminiscencie, konkrétne fluorescencie, pričom dochádza ku koncentrácii žiarenia z väčšej plochy na relatívne malú oblasť. Dopadajúci svetelný lúč je absorbovaný molekulami farbiva na povrchu LSK a náhodne vyžiarený vo viacerých smeroch ako fluorescenčné svetlo. Časť svetla unikne von, ďalšia časť je vedená pomocou totálneho odrazu k solárnemu článku. Oproti klasickým solárnym článkom by mohol poskytnúť úsporu financií, pretože na jeho výrobu by nemalo byť potrebné tak veľké množstvo nákladného materiálu.



Obr. 1.1: Historický vývoj ceny kremíkových FV (fotovoltaických) článkov od roku 1977 v amerických dolároch na watt. [1]

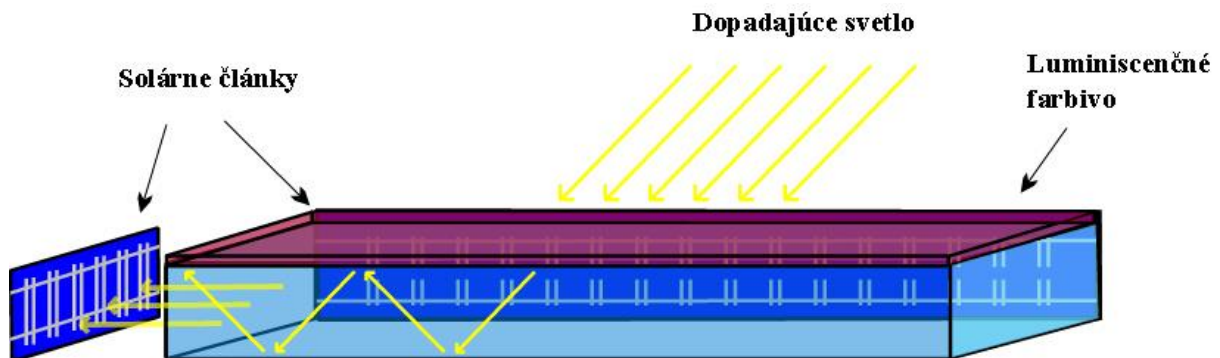
Výskum v oblasti LSK sa začal už v 80. rokoch minulého storočia. V tejto dobe bola cena FV článkov dosť vysoká (obr. 1.1). Rolu hral tiež pokles ceny ropy okolo roku 1985. Následkom toho sa znížil záujem o solárnu energiu v oblasti energetiky, pretože bola oproti iným alternatívam oveľa nákladnejšia. Rozvoj LSK prešiel do úzadia. Problémom bola tiež jeho nízka účinnosť.[2]

V súčasnej dobe sa obnovil záujem o LSK, pretože solárna energia poskytuje relatívne udržateľný zdroj pre výrobu elektrickej energie a v procese premeny energie nedochádza k vytváraniu skleníkových plynov. LSK by mali priniesť zníženie nákladov na výrobu solárnych systémov a tiež sa ponúka ich využitie v architektúre, pretože ich je možné vyrábať v rôznych tvaroch a farbách. [2]

Aké výhodné je použitie koncentrácie svetla závisí na charaktere dopadajúceho svetla (priame alebo rozptýlené), na vlastnostiach FV článku, na ktorý svetlo koncentrujeme, na vlastnostiach koncentrátoru a na možnostiach výroby ekonomicky efektívneho optického koncentračného systému. Klasické optické koncentračné systémy sú založené na reflexii a refrakcii svetla. Parabolické zrkadlá môžu dosahovať vysoké hodnoty koncentrácie, ale nutnosť umiestniť FV článok nad plochu, na ktorej odrážame svetlo, spôsobuje problémy pri zapuzdrení a chladení. Fresnelove šošovky sú menej citlivé na chyby vo výrobe a poruchy pri sledovaní svetla oproti parabolickým zrkadlám. Tiež je na nich môže dosahovať vysoké hodnoty koncentrácie. Je to však drahý typ optického systému, ktorý je limitovaný rozsahom uhlového poľa pre dopadajúce svetlo. [3]

LSK sú iným druhom optického koncentračného systému. Skladajú sa z platne z priehľadného materiálu s vysokým indexom lomu, ktorá vo svojom objeme obsahuje luminofóry schopné absorbovať veľkú časť slnečného spektra a reemitovať absorbované svetlo pri dlhších vlnových dĺžkach prostredníctvom fotoluminiscenčných procesov. Vďaka vysokému indexu lomu hostiteľskej matice je veľká časť emitovaných fotónov zachytená v doštičke a je vedená úplnými vnútornými odrazmi do oblastí, kde FV články menia zhromaždené svetlo na elektrickú energiu. [3]

V tejto práci je skúmaný nový druh LSK. Schematicky je popísaný pomocou obr. 1.2. Materiál platne bude tvoriť sklo. Na toto sklo bude nanosená tenká vrstva luminiscenčného (fluorescenčného) farbiva. Na bokoch koncentrátoru budú umiestnené kremíkové solárne články. Šírka a dĺžka LSK budú pre zjednodušenie rovnaké. Rozdiel oproti iným druhom LSK je v tom, že farbivo je nanášané na povrch a nie je priamo integrované do materiálu platne.



Obr. 1.2: Schematické znázornenie luminiscenčného solárneho koncentrátoru skúmaného v tejto práci.

2. Teoretická časť

2.1 Príprava vrstvy

V tejto kapitole bude poskytnutý nevyhnutný teoretický náhľad potrebný pri vytváraní a nanášaní luminiscenčnej vrstvy na povrch LSK.

2.1.1 Základné chemické vlastnosti roztokov

Ak chceme vyjadriť mieru množstva látky v zmesi používame veličinu koncentrácia. Taktiež je možné pre popis použiť látkovú koncentráciu (c), ktorá vyjadruje pomer látkového množstva vybranej látky v danom objeme zmesi. Matematicky to môžeme vyjadriť vzťahom: [4]

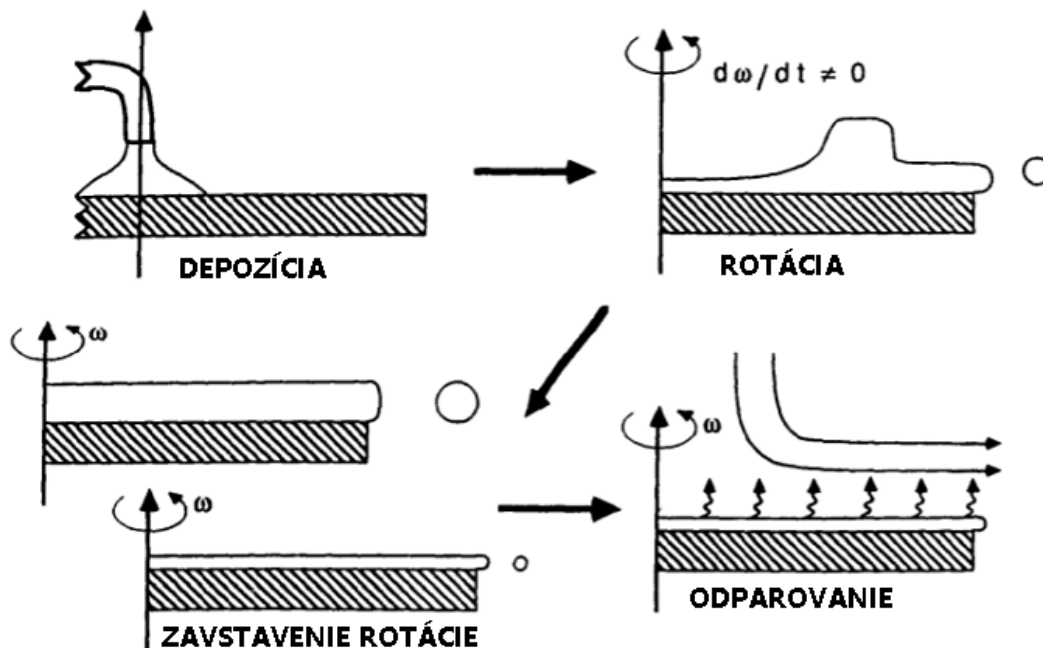
$$c = \frac{n_A}{V} = \frac{m_A}{M_A \cdot V} \quad (\text{mol/l}) \quad (2.1),$$

kde n_A je látkové množstvo zložky A (mol), V je celkový objem zmesi (l), M_A je molárna hmotnosť zložky A (g/mol) a m_A je hmotnosť zložky A (g). V praxi sa používa aj jednotka M (molar), pričom 1 mol/l odpovedá 1 M. [4]

Tento teoretický popis nám pomôže pri charakterizácii prípravy roztoku nanášaného farbiva.

2.1.2 Nanesenie vrstvy pomocou rotačného nanášania

Jednou z možností ako naniest' vrstvu chemického roztoku na povrch tenkého disku (skla) je metóda rotačného nanášania (spin coating). Názorný popis vidíme na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Štádia procesu rotačného nanášania. [5]

Pri tomto procese najskôr dochádza k naneseniu definovaného množstva roztoku na povrch podložky. Tá je prichytená (napríklad pomocou podtlaku) a dochádza k rotácii. Nastavením rýchlosti otáčok, prípade zmenou smeru otáčania je možné ovplyvniť hrúbku a homogenitu rozloženia nanášaného farbiva. Táto metóda sa používa aj pri nanášaní farbiva roztoku na povrch LSK.

2.2 Optické vlastnosti

V tejto kapitole budú popísané a zavedené niektoré optické vlastnosti, ktorými môžeme popísať chovanie látky predovšetkým pri interakciách so svetlom. Táto charakterizácia bude dôležitá pre ujasnenie niektorých fyzikálnych pojmov, pretože s nimi budeme neskôr pri popise LSK pracovať. Najskôr budú definované základné spektroskopické veličiny, neskôr sa budeme zaoberať vlastnosťami typickými pre solárne koncentrátoary.

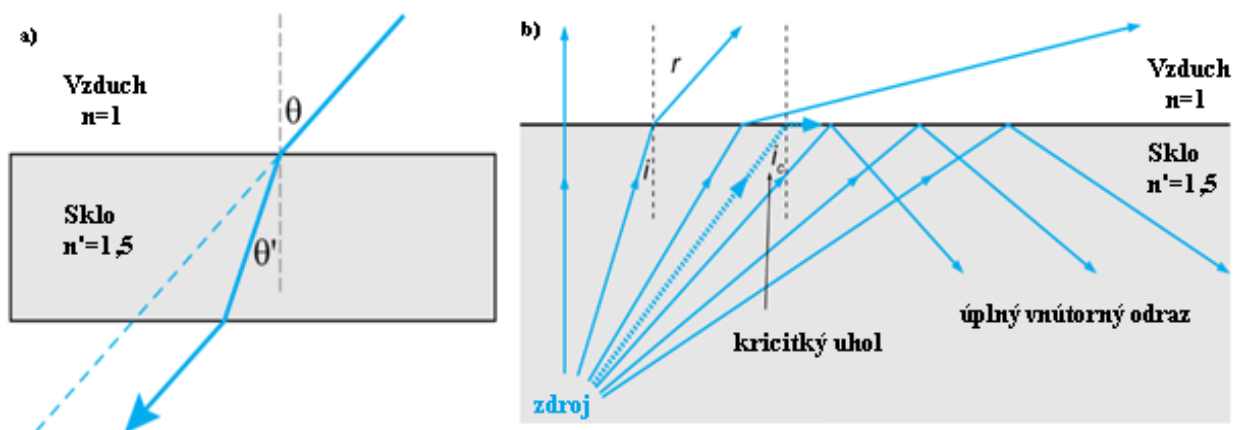
2.2.1 Index lomu, Snellov zákon, absorpcia, fluorescencia

V prvej časti sa budeme zaoberať popisom a definíciou niektorých základných spektroskopických veličín.

Prvou z nich je indexom lomu. Určujeme ním optické vlastnosti prostredia, v ktorom sa šíri elektromagnetické vlnenie. Pri prechode svetla medzi prostrediami s rozdielnym indexom lomu dochádza k miernej zmene rýchlosti šírenia svetla. To spôsobí aj zmenu jeho smeru (obr. 2.2 a)). Časť svetla sa odrazí a časť putuje cez rozhranie. Tento jav popisuje Snellov zákon. [6]

$$n \sin(\theta) = n' \sin(\theta') \quad (2.2),$$

kde n je index lomu prostredia, z ktorého lúč prichádza, θ je uhol dopadu na rozhranie, n' je index lomu prostredia, do ktorého lúč dopadá a θ' je uhol pod ktorým sa lúč zlomí.



Obr. 2.2: a) Snellov zákon, b) znázornenie kritického uhla a úplného vnútorného odrazu. [6]

S meniacim sa dopadajúcim uhlom θ sa mení aj uhol lomu θ' . Pre $n > n'$ môžeme nájsť dopadajúci uhol θ_c taký, že $\theta' = 90^\circ$. Tento uhol tiež nazývame kritický. Ak bude v tejto situácii $\theta > \theta_c$, bude dochádzať k úplnému vnútornému odrazu (obr. 2.2 b)).[6]

Kritický uhol teda z rovnice (2) môžeme určiť ako:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n'}{n}\right) (^\circ) \quad (2.3)$$

Ak uvažujeme, že vonkajším prostredím je vzduch, potom platí:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right) (^\circ) \quad (2.4)$$

Okrem indexu lomu je v optike dôležitý aj popis absorpcie žiarenia. Týmto pojmom sa rozumie proces, pri ktorom chemické zložky transparentného prostredia selektívne znižujú intenzitu určitých frekvencií elektromagnetického žiarenia. Využitie absorpčných metód v kvantitatívnej analýze je založené na meraní rozsahu absorpcie žiarenia vyjadreného veličinami, ako sú transmitancia a odvodené veličiny (absorbancia a absorptancia). V absorpčných metódach absorbujúce látky charakterizuje absorpčné spektrum, čo je závislosť niektorej funkcie miery zoslabenia žiarenia (napr. transmitancie, absorbancie alebo logaritmu absorbancie) od vlnovej dĺžky, frekvencie alebo vlnového čísla. [7]

Transmitancia (priepustnosť) T_{ζ} je definovaná pomerom výstupného žiarivého toku (Φ) k vstupujúcemu žiarivému toku (Φ_0): [7]

$$T_{\zeta} = \frac{\Phi}{\Phi_0} \quad (-) \quad (2.5)$$

Absorptancia A je podiel absorbovaného žiarivého toku (Φ_a) k vstupujúcemu žiarivému toku (Φ_0): [7]

$$A = \frac{\Phi_a}{\Phi_0} \quad (-) \quad (2.6)$$

Odrazivosť (reflektancia) R je definovaná podielom odrazeného žiarivého toku (Φ_R) ku vstupujúcemu žiarivému toku (Φ_0): [11]

$$R = \frac{\Phi_R}{\Phi_0} \quad (-) \quad (2.7)$$

Pre popis látok sa okrem absorptancie (A) používa aj absorbancia (B). Je definovaná vzťahom: [7]

$$B = \log \frac{\Phi_0}{\Phi} = -\log(T_{\zeta}) \quad (-) \quad (2.8)$$

Pre vstupujúci žiarivý tok Φ_0 teda platí:

$$\Phi_0 = \Phi + \Phi_a + \Phi_R \quad (W) \quad (2.9)$$

Po vydelení Φ_0 dostávame:

$$1 = T_{\zeta} + A + R \quad (-) \quad (2.10)$$

Transmitancia aj absorbancia vzorky sa menia s vlnovou dĺžkou žiarenia a závisia od počtu absorbujúcich častíc v dráhe lúča (koncentrácia častíc) a od hrúbky vrstvy, cez ktorú lúč prechádza. Vzťah medzi látkovou koncentráciou (c), hrúbkou vrstvy (d) a výstupným žiarivým tokom (Φ), pri určitej vlnovej dĺžke, matematicky vyjadruje Lambert-Beerov zákon: [7]

$$\Phi = \Phi_0 \cdot 10^{-\varepsilon \cdot c \cdot d} \quad (W) \quad (2.11),$$

kde Φ je výstupný žiarivý tok pre danú vlnovú dĺžku (W), Φ_0 je vstupujúci žiarivý tok pre danú vlnovú dĺžku (W), ε je molový absorpčný koeficient ($dm^3 \cdot cm^{-1} \cdot mol^{-1}$), c je látková koncentrácia absorbujúcej zložky ($mol \cdot dm^{-3}$), d je dĺžka lúča vo vzorke - hrúbka vrstvy (cm). [7]

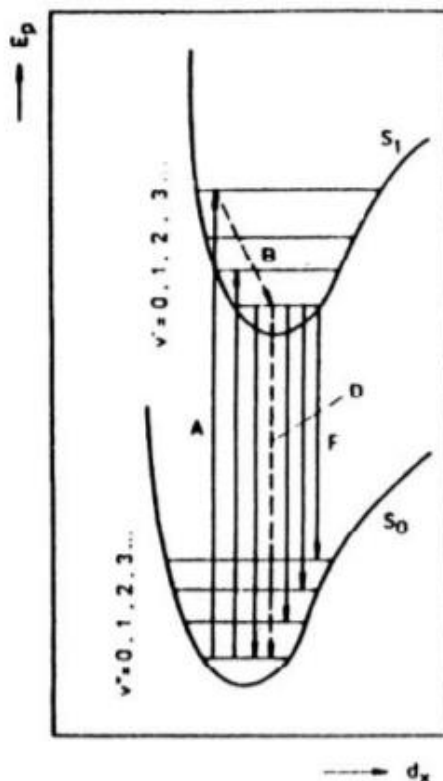
Po úprave vzťahu (2.8) môžeme absorbanciu vyjadriť ako: [7]

$$B = \varepsilon \cdot c \cdot d \quad (-) \quad (2.12)$$

Uvedený zákon platí pre monochromatické žiarenie. Taktiež treba uvažovať len zriedené roztoky, v ktorých absorbujúce častice nepodliehajú žiadnym vzájomným interakciám. [7]

Kľúčovou vlastnosťou molekúl je fluorescencia. Označujeme ňou proces, pri ktorom dochádza k emisii absorbovaného svetla (elektromagnetického žiarenia). [8] Ide o druh luminiscencie, pri ktorom je doba dosvitu od 10^{-8} sekundy do 10^{-4} sekundy. Dosvit je čas, ktorý uplynie od konca budiaceho impulzu do vyhasnutia luminiscencie. [7]

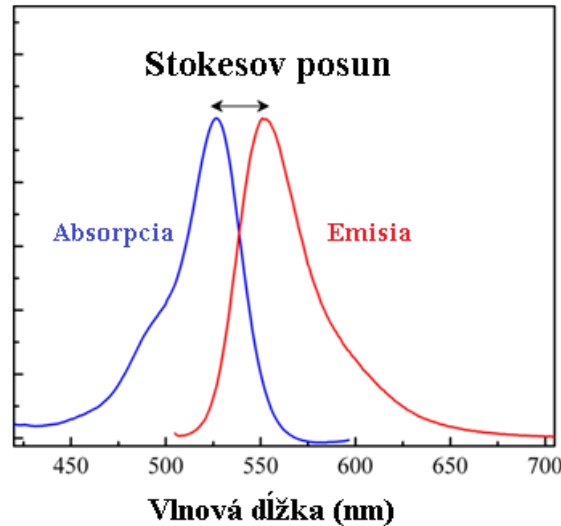
Na vznik luminiscenčného spektra je potrebná excitácia molekúl zo základnej elektrónovej hladiny (na ktorej je za bežných podmienok väčšina molekúl) na niektorú vyššiu elektrónovú hladinu pôsobením žiarivej energie - absorpciou žiarenia vhodnej frekvencie. Potom nastáva (v čase asi 10^{-12} s) proces vibračnej relaxácie, kedy sa všetky molekuly na hladinách s energiou vyššou, než je energia najnižšej hladiny presunú na túto novú základnú hladinu. Tento proces je sprevádzaný stratami energie. Následne dochádza k vyžiareniu fluorescenčného kvanta a prechodu z novej základnej hladiny na pôvodné vibračné, či rotačné hladiny, základného elektrónového stavu. Celý proces popisuje obr. 2.3. [7]



Obr. 2.3: Znážornenie vzniku fluorescencie. [7]

A - proces absorpcie žiarenia, B, C - bezradičný rozptyl vibračnej energie (relaxácia), D - bezradičný prechod do základného elektrónového stavu, F - fluorescenčné žiarenie, E_p - potenciálna energia, d_x - súradnica medziatómovej vzdialenosti

Absorpčný a fluorescenčný proces sú charakterizované dvoma druhmi spektra - excitačným (absorpčným) a fluorescenčným (emisným) spektrom (obr. 2.4). Fluorescenčné spektrum je závislosť žiarivého toku fluorescencie od vlnovej dĺžky, resp. frekvencie či vlnového čísla emitovaného fluorescenčného žiarenia. Je jednou z fyzikálnych charakteristík danej látky a je dôležité z hľadiska kvalitatívnej charakteristiky látky. [7] Vo väčšine prípadov, dochádza k posunu absorbovaného spektra k vyšším vlnovým dĺžkam a teda emitované žiarenie má nižšiu energiu. Tomuto posuvu sa hovorí Stokesov posun. [8]



Obr. 2.4: Stokesov posun pri fluorescenciách. [9]

Parameter, ktorým je možné určiť účinnosť fluorescencie sa nazýva kvantový výťažok (quantum yield). Určíme ho vzťahom: [8]

$$Q_y = \frac{\text{počet emitovaných fotónov}}{\text{počet absorbovaných fotónov}} \quad (-) \quad (2.13)$$

Fluorescenčný žiarivý tok (Φ_F) môžeme určiť ako: [7]

$$\Phi_F = (\Phi_0 - \Phi) \cdot Q_y \quad (W) \quad (2.14)$$

Pre zistenie závislosti Φ_F na koncentráciách, dosadíme za Φ z Lambert-Beerovho zákona: [7]

$$\Phi_F = (\Phi_0 - \Phi_0 \cdot 10^{-\varepsilon \cdot c \cdot d}) \cdot Q_y \quad (W) \quad (2.15)$$

Po úprave $10^{-\varepsilon \cdot c \cdot d} = e^{-2,3 \cdot \varepsilon \cdot c \cdot d}$ a rozvoji do mocninového radu prvého stupňa dostaneme: [7]

$$e^{-2,3 \cdot \varepsilon \cdot c \cdot d} = 1 - 2,3 \cdot \varepsilon \cdot c \cdot d \quad (2.16)$$

Ak túto aproximáciu dosadíme do rovnice (12) môžeme písať: [7]

$$\Phi_F = \Phi_0 \cdot Q_y \cdot 2,3 \cdot \varepsilon \cdot c \cdot d \quad (W) \quad (2.17)$$

Vidíme teda, že pre málo zriedené roztoky je fluorescencia priamo úmerná koncentráciám. Pre vyššie koncentrácie musíme použiť nezjednodušený vzťah.

2.2.2 Optická účinnosť, reabsorpcia, účinnosť kolekcie

V druhej podkapitole popisujúcej optické vlastnosti, budú definované vlastnosti typické pre solárne koncentrátoary, ktorým je aj LSK.

Prvou veličinou je optická účinnosť. Pre solárne koncentrátoary ju definujeme vzťahom: [3]

$$\eta_{opt} = \frac{N_{out} \cdot A_{out}}{N_{in} \cdot A_{in}} \quad (-) \quad (2.18),$$

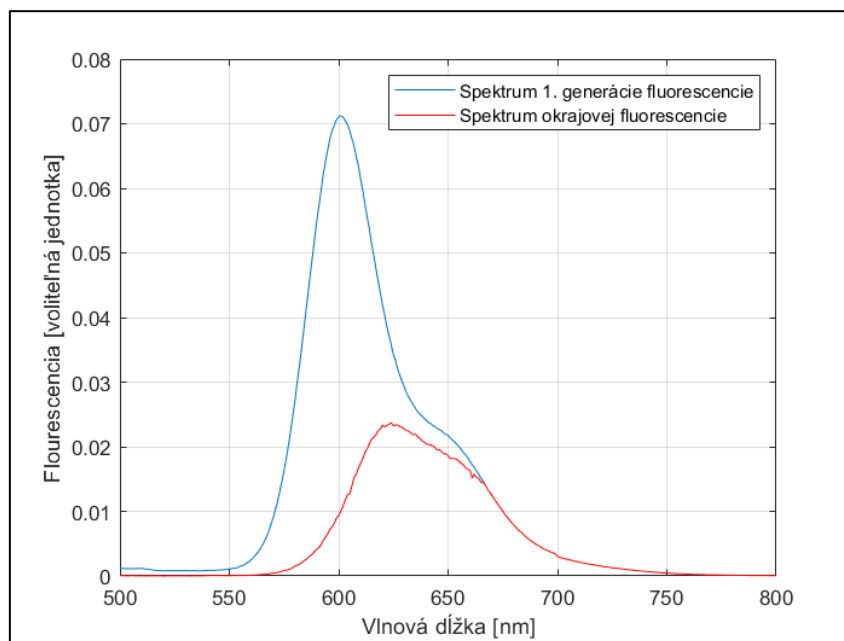
kde N_{in} označuje počet dopadnutých fotónov, N_{out} označuje počet zhromaždených fotónov, A_{in} označuje vstupnú plochu koncentrátoaru, A_{out} označuje výstupnú plochu koncentrátoaru.

Charakteristický proces pre LSK je reabsorpcia alebo tiež samoabsorpcia. Pri tomto jave dochádza k opätovnému absorbovaniu už vyžiareného fotónu. Tento dej nastáva v molekulách, ktorých absorpčné a emisné spektrum sa prekrývajú (obr. 2.4). Tento efekt bol pozorovaný v tekutinách ako sekundárna emisia. [10]. Reabsorpciu (r) môžeme pre LSK určiť ako: [12]

$$r = \frac{\text{plocha pod grafom 1. generácie fluorescence} - \text{plocha pod grafom okrajovej fluorescence}}{\text{plocha pod grafom 1. generácie fluorescence}} \quad (2.19),$$

kde grafom 1. generácie rozumieme spektrum fluorescence s nulovou reabsorpciou a grafom okrajovej fluorescence budeme rozumieť spektrum fluorescence zmeranej na okraji LSK.

Pri výpočte reabsorpcie je potrebné nanormovať spektrum okrajovej fluorescence tak, aby sa v oblastiach vyšším vlnových dĺžok prekrývalo so spektrom 1. generácie, pretože v tejto oblasti je pravdepodobnosť opätovnej reabsorpcie veľmi nízka (obr. 2.5).



Obr. 2.5: Normovanie spektra okrajovej fluorescence. [12]

V praxi za graf 1. generácie fluorescence môžeme považovať spektrum fluorescence namerané zo zmesi s veľmi nízkou koncentráciou farbiva. [12]

Ďalším parametrom používaným pre popis systémov, ktoré sa zameriavajú na zber svetla je účinnosť kolekcie (collection efficiency). Udáva pomer počtu emitovaných fotónov z kolektoru (N_e) ku počtu fotónov vstupujúcich do kolektoru (N_{abs}). [12]

$$Q_c = \frac{N_e}{N_{abs}} \quad (-) \quad (2.20)$$

2.3 Charakterizácia solárneho článku

Na začiatku tejto kapitoly budú uvedené niektoré základné vzťahy pre popis svetla a výkonovej účinnosti. Následne bude vysvetlený princíp funkcie klasického solárneho článku a uvedené vzťahy pre jeho popis. Nakoniec budú uvedené dva základné typy štandardizovaného solárneho spektra.

2.3.1 Energia fotónu, výkonová účinnosť, kvantová účinnosť

Pre ďalšie úvahy bude potrebné poznať vzťah pre výpočet energia fotónu. Tá je definovaná ako: [13]

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c_l}{\lambda} \text{ (J)} \quad (2.21),$$

kde h predstavuje Planckovu konštantu (J·s), f je frekvencia (Hz), c_l je rýchlosť svetla (m·s⁻¹), λ je vlnová dĺžka (m). [13]

Dôležitý je tiež vzťah pre výkonovú účinnosť: [3]

$$\eta_P = \frac{I_{out} \cdot A_{out}}{I_{in} \cdot A_{in}} \quad (-) \quad (2.22),$$

kde I_{in} označuje výkon dopadajúci na plochu koncentrátoru (W·m⁻²), I_{out} označuje výkon vyžiarený z plochy koncentrátoru (W·m⁻²), A_{in} označuje vstupnú plochu koncentrátoru, A_{out} označuje výstupnú plochu koncentrátoru.

Kvantová účinnosť je veličina popisujúca vlastnosti solárnych článkov. Rozlišujeme dva typy kvantovej účinnosti, externú a internú.

Externá kvantová účinnosť (*EQE*) je daná pomerom počtu nosičov náboja zhromaždených solárnym článkom ku počtu fotónov, ktoré dopadajú na solárny článok. [14]

$$EQE = \frac{\text{počet elektrónov/sec}}{\text{počet fotónov/sec}} \quad (-) \quad (2.23)$$

Interná kvantová účinnosť (*IQE*) je daná pomerom počtu nosičov náboja zhromaždených solárnym článkom ku počtu fotónov, ktoré dopadajú na solárny článok a sú článkom absorbované. [14]

$$IQE = \frac{\text{počet elektrónov/sec}}{\text{počet absorbovaných fotónov/sec}} \quad (-) \quad (2.24)$$

2.3.2 Princíp funkcie a voltampérová charakteristika solárneho článku

Základným princípom FV článku je fotoelektrický jav, pri ktorom sú elektróny uvoľňované z látky v dôsledku absorpcie elektromagnetického žiarenia látkou. Absorpcia je spôsobená interakciou svetla (fotónmi) s časticami hmoty (elektrónmi a jadrami). Pre funkciu FV článku je zásadné, aby fotón uvoľnil v látke elektrón a vznikol pár elektrón-diera. Pre tento účel sa využívajú polovodiče, v ktorých sú elektróny a diery separované vnútorným elektrickým poľom PN prechodu. Aby mohla FV premena prebiehať, musia byť splnené nasledujúce podmienky: [18]

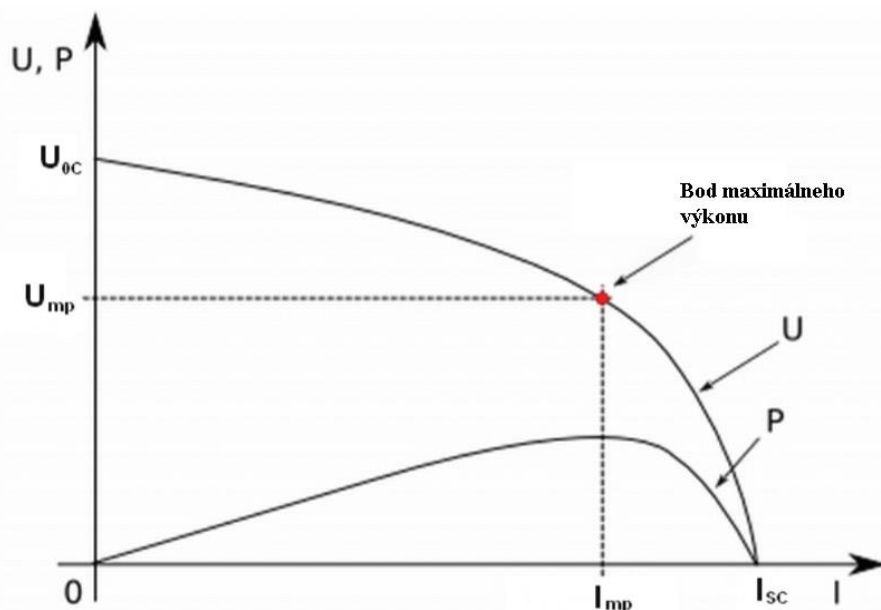
- fotón musí byť pohltý,
- fotón musí excitovať elektrón do vyššieho vodivostného pásu,
- vzniknutá dvojica elektrón (-) – diery (+) musí byť separovaná, aby nedošlo k rekombinácií
- oddelené náboje sú následne vedené k spotrebiču. [18]

Voltampérová charakteristika podáva základné informácie o činnosti FV článkov. [18] Môžeme ju popísať vzťahom: [20]

$$I = I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U}{N \cdot k_B \cdot T}} - 1 \right) - I_L \quad (A) \quad (2.25),$$

kde I_L predstavuje prúd generovaný svetlom, ktoré dopadá na solárny článok (A), I_0 je saturačný prúd v záverom smere (A), U je napätie privedené na svorky solárneho článku (V), q je elementárny elektrický náboj (C), k_B je Boltzmannova konštanta ($J \cdot K^{-1}$), T je termodynamická teplota (K) a N je faktor ideality solárneho článku (-). [20]

Hraničné veličiny na voltampérovej charakteristike (obr. 2.6) sú napätia naprázdno (U_{oc}) a prúd nakrátko (I_{sc}). Napätie naprázdno predstavuje maximálne napätie na článku, ktorého je možné dosiahnuť v prípade, že k článku nie je pripojený žiadny spotrebič. Prúd nakrátko predstavuje maximálny prúd (skratový prúd), ktorý môže solárny článok pri danej intenzite slnečného žiarenia dodávať. [18]



Obr. 2.6: Voltampérová a výkonová charakteristika solárneho článku. [18]

Výkon solárneho článku určíme ako súčin prúdu a napätia. Pre každý solárny článok existuje pracovný bod na charakteristike, v ktorom je výkon najväčší. Tento bod je označovaný ako bod maximálneho výkonu s napätím U_{mp} a prúdom I_{mp} . Výkon určitého FV článku (P) závisí na ožiarení, na spektre svetla, ktorým je ožiarený a na teplote článku. Pre maximálny výkon FV článku môžeme písať rovnicu: [18]

$$P_m = U_{mp} \cdot I_{mp} \text{ (W)} \quad (2.26)$$

Činiteľ plnenia (FF – Fill Factor) a účinnosť sú ďalšími dôležitými parametrami charakterizujúcimi FV článok. Činiteľ plnenia je definovaný vzťahom: [18]

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \text{ (-)} \quad (2.27)$$

Pre určenie hodnoty činiteľa plnenia je tiež možné zaviesť empirický vzťah: [24]

$$FF = \frac{u_{oc} - \ln(u_{oc} + 0,72)}{u_{oc} + 1} \text{ (-)} \quad (2.28),$$

kde u_{oc} je normované napätia naprázdno definované ako: [24]

$$u_{oc} = \frac{q}{N \cdot k_B \cdot T} U_{oc} \text{ (-)} \quad (2.29)$$

Účinnosť FV článku určíme podielom maximálneho výkonu a výkonu dopadajúceho slnečného žiarenia (P_{in}). [18]

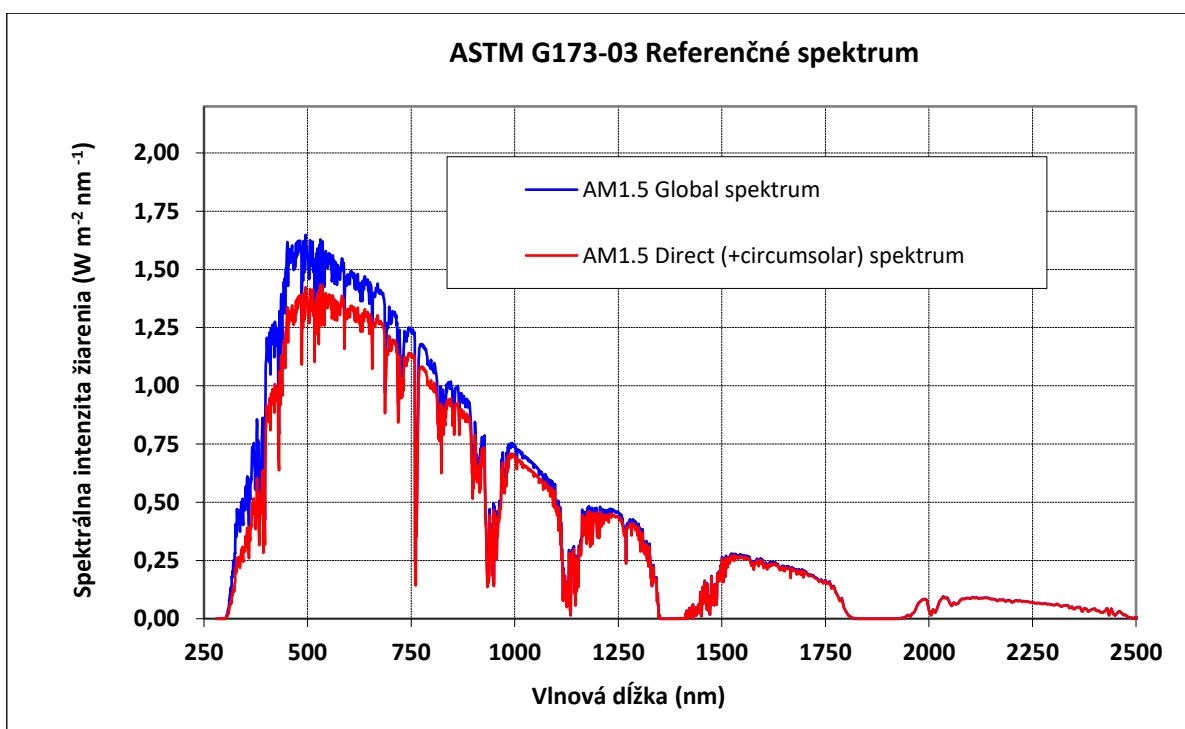
$$\eta_{Si \text{ cell}} = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} \text{ (-)} \quad (2.30)$$

Meranie voltampérovej charakteristiky solárneho článku bežne prebieha pri štandardizovanom solárnom spektre. Tým sa budeme zaoberať v nasledujúcej kapitole.

2.3.3 Štandardizované solárne spektrum

Množstvo slnečného žiarenia dopadajúceho na zemský povrch sa s časom a konkrétnym miesto na zemi mení. Štandardizované referenčné spektrá sú definované tak, aby umožňovali porovnanie výkonu FV zariadení od rôznych výrobcov a výskumných laboratórií. Používajú sa dva štandardy (obr. 2.7). AM1.5 Global je spektrum určené pre ploché moduly a jeho integráciou cez všetky vlnové dĺžky dostaneme intenzitu žiarenia 1000 W/m^2 . AM1.5 Direct (+circumsolar) je spektrum určené pre prácu s konvenčnými solárnymi koncentrátormi, ktoré používajú napríklad parabolické zrkadlá a teda sú schopné koncentrovať len priame žiarenie. Integráciou cez všetky vlnové dĺžky dostaneme intenzitu žiarenia 900 W/m^2 . [16]

LSK je výhodný v tom, že je schopný okrem priameho žiarenia koncentrovať aj rozptýlené žiarenie. Preto preň budeme používať referenčné spektrum AM1.5 Global.



Obr. 2.7: Štandardizované solárne spektrum ASTM G173-03. [17]

2.4 Analýza luminiscenčného solárneho koncentrátoru.

V úvode bol popísaný princíp funkcie LSK. Teraz sa budeme zaoberať základnými stratovými mechanizmami, ktorými je zaťažená koncentrácia svetla pri použití LSK. Následne prepojíme LSK a kremíkový solárny článok a uvedieme vzťah pre prúd nakrátko, napätie naprázdno a maximálny výkon dodávaný celým systémom.

2.4.1 Odraz pri dopadne svetla

Pri dopade svetlého lúča na povrch LSK dochádza k jeho lomu. Časť lúča sa od povrchu odrazí a ďalšia časť prechádza. Tento dej je možné všeobecne popísať Fresnelovými vzťahmi [10]. Pre kolmo dopadajúci svetelný lúč platí po zjednodušení rovnica: [19]

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (-) \quad (2.31)$$

Z tej pre $n_1 = 1$ (vzduch) a $n_2 = 1,49$ (polymetylmakrylát (PMMA)) dostávame hodnotu $R = 0,04$. To znamená, že pri kolmom dopade lúča na povrch LSK sa 4 % dopadnutého lúča odrazí. [3]

2.4.2 Absorpcia fotónu, Stokesov posun, kvantový výťažok

Časť fotónov, ktorá prenikne do vnútra LSK je s určitou pravdepodobnosťou absorbovaná časticami umožňujúcimi fluorescenciu. Táto pravdepodobnosť je vyjadrená absorpčným spektrom LSK. Pri fluorescencii dochádza k vibračnej relaxácii a posunu vlnovej dĺžky fotónu k dlhším vlnovým dĺžkam a tým aj k zníženiu jeho energie. Berieme tiež do úvahy, že nie všetky absorbované fotóny sú aj emitované (popis kvantovým výťažkom (Q_v)).

2.4.3 Straty únikovým kužeľom a reabsorpciou

Po emisií svetla výsledkom fluorescencie, zostáva časť svetla zachytená vo vnútri LSK, zatiaľ čo podstatná časť je stratená. Ak fotón dopadne na vnútorné rozhranie LSK pod uhlom väčším než kritickým (θ_c), je totálnym odrazom vedený k okraju LSK. V opačnom prípade opúšťa koncentrátor cez únikový kužeľ (escape cone). [3] Index lomu PMMA a skla sú približne rovnaké. Preto neuvažujeme, že by pri prechode medzi farbivom a sklom dochádzalo k odrazu.

Za predpokladu plochej geometrie a vonkajšieho prostredia vzduchu (LSK spĺňa), môžeme straty únikovým kužeľom (P_E) vyjadriť ako: [10]

$$P_E = 1 - \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (-) \quad (2.32)$$

Pre hodnotu $n = 1,49$ (PMMA) dostávame $P_E = 0,26$. [10]

Ďalším stratovým mechanizmom je reabsorpcia. Tá nastáva, pretože s rastúcou koncentráciou častíc umožňujúcich fluorescenciu a rozmermi LSK rastie pravdepodobnosť opätovnej absorpcie už raz vyžiarených fotónov. Pri opätovnej emisií fotónov vplyvom fluorescencie, dochádza k ich vyžiareniu do náhodného smeru a teda časť z nich s určitou pravdepodobnosťou opúšťa LSK cez únikový kužeľ.

2.4.4 Účinnosť kolekcie pre LSK

Už bolo uvedené, že účinnosťou kolekcie (Q_c) rozumieme pomer počtu emitovaných fotónov z kolektoru ku počtu fotónov vstupujúcich do kolektoru. Pre LSK ju môžeme pomocou pravdepodobnosti reabsorpcie (r), stratami únikovým kužeľom (P_E) a kvantovým výťažkom (Q_y) vyjadriť ako: [10]

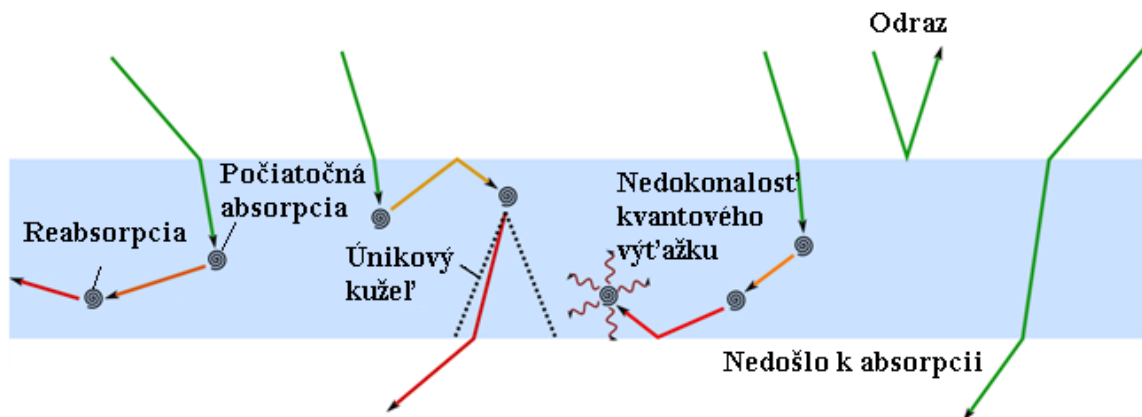
$$Q_C = (1 - r)(1 - P_E) \cdot Q_y + (1 - r)(1 - P_E) \cdot Q_y \cdot (1 - P_E) \cdot r \cdot Q_y + \dots (-) \quad (2.33)$$

$$+ (1 - r)(1 - P_E) \cdot Q_y \cdot ((1 - P_E) \cdot r \cdot Q_y)^2 + \dots (-)$$

Tento vzťah dostaneme, ak nebudeme uvažovať straty pri rozptyle svetla v dôsledku nehomogenity materiálu a neúplný vnútorný odraz kvôli drsnosti povrchu. Taktiež uvažujeme, že nedochádza k reabsorpcii fotónov, ktoré sa nachádzajú vo vnútri únikového kužeľa. Tento predpoklad vyplýva z veľmi malej hrúbky nanášanej fluorescenčnej vrstvy. Prvý člen uvedeného vzťahu (2.33) vyjadruje emisné spektrum 1. generácie. V ďalších členoch je opakovane zahrnutý vplyv reabsorpcie. Tento výraz je geometrickým radom s kvocientom $(1 - P_E) \cdot r \cdot Q_y$. Výsledný vzťah pre Q_c dostávame súčtom tohto geometrického radu: [10]

$$Q_C = \frac{(1-r)(1-P_E) \cdot Q_y}{1 - Q_y \cdot (1-P_E) \cdot r} (-) \quad (2.34)$$

Grafické znázornenie nami uvažovaných stratových mechanizmov pre LSK vidíme na obr. 2.8.



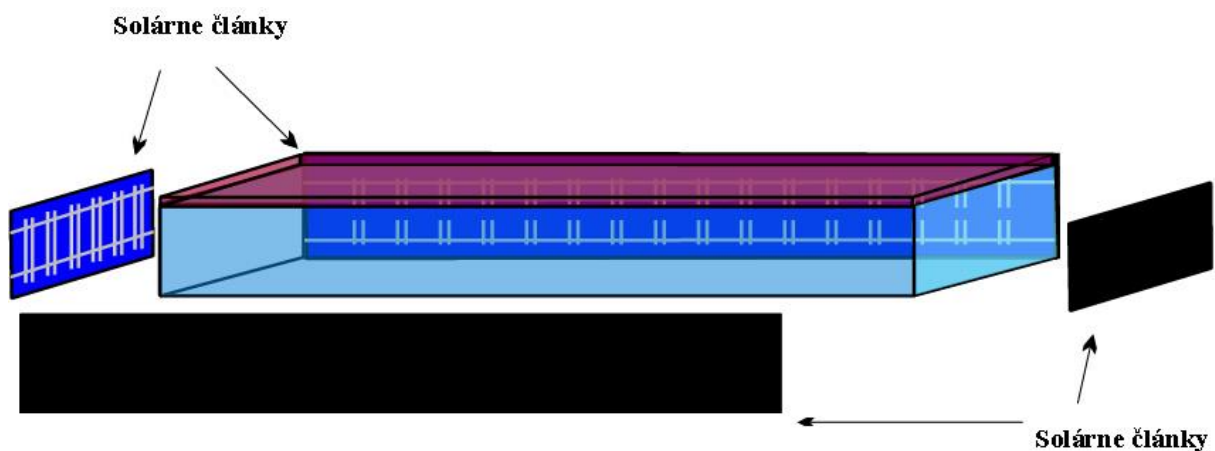
Obr. 2.8: Znázornenie stratových mechanizmov pre LSK. [20]

2.4.5 Prúd nakrátko, napätie naprázdno, maximálny výkon pre LSK

Podľa konkrétneho prevedenia LSK je možné stanoviť maximálny výstupný prúd dodávaný solárnym článkom umiestneným na jeho okraji. Uvažujeme, že použitím antireflexnej vrstvy (AR), by malo byť možné minimalizovať odraz svetla od povrchu LSK. Pre prípad LSK hranolovitého tvaru so štyrmi solárnymi článkami umiestnenými na jeho okrajoch môžeme maximálny prúd dodávaný jedným solárnym článkom (I_{LC}) určiť vzťahom:

$$I_{LC} = L^2 \cdot N_D \cdot A_A \cdot Q_{CA} \cdot \frac{1}{4} \cdot EQE_A \cdot q \quad (A) \quad (2.35),$$

kde L je rozmer hrany LSK (m), N_D reprezentuje počet dopadajúcich fotónov v absorpčnom intervale (-), A_A je priemerná hodnota absorptancie v absorpčnom intervale (-), EQE_A je priemerná hodnota externej kvantovej účinnosti v intervale, v ktorom dochádza k fluorescencii (-), q je hodnota elementárneho elektrického náboja (C). Faktor $\frac{1}{4}$ vyjadruje rovnomerné rozdelenie dopadajúcich fotónov medzi štyri priložené solárne články.



Obr. 2.9: Schematické znázornenie LSK spolu so solárnymi článkami.

Hodnotu napätia medzi svorkami solárneho článku U môžeme určiť zo vzťahu (2.25) ako:

$$U = \frac{N \cdot k_B \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{LC} + I}{I_0} + 1 \right) \quad (V) \quad (2.36)$$

Z voltampérovej charakteristiky solárneho článku (obr. 2.6) vidíme, že pre hodnotu napätia naprázdno solárneho článku, je prúd prechádzajúci článkom nulový. Zo vzťahu (2.36) teda môžeme pre tejto prípad hodnotu napätia naprázdno (U_{OC}) stanoviť ako:

$$U_{OC} = \frac{N \cdot k_B \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{LC}}{I_0} + 1 \right) \quad (V) \quad (2.37)$$

Výpočet maximálneho dodávaného výkonu štyrmi solárnymi článkami pripojenými k LSK určíme využitím rovnice (2.26) a následnou úpravou rovnice (2.27) ako:

$$P_m = 4 \cdot U_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF \quad (W) \quad (2.38)$$

3. Experimentálna časť

V experimentálnej časti bude popísaný postup výroby LSK malých rozmerov. Budú uvedené výsledky spektroskopických meraní a na ich základe dôjde o odhadnutiu optimálnych rozmerov a koncentrácie roztoku nanášaného na LSK. Cieľom bude dosiahnutie jeho maximálnej výkonovej účinnosti.

3.1 Príprava vrstvy

3.1.1 Príprava roztoku

Luminiscenčný roztok nanášaný na povrch LSK je roztokom obsahujúcim farbivo BASF Red 305, toluén a polymetylmetakrylát (PMMA). Pri jeho príprave postupujeme nasledovne:

- Zvolím objem roztoku (V), ktorý chcem pripraviť a jeho koncentráciu (c),
- vypočítam hmotnosť farbiva odpovedajúcu zvolenej koncentrácii a objemu,
- po navážení potrebného množstva farbiva ho pridám do toluénu o objeme V ,
- určím potrebné množstvo PMMA, ktoré je v pomere 1:6 k zmesi farbiva s toluénom,
- pridám potrebné množstvo PMMA a umiestnim roztok na 50 min do ultrazvukovej čističky.

Pomocou ultrazvukovej čističky dochádza k lepšiemu rozpusteniu PMMA.

V tejto práci bolo skúmaných päť druhov LSK s rôznou koncentráciou farbiva R305. Boli to koncentrácie 10^{-2} M, $2 \cdot 10^{-3}$ M, 10^{-3} M, $2 \cdot 10^{-4}$ M a 10^{-4} M. Ak zvolíme potrebný objem 1 ml ($V = 1$ ml) a koncentráciu farbiva 10^{-2} M ($c = 10^{-2}$ M), bude výpočet hmotností potrebných prísad nasledovný.

Vzťah (2.1) nám určuje závislosť medzi látkovou koncentráciou (c), objemom rozpúšťadla (V), hmotnosťou rozpúšťanej látky (m_A) a molárnou hmotnosťou zmesi (M_A). Vopred bolo určené, že molárna hmotnosť zmesi je 1079,56 g/mol. Ak zo vzťahu (2.1) vyjadríme hmotnosť rozpúšťanej látky dostávame:

$$m_A = c \cdot M_A \cdot V \text{ (g)} \quad (3.1)$$

Po dosadení konkrétnych hodnôt dostávame:

$$m_A = c \cdot M_A \cdot V = 10^{-3} \cdot 1079,56 \cdot 10^{-2} = 10,8 \text{ mg} \quad (3.2)$$

Vieme, že je potrebný objem toluénu 1 ml. Jeho hmotnosť učíme pomocou hustoty toluénu $\rho_T = 867$ g/l [21] ako:

$$m_T = \rho_T \cdot V = 867 \cdot 10^{-3} = 867 \text{ mg} \quad (3.3)$$

Bolo uvedené, že pomer PMMA ku zmesi toluénu s farbivom je 1:6. Hmotnosť PMMA teda určíme ako:

$$m_{PMMA} = \frac{(m_A + m_T)}{6} = \frac{878}{6} = 146 \text{ mg} \quad (3.4)$$

3.1.2 Nanesenie roztoku

Objem roztoku nanášaný na sklo o rozmeroch 2 x 2 cm odpovedal 0,2 ml. V našom prípade malo sklo rozmery 2 x 2 cm a hrúbku 0,2 cm. Pred nanášaním roztoku bolo sklo opláchnuté acetónom a toluénom, následne utreté do sucha. Potom došlo k jeho umiestneniu do rotačného nanášača (Laurell WS-650) (obr. 3.1) a bolo prichytené zo spodnej strany vákuom. Uvedený objem (0,2 ml) bol extrahovaný z fľašky s roztokom pomocou pipety a nanesený na sklo.

Na rotačnom nanášači boli použité nasledovné nastavenia:

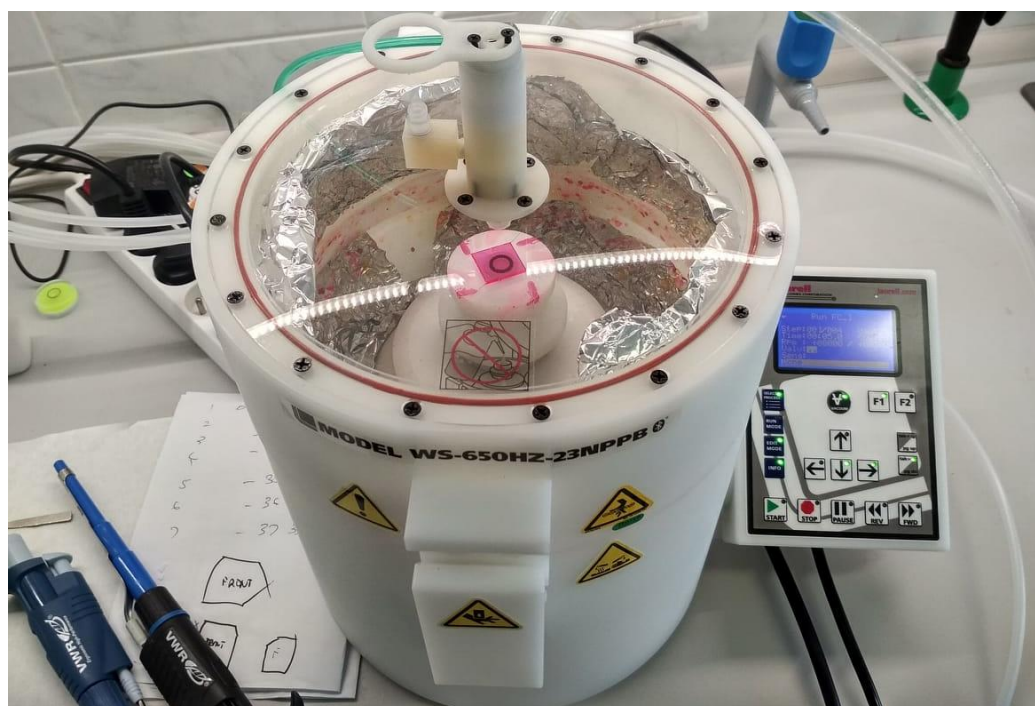
Krok 1) 500 rpm, 5 sekúnd, 500 zrýchlenie

Krok 2) 500 rpm, 1.5 sekúnd, 500 zrýchlenie

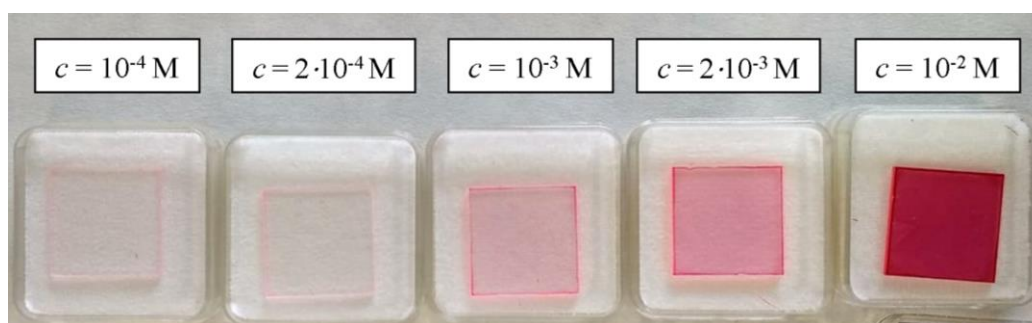
Krok 3) 2000 rpm, 1.5 sekúnd, 1500 zrýchlenie

Krok 4) 4000 rpm, 90 sekúnd, 2000 zrýchlenie

Pri takýchto nastaveniach by mala byť zmes na povrchu rozmiestnená rovnomerne a malo by dôjsť k vytvoreniu tenkej a hladkej vrstvy. Podobný postup bol použitý v práci [12]. Vyrobené prototypy vidíme na obr. 3.2.



Obr. 3.1: Nanášanie roztoku na povrch LSK pomocou rotačného nanášača Laurell WS-650.



Obr. 3.2: Znáznornenie vytvorených prototypov LSK s rôznou koncentráciou nanášaného farbiva.

3.2 Merania

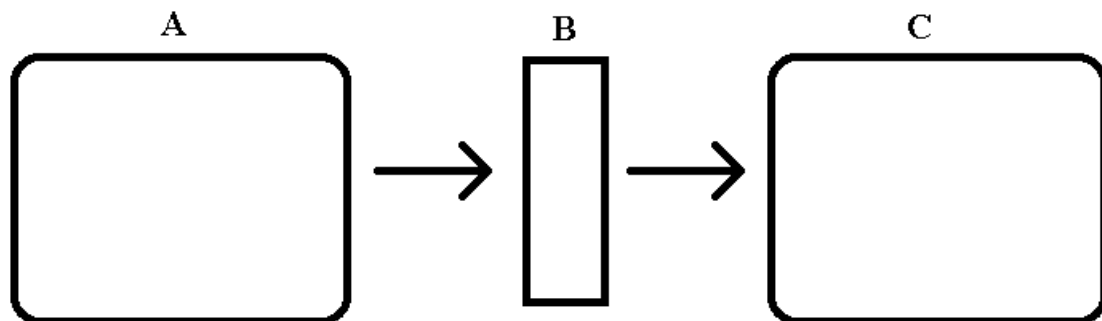
V tejto kapitole sa budeme zaoberať meraním vlastností LSK. Najskôr charakterizujeme jednotlivé merania. Potom z nameraných údajov budú pomocou vzťahov uvedených v teoretickej časti dopočítané veličiny, pomocou ktorých môžeme charakterizovať LSK pri vystavení referenčnému spektru AM 1.5.

3.2.1 Meranie absorpčných spektier

V tejto podkapitole najskôr všeobecne popíšeme meranie absorpčných spektier. Potom uvidíme zariadenia, ktoré boli použité pri našom meraní. Nakoniec vyhodnotíme namerané výsledky.

Na meranie absorpčného spektra vo viditeľnej oblasti pri sériových analýzach sa používajú jednoduché absorpčné fotometre, v ktorých sa vo funkcii monochromátora bežne používajú filtre. Takéto prístroje sa označujú ako filtrové fotometre, resp. objektívne kolorimetre. V súčasnosti ich nahrádzajú jednoduché spektrofotometre, ale nachádzajú uplatnenie v prevádzkových analyzátoroch, alebo ako detektory v kvapalinovej chromatografii a v kapilárnej elektroforéze. Každý spektrálny absorpčný fotometer má tieto štyri časti : [7]

1. zdroj žiarenia so spojitým spektrom v širokom rozmedzí vlnových dĺžok a s dostatočnou energiou,
2. disperzný systém, ktorým je hranolový alebo mriežkový monochromátor, pomocou ktorého možno zo spojitého žiarenia postupne izolovať zväzok lúčov s úzkym intervalom zvolených vlnových dĺžok, v jednoduchých prístrojoch vo funkcii monochromátora slúži filter,
3. absorpčný systém, teda roztok v kyvete, prípadne meraná vzorka,
4. fotometrický systém, ktorý sa skladá z fotoelektrického detektora žiarenia, zosilňovača a iných elektrických obvodov a meradla na odčítanie, či zaregistrovanie signálu. [7]



Obr. 3.3: Schematické znázornenie zariadenia na meranie absorpčného spektra.

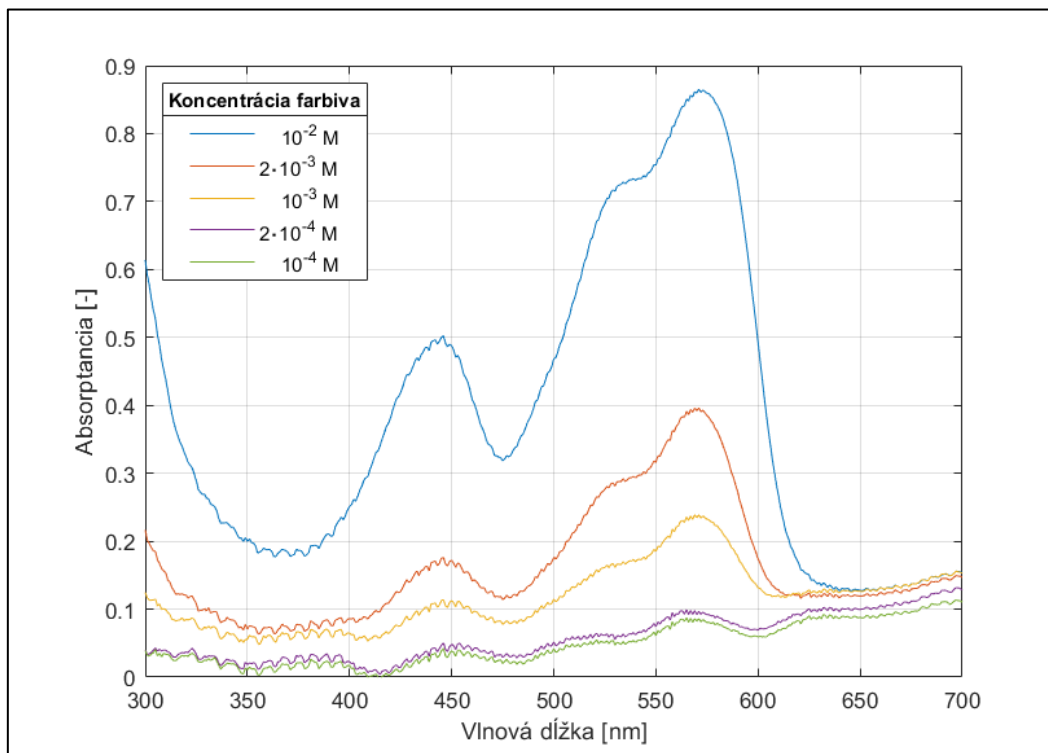
A – zdroj žiarenia spolu s monochromátorom, B – vzorka , C – detekčný systém

V našom prípade bol na merania absorpčných spektier použitý systém Bentham. Zdrojom svetla bola halogénová lampa a monochromátor Bentham TMc300. Detekcia prebehla multimódovým vláknom, ktoré bolo vyvedené na vstupnú štrbinu monochromátoru TM300 s fotonásobičom Hamamatsu R446. Meranie bolo vykonané pre LSK s nanoseným roztokom farbiva o koncentráciách 10^{-2} M, $2 \cdot 10^{-3}$ M, 10^{-3} M, $2 \cdot 10^{-4}$ M a 10^{-4} M. Tiež bolo vykonané referenčné meranie a meranie absorpcie samotného skla bez nanoseného roztoku. Meranie prebehlo vo vlnovom rozsahu 300 – 700 nm.

Výpočet absorpčných spektier z nameraných hodnôt pre konkrétne vlnové dĺžky prebehol pomocou vzťahu (2.6), pričom od nameranej hodnoty absorptancie bola odpočítaná hodnota absorptancie skla. Môžeme teda písať:

$$A_R = A_N - A_S = \frac{\Phi_{aN}}{\Phi_0} - \frac{\Phi_{aS}}{\Phi_0} = \frac{\Phi_0 - \Phi_N}{\Phi_0} - \frac{\Phi_0 - \Phi_S}{\Phi_0} \quad (-) \quad (3.5),$$

kde pre zvolenú vlnovú dĺžku je A_R výsledná absorptancia roztoku, A_N je nameraná hodnota absorptancie, A_S je hodnota absorptancie skla, Φ_{0N} a Φ_{0S} sú absorbované žiarivé toky pre povrch LSK a skla, Φ_0 je hodnota vstupujúceho žiarivého toku, Φ_N a Φ_S sú hodnoty výstupných žiarivých tokov z povrchu LSK a z povrchu skla. Hodnota odrazeného žiarivého toku Φ_R je zanedbaná, nakoľko sa predpokladá, že LSK bude mať na svojom povrchu umiestnenú antireflexnú vrstvu.



Obr. 3.4: Znáznorenie nameraných hodnôt absorpčných spektier pre rôzne koncentrácie nanášaného roztoku na povrch LSK. Vidíme mierny nárast absorptancie s rastúcou hodnotou koncentrácie.

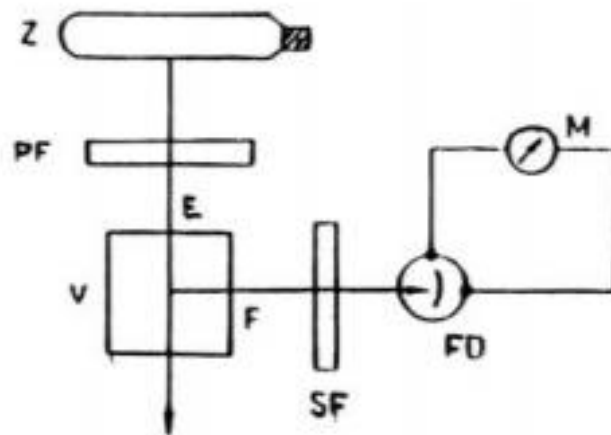
Výsledky merania sú znázornené na obr. 3.4. Vidíme, že podľa očakávaní s rastúcou hodnotou koncentrácie, rastie aj hodnota maxima jednotlivých absorpčných spektier. Hodnoty absorptancie sú najvyššie pre najvyššiu koncentráciu farbiva ($c = 10^{-2}$ M). Absorptancia pre nízke koncentrácie farbiva ($c = 2 \cdot 10^{-4}$ a $c = 10^{-4}$ M) je veľmi malá. Od 640 nm do 700 nm vidíme mierny nárast absorptancie. Tento nárast však podľa všetkého nesúvisí s vlastnosťami nanášaného vrstvy, keďže predtým došlo k očakávanému poklesu absorptancie. Môže byť spôsobený systematickou chybou merania, systematickou chybou meracieho prístroja, prípadne iným neznámym vplyvom.

Okrem absorpčného spektra je pre popis vlastností LSK dôležité poznať aj jeho fluorescenčné spektrum, konkrétne spektrum hraničnej fluorescence popisujúce hlavný stratový mechanizmus LSK, ktorým je reabsorpcia. Jeho meraním sa budeme zaoberať v ďalšej kapitole.

3.2.2 Meranie fluorescence a reabsorpcie

Pre určenie pravdepodobnosti reabsorpcie jednotlivých LSK je nutné okrem ich spektra hraničnej fluorescence určiť aj referenčné spektrum 1. generácie. Ich meranie bude popísané v tejto podkapitole, pričom najskôr dôjde k uvedeniu základných princípov pri meraní fluorescence. V závere budú z nameraných hodnôt budú vypočítané hodnoty reabsorpcie (r) a účinnosti kolekcie (Q_c).

Prístroj na meranie fluorescence sa nazýva fluorimeter (fluorescenčný spektrometer) (obr. 3.5). Má dva monochromátory - jeden na získavanie monochromatického excitačného žiarenia a druhý na analýzu fluorescenčného žiarenia. Pretože na vzorku po monochromácii dopadá len malý zlomok z celkovej energie zdroja, vyžaduje sa intenzívny zdroj spojitého spektra a musí mať zabudovaný citlivý detektor emitovaného žiarenia - najčastejšie fotonásobič. Fluorescenčné spektrometre s konštantnou šírkou štrbiny dávajú zdanlivé fluorescenčné spektrá, ktoré často postačujú na bežnú prácu. Pri veľmi presných meraniach treba zdanlivé spektrá korigovať na frekvenčné zmeny citlivosti fotonásobiča, zmeny spektrálnej šírky monochromátora a pod. Kvalitné, komerčne vyrábané prístroje vykonávajú tieto korekcie automaticky a zaznamenávajú pravé fluorescenčné spektrum. [7]



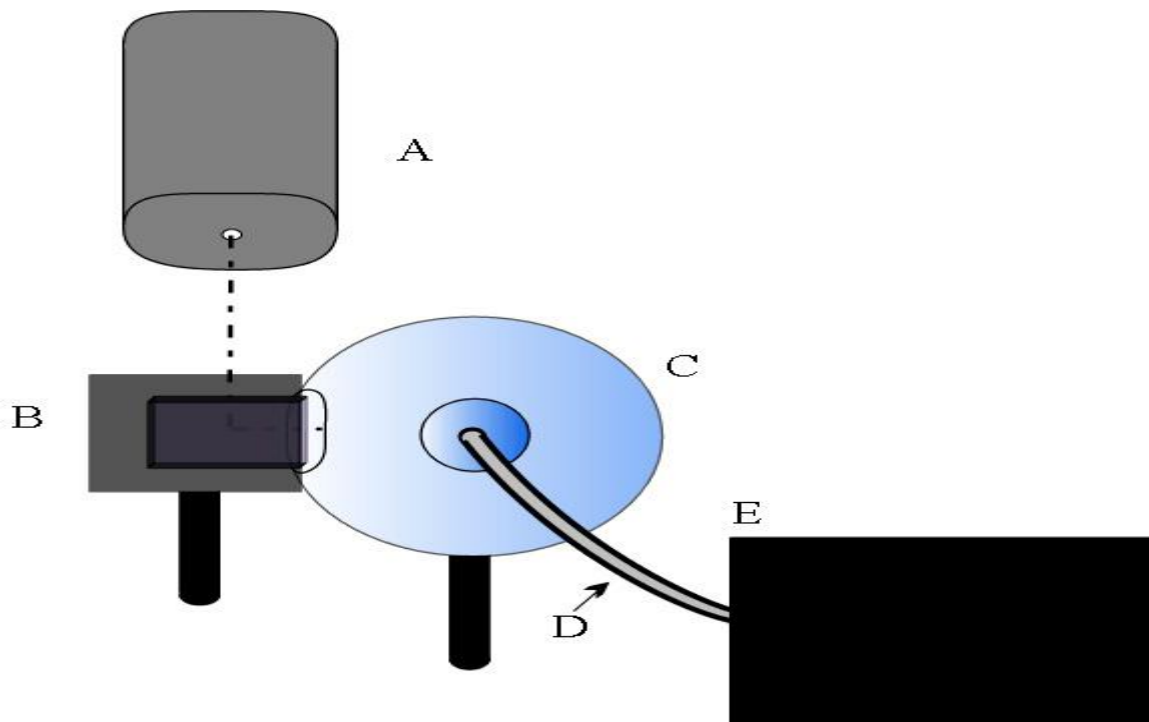
Obr. 3.5: Schematické znázornenie fluorimetra. [7]

Z - budiaci zdroj, PF - primárny filter, SF - sekundárny filter, E - excitačné žiarenie, F - fluorescenčné žiarenie, FD - fotodetektor, M - merací prístroj, V - vzorka [7]

Pri našom meraní bol použitý rovnaký detekčný systém ako pri meraní absorptancie, teda systém Bentham - monochromátor a fotonásobič. Vzorka bola excitovaná len jednou vlnovou dĺžkou (443 nm) pomocou lasera PicoQuant LDH-P-C-440B s výkonom 4 mW. Meraný roztok s koncentráciou $c = 2 \cdot 10^{-6}$ M bol umiestnený v kyvete. Namerané hodnoty fluorescence tohto roztoku nám slúžia ako spektrum 1. generácie fluorescence, pri ktorej by už nemalo dochádzať k reabsorpcii. Oba druhy meranie prebehlo vo rozsahu vlnových dĺžok 500 nm – 800 nm. Namerané hodnoty spektra 1. generácia vidíme na obr. 3.7 až obr. 3.11 spolu s nameranými hodnotami spektier okrajovej fluorescence.

Následne došlo k meraniu spektier okrajovej fluorescence vytvorených prototypov LSK s rôznou koncentráciou farbiva v nanášanej vrstve. Meraním okrajových spektier detegujeme spektrá, pri ktorých dochádza k reabsorpcii, preto meranie označujeme meraním reabsorpcie. Bol vyvinutý systém, ako toto spektrum merať (obr. 3.6). Pri konkrétnom usporiadaní je kladený dôraz nato, aby došlo k čo najefektívnejšej detekcii fluorescenčného žiarenia vychádzajúceho z okraja LSK. Preto je tento okraj nasmerovaný k vstupu guľového integrátora. Popis zapojenia je nasledovný: Svetelnú lúč vychádzajúci z lasera (A) dopadá kolmo na LSK. Ten je umiestnený v držiaku (B), pričom tri strany LSK sú zatienené. Po dopadne lúča dochádza k absorpcii a následne k fluorescencii a svetlo vystupuje z hrany LSK smerom do guľového integrátora (C). Ten zabezpečí, že nedôjde k žiadnym optickým stratám a že zberané svetlo sa rovnomerne rozptýli. Toto rozptýlené svetlo je vedené optickým vláknom (D) k meraciemu prístroju (E).

Zmenou polohy lasera je možné meniť miesto dopadu na LSK. Takýmto spôsobom je možné škálovať spektrá reabsorpcie pre rôzne rozmery LSK.

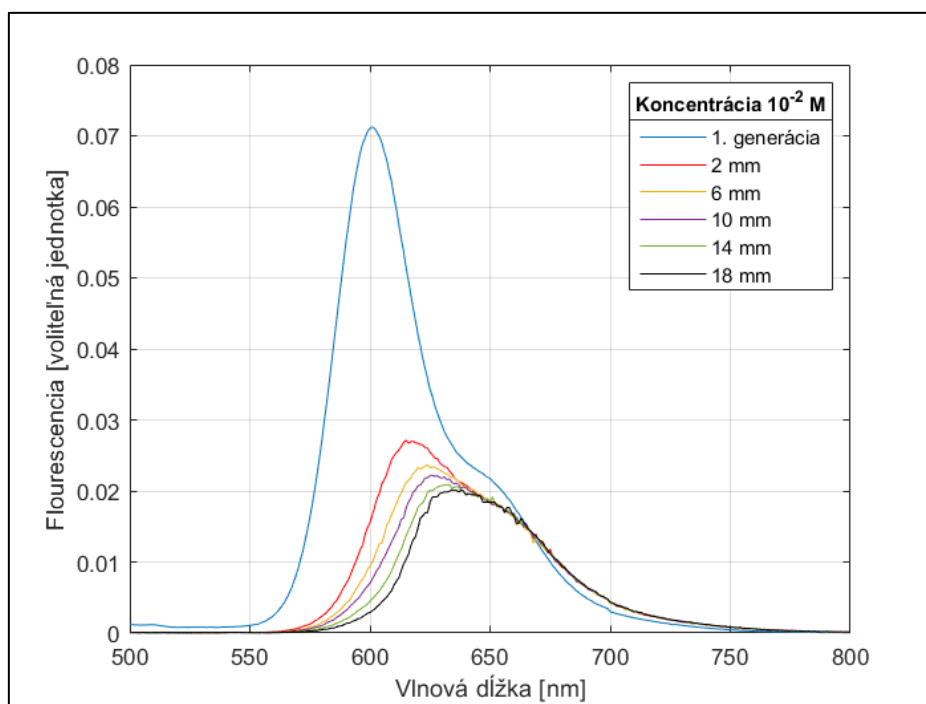


Obr. 3.6: Schematické znázornenie merania reabsorpcie.

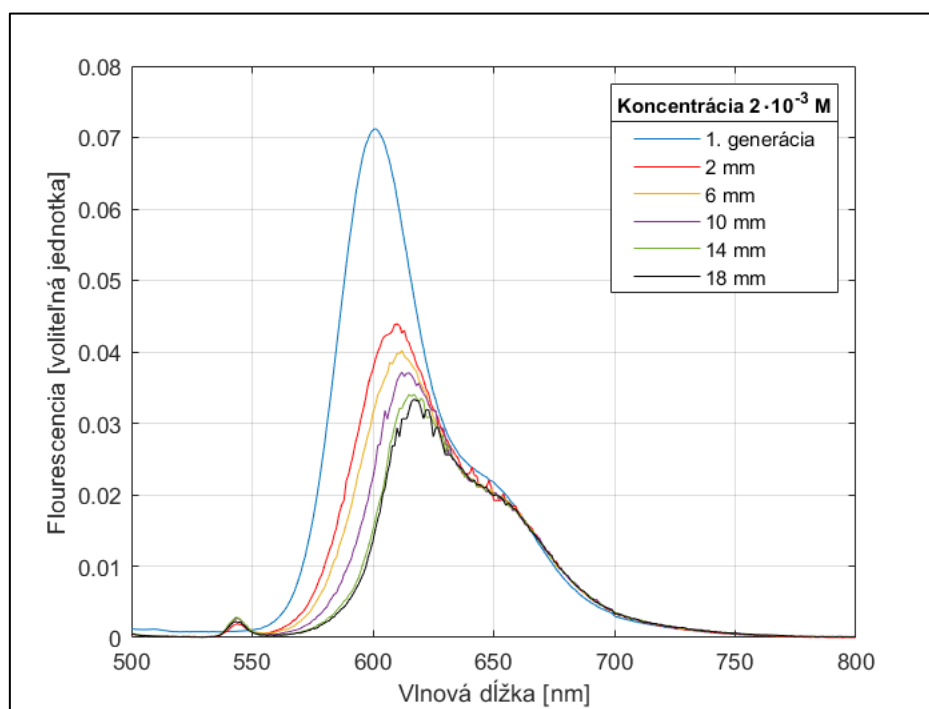
A - laser, B – držiak s LSK, C – guľový integrátor, D – optické vlákno, E - merací prístroj

Pre všetky vytvorené LSK prebehlo meranie podľa schémy na obr. 3.6. LSK mal štvorcový tvar s rozmerom hrany 20 mm. Pri meraní došlo k posúvaniu lasera v intervaloch po 4 mm so začiatkom v 2 mm od okraju výstupnej hrany až po 18 mm. Vďaka tomu bude možné škálovanie reabsorpcie s rozmermi LSK. Meranie pre 2 mm od výstupnej hrany odpovedá reálnemu rozmeru LSK 4 mm. Tento záver vyplýva z konkrétneho prevedenia merania, kedy dochádza k meraniu bodovým zdrojom (laserom) a meraná je len jedna hrana LSK, ostatné hrany sú začlenené, takže dochádza k absorpcii fluorescenčného spektra v smeroch k nim. Podobnú úvahu môžeme urobiť aj pre zvyšné merania.

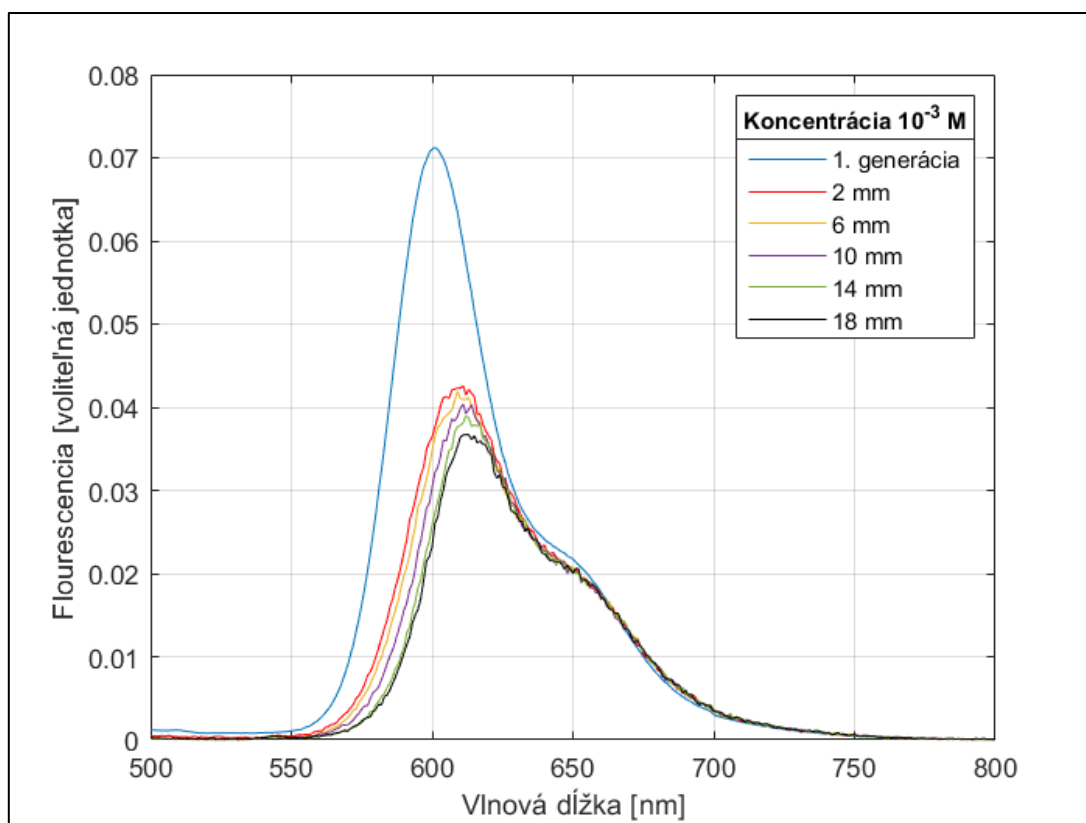
Zo vzťahu (2.19) pre určenie hodnoty reabsorpcie (r) vyplýva, že pred jej výpočtom musíme najskôr poznať spektrum 1. generácie fluorescence a spektrum hraničnej fluorescence. Následne musíme spektrum hraničnej fluorescence nanormovať tak, aby od určitej vlnovej dĺžky odpovedalo spektru 1. generácie. V tomto prípade bola zvolená hodnota 636 nm, pretože ako z obr. 3.4 vidíme, v tejto oblasti je už absorptancia minimálna a teda tu už dochádza k reabsorpcií len s veľmi malou pravdepodobnosťou.



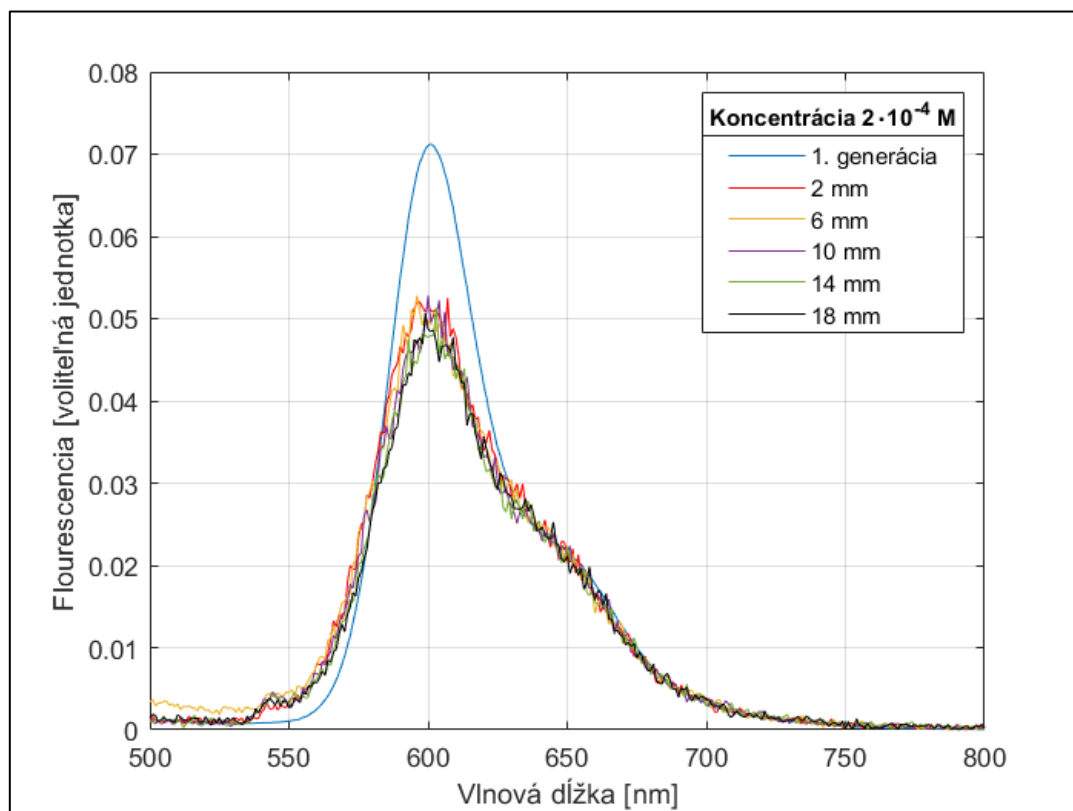
Obr. 3.7: Znáznornenie normovaných nameraných hodnôt fluorescence pre látkovú koncentráciu nanášaného roztoku 10^{-2} M.



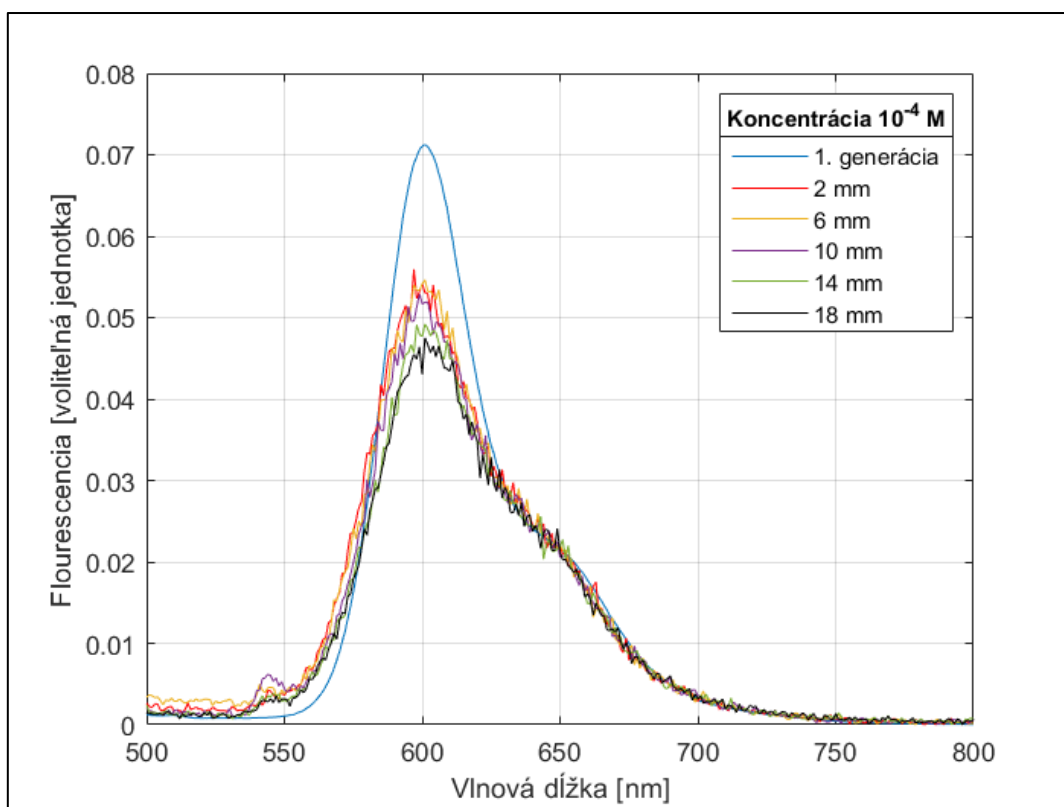
Obr. 3.8: Znáznornenie normovaných nameraných hodnôt fluorescence pre látkovú koncentráciu nanášaného roztoku $2 \cdot 10^{-3}$ M.



Obr. 3.9: Znáozornenie normovaných nameraných hodnôt fluorescence pre látkovú koncentráciu nanášaného roztoku 10^{-3} M.



Obr. 3.10: Znáozornenie normovaných nameraných hodnôt fluorescence pre látkovú koncentráciu nanášaného roztoku $2 \cdot 10^{-4}$ M.



Obr. 3.11: Znáznornenie normovaných nameraných hodnôt flourescencie pre látkovú koncentráciu nanášaného roztoku 10^{-4} M.

Na obr. 3.5 vidíme, že pre koncentráciu $c = 10^{-2}$ M nedošlo k úplne ideálnemu normovaniu. To je dané tvarom spektier, kedy jednoduchým posunom nešlo dosiahnuť ideálnu zhodu. V ďalších prípadoch bolo normovanie v poriadku (obr. 3.8 a obr. 3.9). Vidíme, že namerané hodnoty pre nízke hodnoty koncentrácie (obr. 3.10 a obr. 3.11) v sebe obsahujú šum. To je spôsobené nízkou absolútnou hodnotou meraných veličín, pri ktorej narážame na dolnú hranicu citlivosti meracieho prístroja. Takýto výsledok sme mohli očakávať už pri pohľade na obr. 3.4, kde vidíme, že hodnoty absorptancie sú pre tieto koncentrácie nízke.

Pre stanovenie hodnôt reabsorpcie s meniacou sa koncentráciou a rozmermi LSK bol použitý už spomínaný vzorec (2.19). Jednotlivé plochy pod krivkami boli vyčíslené v rozsahu od 500 do 800 nm. Prepočet označenia dĺžky (vzdialenosť dopadajúceho lúča od výstupnej hrany) na rozmery LSK je vykonaný násobením pôvodného označenie dvojkou.

rozmer /koncentrácia	10^{-2} M	$2 \cdot 10^{-3}$ M	10^{-3} M	$2 \cdot 10^{-4}$ M	10^{-4} M
4 mm	0,50	0,29	0,30	0,08	0,05
12 mm	0,56	0,34	0,33	0,07	0,05
20 mm	0,58	0,40	0,36	0,11	0,09
28 mm	0,62	0,46	0,39	0,13	0,13
36 mm	0,64	0,48	0,41	0,13	0,15

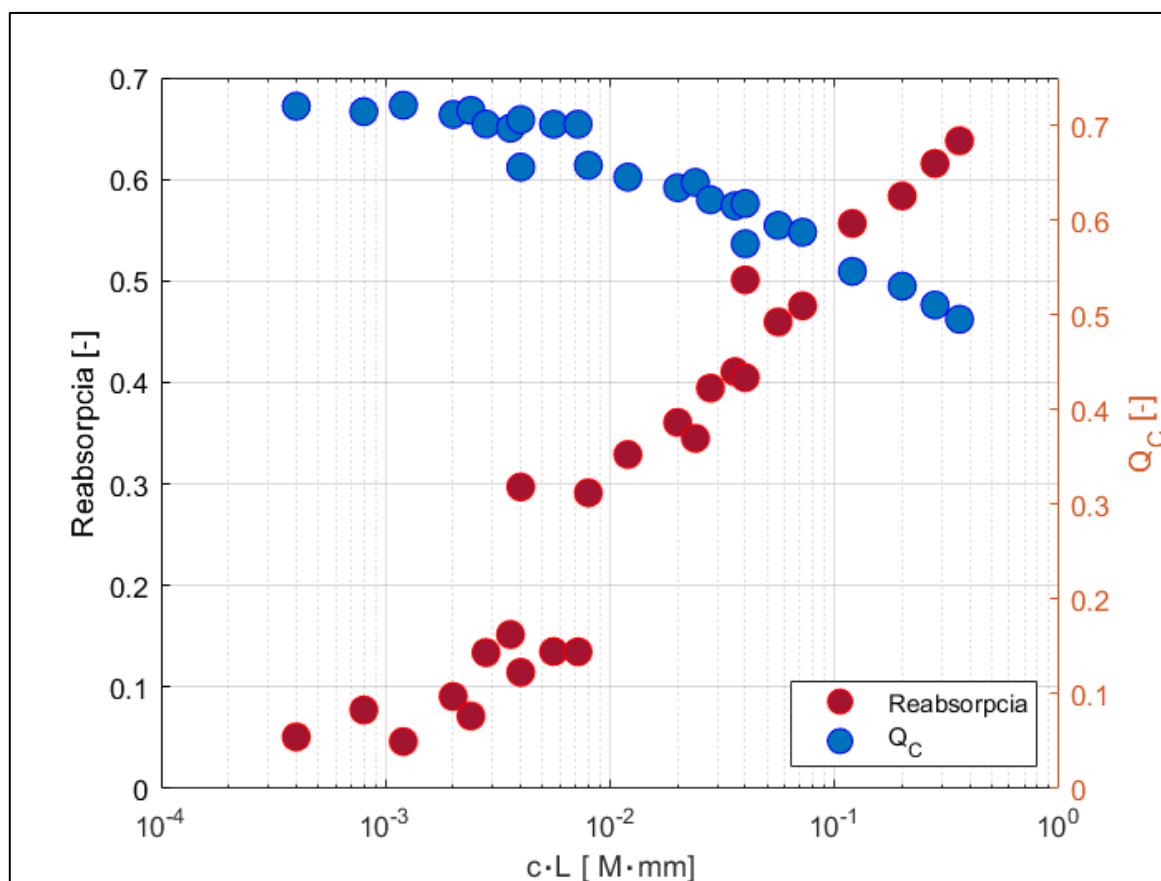
Tabuľka 3.1: Vypočítané hodnoty pravdepodobností reabsorpcie pre meniacou sa koncentráciou a rozmer LSK.

Vyhodnotením vypočítaných výsledkov v tabuľke 3.1 zisťujeme, že s rastúcou koncentráciou pravdepodobnosť reabsorpcie rastie. So zvyšujúcou sa hodnotou rozmerov LSK by sme očakávali, že hodnota reabsorpcie bude rásť. K tomu naozaj dochádza. Dôvod miernych rozdielov medzi našimi očakávaniami a vypočítanými hodnotami určíme z nameraných hodnôt fluorescencie. Vidíme, že pre nízke hodnoty koncentrácie (obr. 3.10 a obr. 3.11) sú absolútne hodnoty veličín spracovávaných mieriacim prístrojom veľmi malé a preto vidíme, že pre niektoré vlnové dĺžky dochádza k prekrytiu hodnôt fluorescencie pre nižšie a vyššie rozmery. To má vplyv aj na vypočítané hodnoty reabsorpcie.

Ďalším krokom je výpočet účinnosti kolekcie (Q_C) pre LSK pomocou vzťahu (2.34). Už vieme, že hodnota strát únikovým kuželom (P_E) pre PMMA je $P_E = 0,26$. [10] Hodnota kvantového výťažku (Q_Y) pre nami používaný roztok je $Q_Y = 0,98$. [22] Napríklad pre koncentráciu farbiva 10^{-2} M ($c = 10^{-2}$ M) a rozmer hrany LSK 4 mm ($L = 4$ mm) by bol výpočet nasledovný:

$$Q_C = \frac{(1-r)(1-P_E) \cdot Q_Y}{1-Q_Y \cdot (1-P_E) \cdot r} = \frac{(1-0,5)(1-0,26) \cdot 0,98}{1-0,98 \cdot (1-0,26) \cdot 0,5} = 0,57 \quad (3.6),$$

kde hodnotu reabsorpcie (r) pre daný rozmer hrany (L) a koncentráciu farbiva (c) sme určili z tabuľky 3.1.

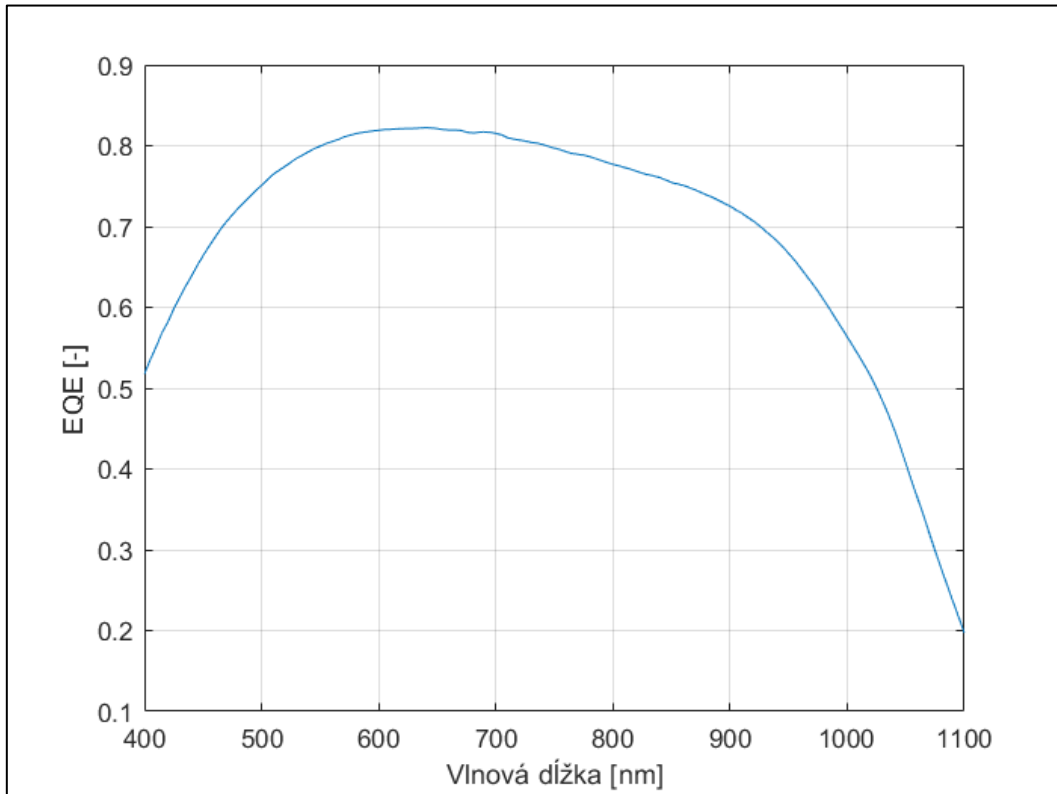


Obr. 3.12: Vypočítané hodnoty reabsorpcie a účinnosti kolekcie.

Vypočítané hodnoty účinnosti kolekcie (Q_C) na obr. 3.12 s rastúcou hodnotou súčinu $c \cdot L$ postupne z istej počiatočnej hodnoty klesajú, zatiaľ čo hodnoty reabsorpcie (r) rastú. Pokles hodnôt účinnosti kolekcie si môžeme odôvodniť tak, že s rastúcimi rozmermi (L) a koncentráciou (c), rastie tiež pravdepodobnosť, že dôjde k reabsorpcii a že lúč, ktorý bol vedený totálnym odrazom k okraju bude vyžiarený do smeru, ktorým opustí LSK cez únikový kužel. Tiež vidíme, že rast je logaritmický (logaritmická mierka).

3.2.3 Meranie externej kvantovej účinnosti

Externou kvantovou účinnosťou môžeme vhodne popísať vlastnosti solárneho článku pripojeného na boku LSK. Postup merania EQE bol podobný ako pri meraní absorpčných spektier LSK, avšak svetlo z lampy cez monochromátor dopadalo na solárny článok a bol zaznamenaný výstupný prúd dodávaný solárnym článkom.



Obr. 3.13: Namerané hodnoty externej kvantovej účinnosti použitého kremíkového článku.

Z obr. 3.13 je názorné, že EQE dosahuje maximum v oblasti od 550 nm do 750 nm. To je pre nás priaznivé zistenie, keďže spektrum emitované z LSK (fluorescenčné spektrum) sa nachádza práve v tejto oblasti (obr. 3.8).

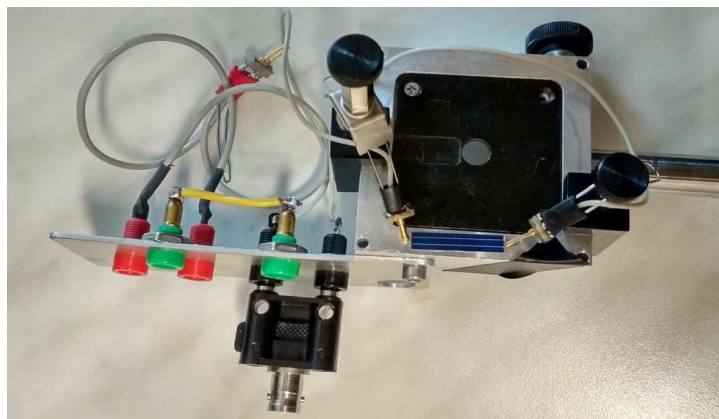
Okrem externej kvantovej účinnosti je k popisu vlastností kremíkového článku väčšinou používaná aj jeho voltampérová charakteristika. Jej meraním sa budeme zaoberať v nasledujúcej kapitole.

3.2.4 Meranie voltampérovej charakteristiky

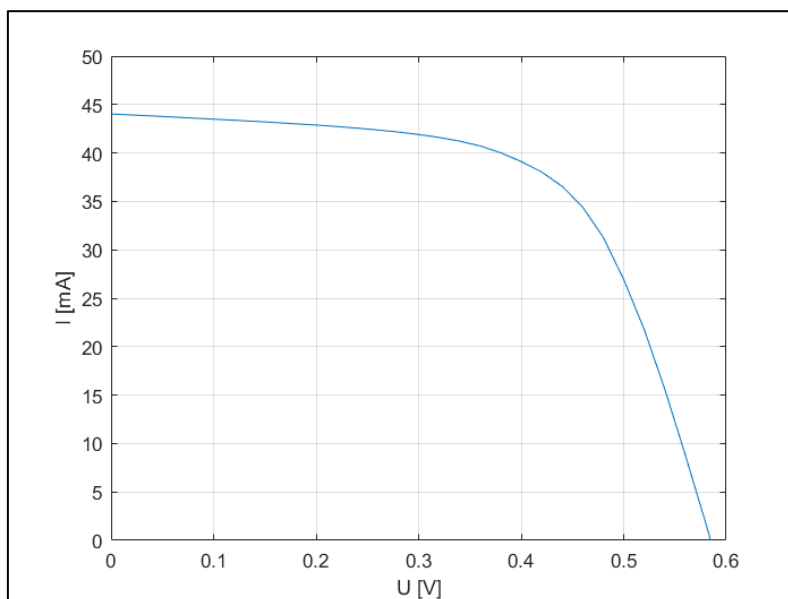
Meranie voltampérovej charakteristiky kremíkového solárneho článku prebehlo pomocou solárneho simulátora Wavelabs LS-2, triedy AAA, aparatury, na ktorej bol článok prichytený (obr. 3.14), napájacieho zdroja, pomocných vodičov, merača napätia a prúdu (Keithley 2410) a notebooku. Článok bol umiestnený do doporučenej vzdialenosti pod zdroj svetla a následne vystavený ožiareniu 1000 W/m^2 . Potom došlo k meraniu.

I_{sc} (A)	U_{oc} (V)	FF (-)	$\eta_{Si \text{ cell}}$ (%)	Plocha článku (mm^2)
0,044	0,59	0,63	20,7	125

Tabuľka 3.2: Namerané hodnoty prúdu nakrátko, napätia naprázdno, faktoru plnenia a výkonovej účinnosti kremíkového solárneho článku sú určené z VA charakteristiky (obr. 3.15).



Obr. 3.14: Aparatúra na meranie elektrických vlastností solárneho článku malých rozmerov.



Obr. 3.15: Graf VA charakteristiky meraného kremíkového článku.

Z rovnice (2.25), pre namerané hodnoty v tabuľke 3.2, kde $I_L = I_{sc}$, $U = U_{oc}$, voľbe faktora ideality $N = 1,19$ [23] a teploty $T = 300 \text{ K}$, môžeme určiť saturačný prúd I_0 kremíkového solárneho článku ako:

$$I_0 = \frac{I + I_L}{\left(\frac{q \cdot U}{e^{N \cdot k_B \cdot T} - 1} \right)} = \frac{I_{sc}}{\left(\frac{q \cdot U_{oc}}{e^{N \cdot k_B \cdot T} - 1} \right)} = \frac{0,044 \text{ A}}{\left(\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot C \cdot 0,59 \text{ V}}{e^{1,19 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 300 \text{ K} - 1}} \right)} = 1,3 \cdot 10^{-10} (\text{A}) \quad (3.7)$$

Využili sme, že hodnota prúdu I je pre napätie naprázdno U_{oc} nulová (obr. 2.6).

3.3 Optimalizácia parametrov LSK

Cieľom tejto kapitoly bude optimalizovať rozmery a koncentráciu nanášaného roztoku na povrch LSK vzhľadom na účinnosť LSK. Predtým je však nutná aproximácia niektorých veličín potrebných pre výpočet spomenutej účinnosti. Tiež bude predvedený ilustračný výpočet pre konkrétne zvolené hodnoty koncentrácie a rozmerov. Následne budú navrhnuté optimálne rozmery a koncentrácia farbiva na povrchu LSK vzhľadom na jeho účinnosť.

3.3.1 Aproximácia absorptancie

Naším cieľom je určiť závislosť absorptancie na koncentrácií. Pre konkrétnu vlnovú dĺžku, máme k dispozícii 5 nameraných hodnôt absorptancie (obr. 3.4) navyše vieme, že pre nulovú koncentráciu je absorptancia nanášaného vrstvy nulová. Budeme predpokladať, že množstvo odrazeného žiarenia môžeme zanedbať. Už sme uviedli, že definícia absorptancie je nasledovná (2.6):

$$A = \frac{\Phi_a}{\Phi_0} \quad (-) \quad (3.8)$$

Vstupujúci žiarivý tok (Φ_0) môžeme pri nulovej odrazivosti z rovnice (2.9) vyjadriť ako:

$$\Phi_0 = \Phi_a + \Phi \quad (-) \quad (3.9)$$

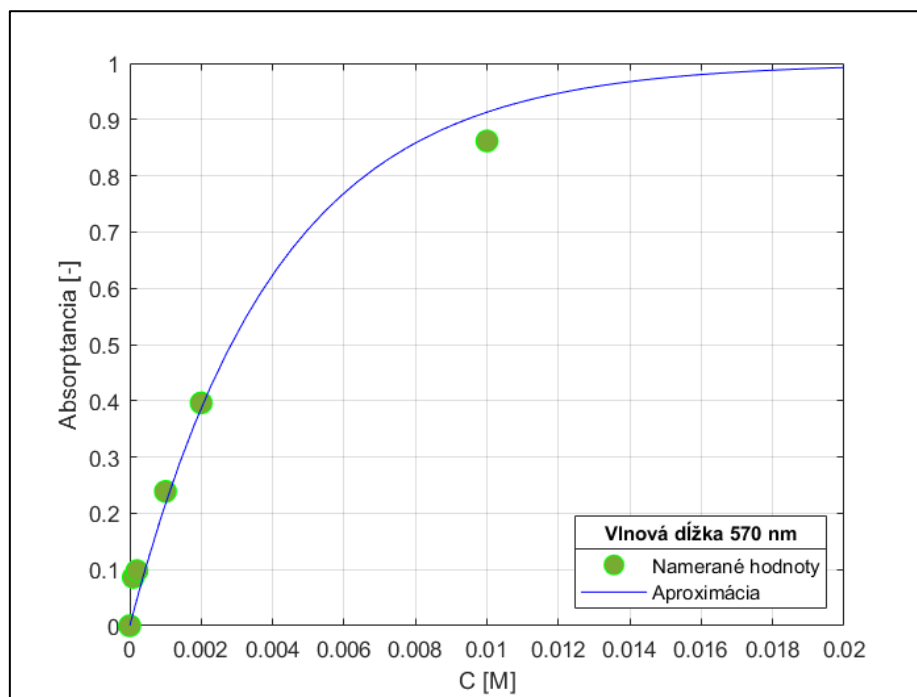
Po spätnom dosadení do vzťahu (3.8), použitím Lambert-Beerovho zákona (2.11) a využitia vzťahu $10^{-\varepsilon \cdot c \cdot d} = e^{-2,3 \cdot \varepsilon \cdot c \cdot d}$ môžeme písať:

$$A = \frac{\Phi_a}{\Phi_0} = \frac{\Phi_0 - \Phi}{\Phi_0} = 1 - 10^{-\varepsilon \cdot c \cdot d} = 1 - e^{-2,3 \cdot \varepsilon \cdot c \cdot d} \quad (-) \quad (3.10)$$

Preto pri aproximácií závislosti absorptancie na koncentrácií budeme hľadať funkciu v tvare:

$$A = 1 - e^{a \cdot c} \quad (-) \quad (3.11),$$

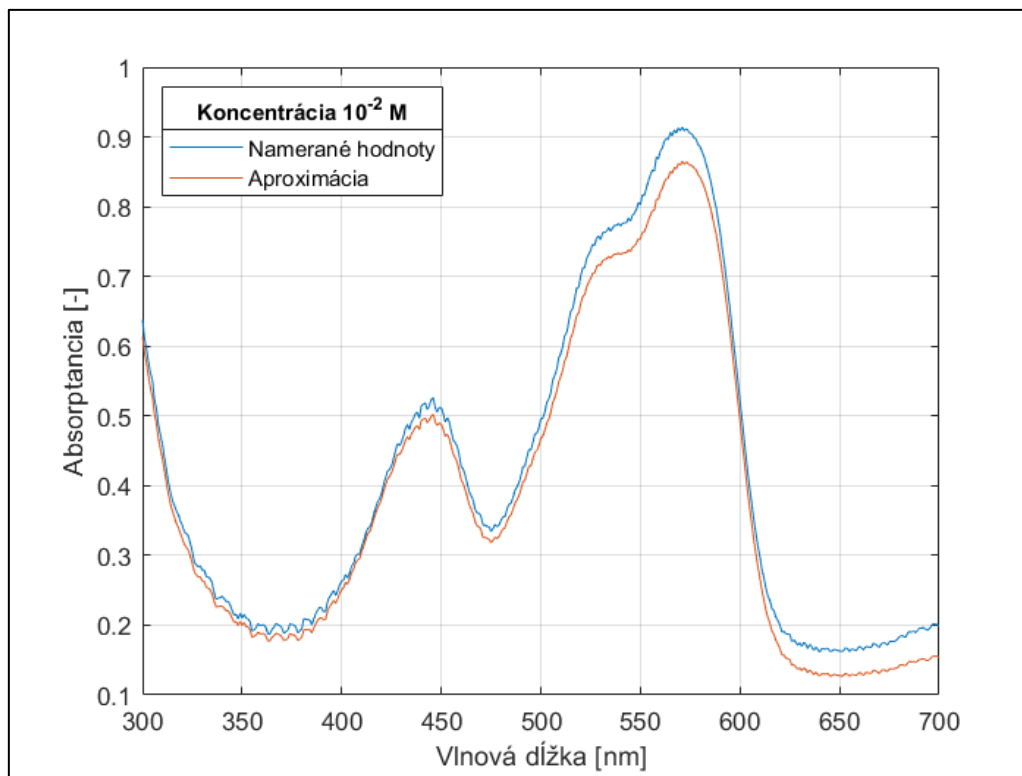
kde a je hľadaný aproximačný koeficient.



Obr. 3.16: Aproximácia absorptancie v závislosti na koncentrácií pre vlnovú dĺžku 570 nm.

Týmto spôsobom došlo k aproximácii závislostí absorptancie na koncentrácií pre každú vlnovú dĺžku. Príklad pre vlnovú dĺžku 570 nm vidíme na obr. 3.16. So zvolenou koncentráciou je tak pre každú vlnovú dĺžku možné dopočítať hodnotu absorptancie. Matematicky to môžeme vyjadriť ako:

$$A_{approx}(\lambda) = 1 - e^{a_{\lambda} \cdot c} \quad (-) \quad (3.11)$$



Obr. 3.17: Porovnanie nameraných hodnôt a aproximácie absorptancie pre koncentráciu 10^{-2} M.

Môžeme tak dopočítať celé spektrum hodnôt. Aproximácia pre koncentráciu 10^{-2} M ($c = 10^{-2}$ M) je znázornená na obr. 3.17. Simulované hodnoty v tomto prípade môžeme porovnať s hodnotami, ktoré boli získané meraním. Vidíme, že simulovaný priebeh dobre zodpovedá nameraným hodnotám.

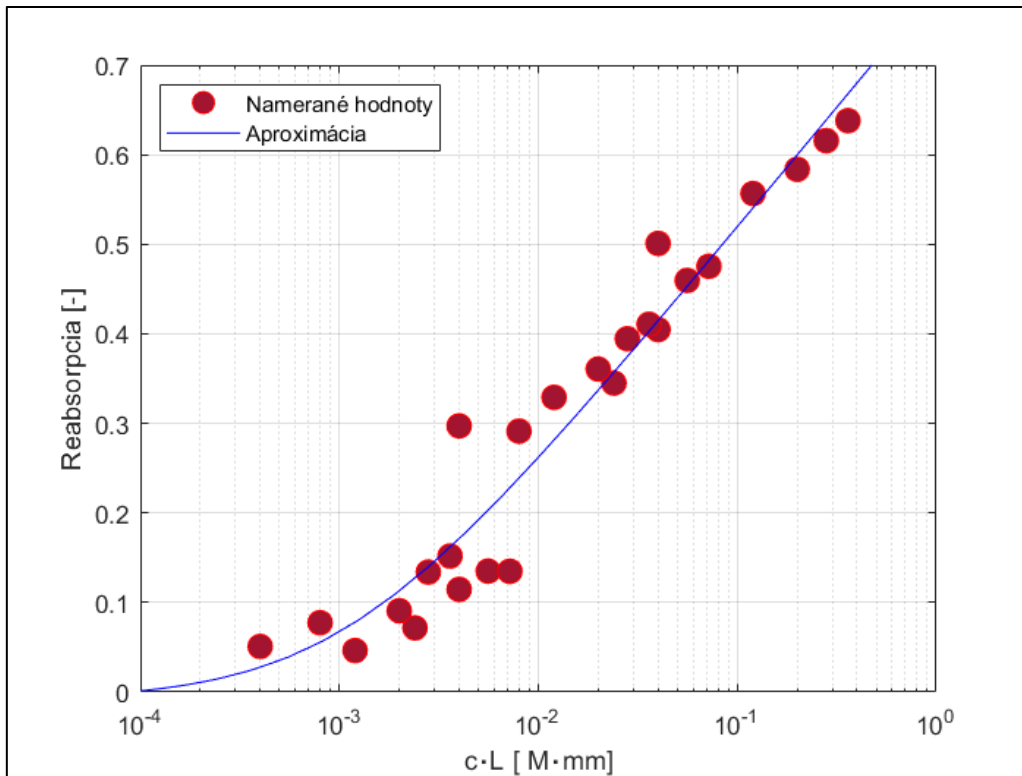
3.3.2 Aproximácia reabsorpcie

Pri aproximácii závislosti reabsorpcie na koncentrácií nanášaného roztoku a rozmeroch LSK boli namerané dáta reabsorpcie preložené logaritmickou krivkou tvaru:

$$r = a_1 + a_2 \cdot e^{c \cdot L} \quad (-) \quad (3.12)$$

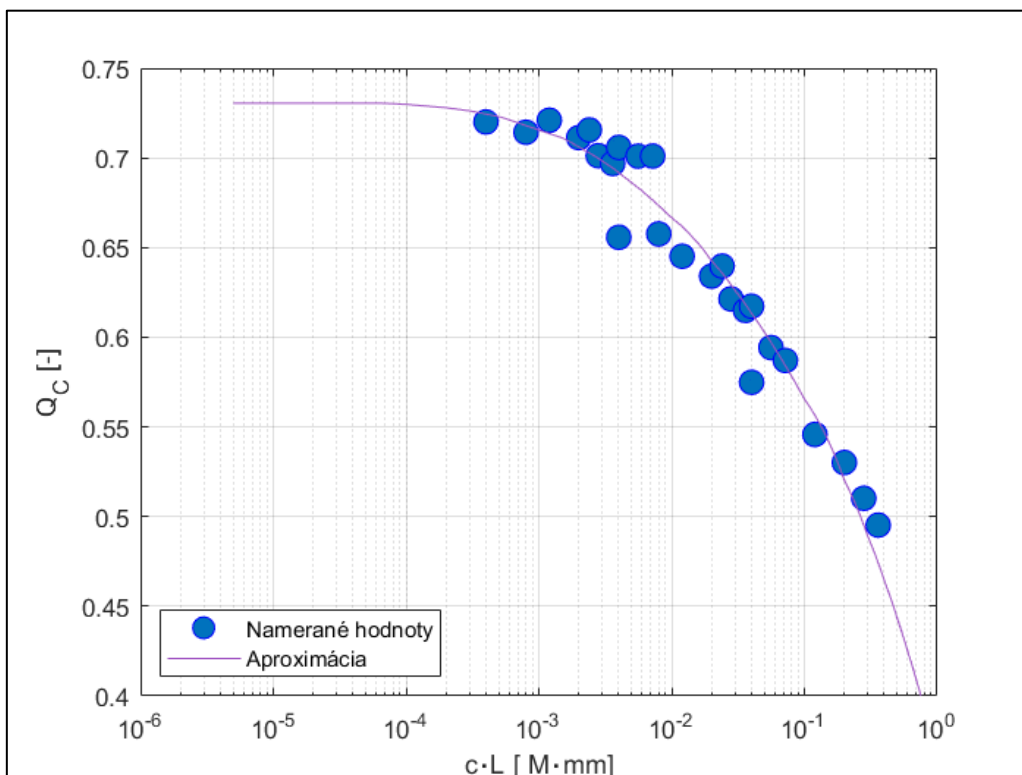
Hodnoty získaných koeficientov sú $a_1 = 0,79$, $a_2 = 0,12$.

Výsledok aproximácie vidíme na obr. 3.18. Simulované hodnoty celkom dobre popisujú nameraný priebeh reabsorpcie v závislosti na parametri $c \cdot L$. Avšak konkrétny analytický vzťah pre priebeh reabsorpcie nie je známy. Popis závislosti vyžaduje presnejšiu simuláciu pokročilejšími metódami.



Obr. 3.18: Porovnanie nameraných hodnôt reabsorpcie a aproximačnej krivky.

Na hodnoty reabsorpcie zaväzujú hodnoty účinnosti kolekcie Q_c . Tie určíme podobne ako vo vzťahu (3.6) pre simulované hodnoty reabsorpcie. Porovnanie vypočítaných a nameraných hodnôt vidíme na obr. 3.19.



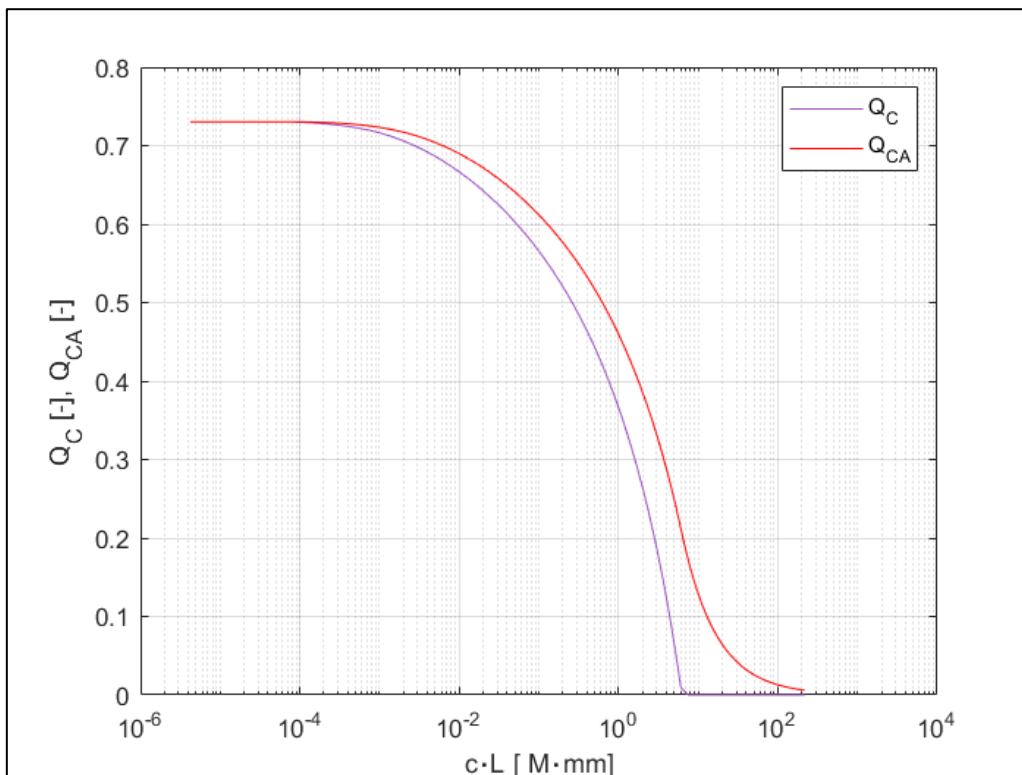
Obr. 3.19: Porovnanie nameraných hodnôt a simulovaných hodnôt Q_c .

Namerané a simulované hodnoty Q_C na obr. 3.19 sa veľmi nelíšia. Pokles simulovaných hodnôt Q_C je predpokladaný, keďže s rastúcou hodnotou $c \cdot L$ rastie aj pravdepodobnosť reabsorpcie.

Je dôležité si uvedomiť, že meranie hodnôt reabsorpcie prebiehalo pre bodové osvetlenie jedného miesta na povrchu LSK. Z toho vyplýva, že aj hodnoty účinnosti kolekcie sú vypočítané pre konkrétny rozmer LSK. Avšak pri rovnomernom osvetlení bude skutočná hodnota Q_C zložená z hodnôt Q_C pre všetky menšie rozmery LSK. Zavádzame preto priemernú hodnotu účinnosti kolekcie (Q_{CA}). Spočítame ju pomocou vzťahu:

$$Q_{CA \ c_0 L_0} = \frac{\sum_{i=0}^{c_0 L_0} Q_{C i}}{c_0 L_0} \quad (-) \quad (3.13)$$

Pri výpočte je potrebné zvoliť dostatočne malé rozstupy medzi hodnotami $c \cdot L$. Vypočítané hodnoty Q_{CA} zo simulovaných hodnôt Q_C vidíme na obr. 3.20.



Obr. 3.20: Znáročenie hodnôt Q_C a Q_{CA} .

3.3.3 Výpočet účinnosti LSK

V tejto časti zvolíme konkrétne parametre LSK a vypočítame hodnotu jeho účinnosti. Zvolené parametre budú podobné parametrom LSK, ktorý bol meraný. Koncentrácia nanášaného farbiva na povrch LSK bude 10^{-2} M ($c = 10^{-2}$ M), rozmer hrany LSK bude 20 mm ($L = 20$ mm) a hrúbku LSK bude 2 mm ($d = 2$ mm).

Ďalej budeme predpokladať, že je koncentrátor ožiarený referenčným spektrom AM1.5 Global. Hodnoty spektrálnej intenzity žiarenia pre konkrétnu vlnovú dĺžku $\Phi_{0\lambda}$ môžeme previesť na počet dopadajúcich fotónov.

$$N_{\lambda} = \frac{\lambda \cdot \Phi_{0\lambda}}{h \cdot c_l} \quad (m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot nm^{-1}) \quad (3.14),$$

kde $\Phi_{0\lambda}$ je spektrálna intenzita žiarenia ($W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$), h je Planckova konštanta (J·s), c_l je rýchlosť svetla ($m \cdot s^{-1}$), λ je vlnová dĺžka (m). Tento prepočet vyplýva zo vzťahu pre výpočet energie fotónu (2.21).

Napríklad pre vlnovú dĺžku 300 nm by konkrétny výpočet vyzeral takto:

$$N_{300} = \frac{\lambda \cdot \Phi_{0\ 300}}{h \cdot c_l} = \frac{300 \cdot 10^{-9} m \cdot 0,001 W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}}{6,63 \cdot 10^{-34} J \cdot s \cdot 3 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}} = 1,5 \cdot 10^{15} m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot nm^{-1} \quad (3.15)$$

Konkrétne hodnoty $\Phi_{0\lambda}$ pre jednotlivé vlnové dĺžky môžeme nájsť napr. tu [17]. Súčet dopadajúcich fotónov v meranom intervale absorptancie (300 nm – 700 nm) je $N_D = 1,36 \cdot 10^{21} m^{-2} \cdot s^{-1}$.

Pre zvolenú koncentráciu a rozmery vieme určiť odpovedajúce hodnoty absorptancie, reabsorpcie a priemernej účinnosti kolekcie.

Nasleduje výpočet maximálneho dodávaného prúdu jedným článkom LSK (I_{LC}). Priemernú hodnotu EQE_A určíme pre interval fluorescencie od 500 do 800 nm. Prúd I_{LC} vypočítame vzťahom (2.35):

$$I_{LC} = L^2 \cdot N_D \cdot A_A \cdot Q_{CA} \cdot \frac{1}{4} \cdot EQE_A \cdot q \quad (A) \quad (3.16)$$

Po dosadení dostávame:

$$I_{LC} = 20^2 mm^2 \cdot 1,4 \cdot 10^{21} m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 0,41 \cdot 0,58 \cdot \frac{1}{4} \cdot 0,82 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} C = 4,2 mA \quad (3.17)$$

Hodnotu napätia naprázdno medzi svorkami LSK určíme pomocou vzťahu (2.37) ako:

$$U_{OC} = \frac{N \cdot k_B \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{LC}}{I_0} + 1 \right) \quad (V) \quad (3.18)$$

Po dosadení dostávame:

$$U_{OC} = \frac{1,19 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} J/K \cdot 300 K}{1,6 \cdot 10^{-19} C} \cdot \ln \left(\frac{4,2 \cdot 10^{-3} A}{1,3 \cdot 10^{-10} A} + 1 \right) = 0,51 V \quad (3.19)$$

Následne môžeme spočítať dodávaný výkon použitím vzťahu (2.38) ako:

$$P_m = 4 \cdot U_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF \quad (W) \quad (3.20)$$

Po dosadení dostávame:

$$P_m = 4 \cdot U_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF = 4 \cdot 0,51 V \cdot 4,2 \cdot 10^{-3} A \cdot 0,63 = 5,4 mW \quad (3.21)$$

Výkonovú účinnosť LSK určíme ako:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{P_m}{I_e \cdot L^2} (-) \quad (3.22),$$

kde I_e je intenzita dopadajúceho žiarenia ($W \cdot m^{-2}$) a L je rozmer LSK (m).

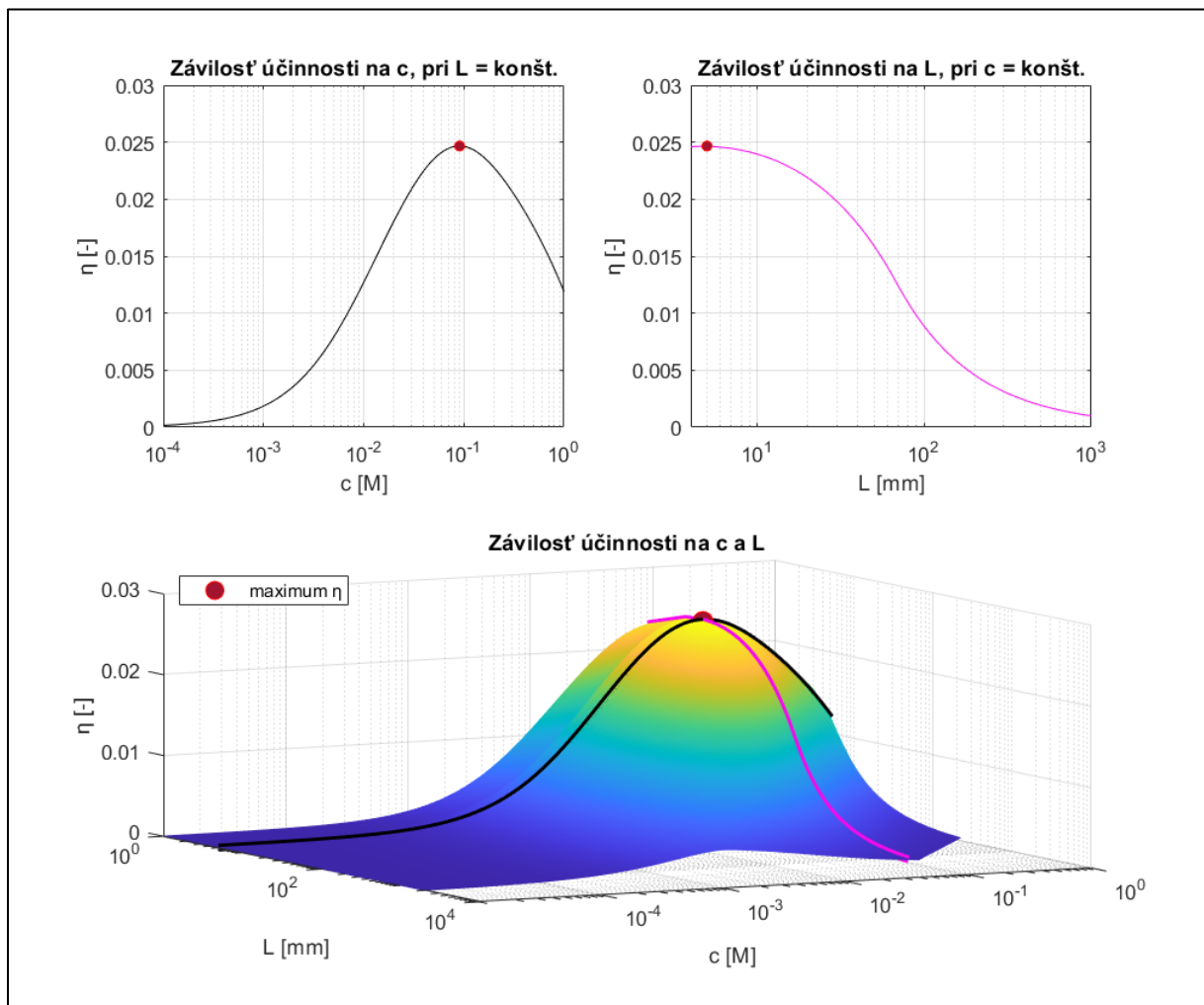
Po dosadení dostávame:

$$\eta = \frac{P_m}{I_e \cdot L^2} = \frac{5,4 \cdot 10^{-3} W}{10^3 \frac{W}{m^2} \cdot 20^2 \cdot 10^{-6} m^2} = 1,4 \% \quad (3.23)$$

Vypočítaná hodnota výkonovej účinnosti je relatívne malá. Preto je nutné sa pokúsiť zmeniť rozmery a koncentráciu nanášaného farbiva, s cieľom zvýšenia účinnosti.

3.3.4 Optimalizácia LSK

Výsledkom experimentálnej časti by mal byť návrh optimálnych rozmerov a koncentrácie farbiva nanášaného na povrch LSK vzhľadom na jeho maximálnu účinnosť a neskôr aj minimalizáciu obstarávacej ceny LSK systému. Pretože došlo k aproximácii hodnôt absorptancie a reabsorpcie, je možné výpočet hodnôt účinnosti urobiť pre ľubovoľnú hodnotu L a c . Z praktických dôvodov sú uvažované možné hodnoty rozmerov LSK v intervale 1 až 2000 mm. Pre tieto hraničné podmienky je možné nájsť optimálne hodnoty vzhľadom na maximálnu hodnotu účinnosti. Tá bola stanovená na $\eta = 2,5\%$. Tomu odpovedá $L = 5$ mm a $c = 0,09$ M.



Obr. 3.21: Znázornenie závislosti účinnosti LSK vzhľadom na jeho rozmery a koncentráciu farbiva.

Vidíme, že došlo k zvýšeniu výkonovej účinnosti a teda zníženiu optických strát. Avšak hodnota je oproti klasickým solárnym článkom ($\eta_{Si\ cell} = 20,7\%$) [33] stále relatívne nízka. Závislosť účinnosti na koncentracii a rozmeroch LSK vidíme na obr. 3.21.

3.3.5 Zmena účinnosti LSK v čase

LSK je novým systémom, preto je ťažké odhadnúť, ako sa bude meniť jeho výkonová účinnosť v čase dlhodobej prevádzky. V ideálnom prípade je potrebné sledovať zmenu parametrov systému dlhšie obdobie (niekoľko rokov), aby sme mohli vysloviť relevantné závery. Časový horizont, počas ktorého bola vypracovaná táto práca je jeden rok. Avšak dĺžka jedného roka nie je pre relevantný odhad zmeny výkonovej účinnosti dostatočná, preto budeme pri stanovovaní zmeny účinnosti vychádzať z výsledkov podobnej štúdie [25], nameraných v časovom intervale šesť a pol roka pre systém porovnateľný s naším. Rozdiel je v tom, že materiálom platne tohto porovnateľného systému je polymér (PMMA) dopovaný farbivom Red 305. Pri našom systéme je materiálom platne sklo, na ktoré je nanášané farbivo. Pre tento podobný systém bola meraná zmena hodnoty absorpčného spektra, pričom za šesť a pol roka došlo k poklesu o 0,3 %. [25] To je veľmi optimistický výsledok naznačujúci časovú stálosť prevádzkových parametrov.

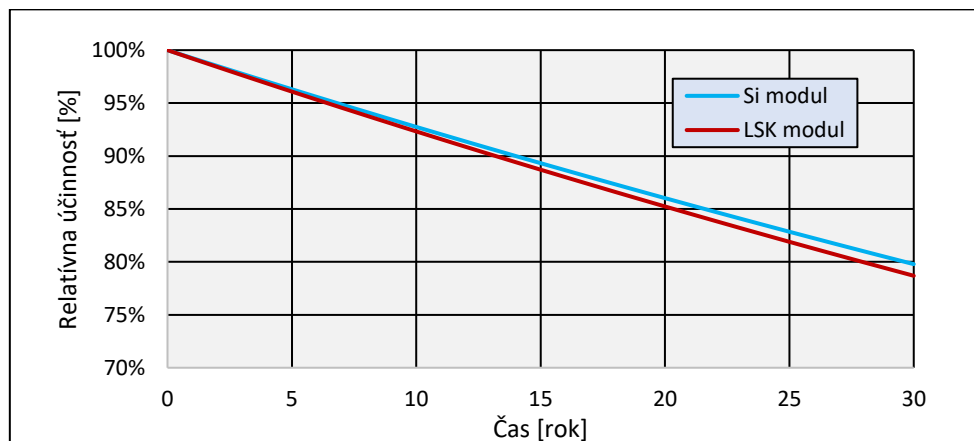
Súčasťou LSK sú okrem kremíkových článkov aj ďalšie komponenty, ktoré sami v prevádzkových podmienkach degradujú (napr. nanášaná vrstva). Ak teda porovnávame rýchlosť degradácie LSK s pripojenými kremíkovými článkami a rýchlosť degradácie samotných kremíkových článkov, ktoré sú spolu vo FV module dospejeme k záveru, že rýchlosť degradácie LSK s kremíkovými článkami bude vyššia, pretože obsahuje navyše systémy, ktoré sami degradujú. V našom prípade bude degradácia týchto dodatočných podsystémov vyjadrená poklesom hodnôt absorptancie nanášanej vrstvy.

Pre Si moduly, ktorých životnosť je 25 rokov je zistený priemerný pokles účinnosti 0,8 % za rok. [26] V ďalších úvahách budeme pracovať s kremíkovými modulmi, ktorých odhadovaná životnosť je 30 rokov. Keďže dobou životnosti pre FV moduly rozumieme čas, počas ktorého klesne pôvodná hodnota výkonovej účinnosti na 80 %, budeme uvažovať priemerný lineárny pokles účinnosti tohto systému 0,75 % za rok. Pre LSK budeme uvažovať lineárny pokles absorptancie zodpovedajúci hodnote 0,3 % za 6,5 roka [25]. Výsledný pokles účinnosti pre LSK potom dostaneme súčinom poklesu účinnosti Si systému a poklesu hodnoty absorptancie. Pre porovnanie rýchlosti degradácie oboch systémov môžeme použiť relatívnu účinnosť (η_r). Určíme pomocou vzťahu:

$$\eta_r = \frac{\eta_t}{\eta_0} 100 \% \quad (3.30),$$

kde η_r je relatívna účinnosť (%), η_t predstavuje hodnotu účinnosti v čase t (%) a η_0 je počiatočná hodnota účinnosti (%).

Odhadnuté hodnoty relatívnej účinnosti v čase sú znázornené na obr. 3.22. Vidíme, že pokles hodnôt pre LSK oproti Si modulu nie je výrazný. Treba si tiež uvedomiť, že sú zobrazené len odhadované hodnoty.



Obr. 3.22: Odhadované zmeny relatívnej účinnosti Si modulu a modulu LSK počas dlhodobej prevádzky.

4. Ekonomická časť

4.1 Ekonomické ukazovatele

Základnými ekonomickými ukazovateľmi používanými pre hodnotenie investície sú metóda *NPV* a metóda *IRR*. Tieto metódy môžeme použiť pre jednotlivé prípady investovania aj v prípade, keď sa rozhodneme porovnať investície medzi sebou. V tejto kapitole bude uvedený popis týchto metód a tiež postup hodnotenia dvoch variant pomocou rozdielovej investície.

4.1.1 NPV a IRR

Metóda čistej súčasnej hodnoty (net present value – *NPV*) je používaná, ak chceme hodnotiť investíciu a vieme odhadnúť, ako budú vyzerat' hotovostné toky v jednotlivých rokoch, počas ktorých investíciu uskutočňujeme. Taktiež pri nej musíme odhadnúť cenu nevyužitej príležitosti. To robíme pomocou diskontu (k). *NPV* definujeme ako: [27]

$$NPV = \sum_{t=0}^{T_{\gamma}} CF_t \cdot (1 + k)^{-t} \quad (4.1),$$

kde T_{γ} je počet rokov, počas ktorých plánujeme investíciu vykonávať, CF_t je hotovostný tok (cash flow) v období t a k je diskont. Zvolenému diskontu zodpovedá istá miera výnosnosti investície. Ak je *NPV* kladné, je výnosnosť investície vyššia než uvažovaná, ak je nulové, vtedy je výnosnosť investície rovná nami uvažovanej výnosnosti a ak je záporné, vtedy je výnosnosť investície nižšia než výnosnosť, ktorú uvažujeme. Pri porovnávaní viacerých variant pomocou tejto metódy je doporučená investícia, pri ktorej je hodnota *NPV* najvyššia. Naším cieľom je teda túto hodnotu maximalizovať. [27]

Ďalšou možnosťou ako hodnotiť investície je metóda vnútorného výnosového percenta (Internal rate of return - *IRR*). To definujeme implicitne vzťahom: [27]

$$\sum_{t=0}^{T_{\gamma}} CF_t \cdot (1 + x)^{-t} = 0 \quad (4.2),$$

$$x = IRR \quad (4.3),$$

kde hodnoty *IRR* dostávame ako riešenia rovnice (4.2). Problém tejto metódy však je, že nie vždy musí hodnota *IRR* existovať ako reálne číslo. Ak aj existuje, nemusí byť ľahké ju nájsť (záleží na charaktere *NPV*). Pri vyberaní medzi viacerými variantami pomocou tejto metódy nám je doporučené vybrať investíciu s najvyššiu hodnotou *IRR*. [27]

4.1.2 Rozdielová investícia

Metódu rozdielovej investície využívame najčastejšie v situáciách, keď metóda *NPV* a metóda *IRR* uprednostňujú rôzne varianty. Predpokladom je, že životnosť investície a riziko investovania (zahrnuté v diskonte (k)) sú pri porovnávaných variantoch rovnaké. Pri výpočte postupujeme tak, že si zvolíme jednu z investícií (Y) a spočítame rozdiel hotovostných tokov tejto investície a alternatívnej investície (Z). Následne určíme *IRR* tejto rozdielovej investície. [28]

$$\sum_{t=0}^{T_{\gamma}} (CF_{Yt} - CF_{Zt}) \cdot (1 + x)^{-t} = 0 \quad (4.4),$$

$$x = IRR \quad (4.5),$$

V prípade, že je *IRR* rozdielovej investície menšie než uvažovaný diskont (k), je doporučené vybrať investíciu Y . Ak je diskont k rovný *IRR*, sú investície rovnocenné a ak je *IRR* väčšie než diskont (k), odporúčime investíciu Z . [28] Podobne môžeme spočítať aj hodnotu *NPV* rozdielovej investície.

Pre nás bude kľúčový fakt, že pri tomto výpočte nemusíme poznať všetky hodnoty hotovostných tokov, ale iba tie, ktoré sa navzájom líšia. To môžeme využiť práve pri porovnávaní LSK a kremíkového solárneho systému, kedy určíme len rozdielový hotovostný tok, pretože väčšina jeho zložiek je rovnaká.

4.2 Obstarávacia cena FV systému

V tejto kapitole bude poskytnutý hlbší pohľad na obstarávaciu cenu kremíkového FV systému. Vďaka tomu budeme môcť identifikovať položky, ktoré sú priamo úmerné ploche systému a tie, ktoré súvisia s inštalovaným výkonom systému. To bude kľúčové pri určovaní obstarávacej ceny LSK systému.

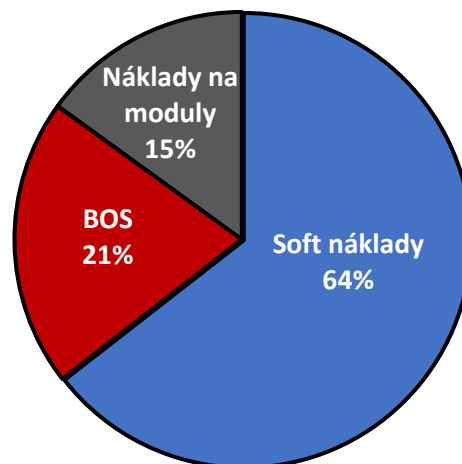
4.2.1 Zloženie obstarávacej ceny

Obstarávacia cena FV systému je vo väčšine prípadov rozdeľovaná do troch častí. Sú nimi náklady na FV moduly, náklady na BOS (balance of system) a soft nákladov. Medzi BOS zvyčajne radíme všetky náklady na komponenty FV systému okrem FV modulov. Konkrétne zloženie nákladov na BOS sa môže pre rôzne systémy mierne líšiť. Dôvodom je, že niektoré časti BOS môžu byť uvedené ako osobitné položky (napr. invertor). Celkové BOS tiež môžeme rozdeliť na štrukturálne a elektrické. Soft náklady (soft costs) tvoria časť obstarávacej ceny spojenej s maržami predávajúcich firiem, nákladmi na financovanie, na návrh systému, povolenia, poistenie a inými. Soft náklady môžeme určiť aj tak, že od celkových obstarávacích nákladov odčítame náklady na hardware (modul, invertor, BOS). [37]

Podiel jednotlivých častí na celkovej obstarávacej cene sa môže výrazne meniť v závislosti na tom o akom druhu FV systému hovoríme. Zaužívané rozdelenie je na domáce (residential), komerčné (commercial) a na systémy veľkých rozmerov (utility scale). Ďalšie možné rozdelenia sú napríklad podľa miesta umiestnenia systému (strecha, lúka, pole), inštalovaného výkonu a podľa toho, či používame systém s akumuláciou. [36]

Rolu tiež hrá to, pre akú krajinu robíme analýzu, keďže výška ciel, marží a ceny za dopravu je pre rôzne krajiny rôzna. [37]

Ak budeme uvažovať systém o inštalovanom výkone 7 kW_p, domáceho charakteru, ktorý sa nachádza v USA bude podiel jednotlivých zložiek zodpovedať obr. 4.1. [36] Tento inštalovaný výkon by mal pre bežný rodinný dom zhruba pokryť spotrebu elektrickej energie na ohrev vody a vykurovanie.

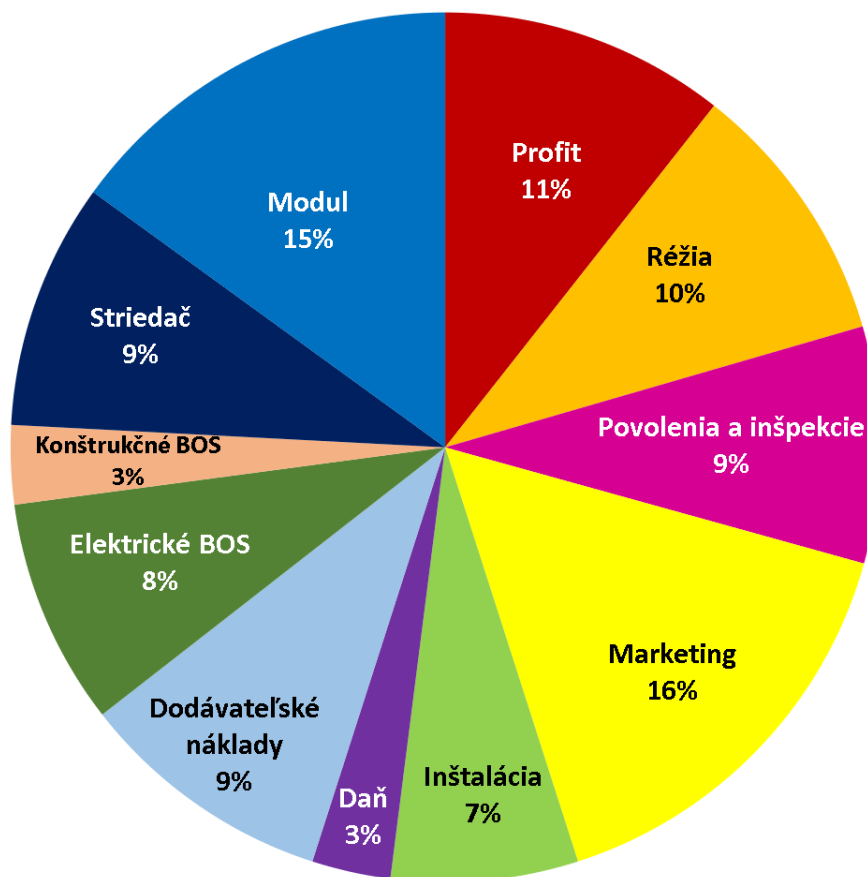


Obr. 4.1: Rozdelenie obstarávacích nákladov na FV systém o inštalovanom výkone 7 kW_p, domáceho charakteru, ktorý sa nachádza v USA. [36]

Zvolený prípad bol vybraný, pretože rovnaký systém budeme uvažovať aj v nasledujúcej kapitole pri porovnaní LSK a FV systému. Krajina USA bola zvolená, pretože sú pre ňu dostupné reprezentatívne dáta.

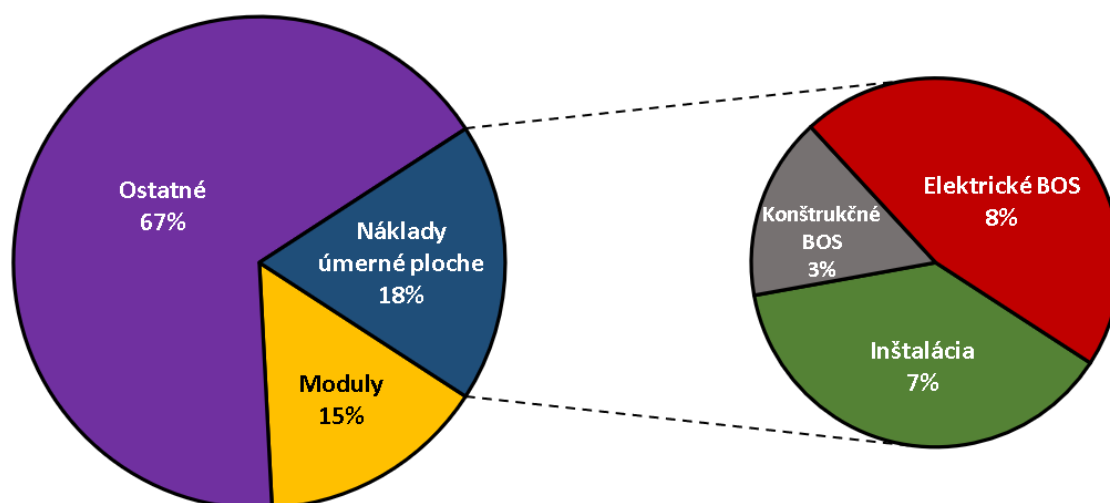
Vidíme, že podiel soft nákladov je pre tento druh systému enormný. To je dané tým, že v posledných rokoch výrazne klesli náklady na FV moduly, avšak marže, ceny za dopravu, clá a ďalšie položky spojené so soft nákladmi sa znižovali len mierne.

Pre uvedený prípad môžeme použiť aj hlbšie rozdelenie obstarávacej ceny. To vidíme na obr. 4.2.



Obr. 4.2: Podrobnejšie členenie obstarávacej ceny FV systému o inštalovanom výkone 7 kW_p, domáceho charakteru, ktorý sa nachádza v USA. [36]

Vďaka dôkladnejšiemu nahliadnutiu môžeme identifikovať náklady, ktoré sú úmerné ploche celého systému. Tu budú patriť konštrukčné BOS, elektrické BOS a náklady na inštaláciu.



Obr. 4.3: Zobrazenie nákladov úmerných ploche z celkových obstarávacej ceny pre zvolený prípad s inštalovaným výkonom 7 kW_p, domáceho charakteru, ktorý sa nachádza v USA.

Toto rozdelenie nám v ďalšej kapitole pomôže pri odhade obstarávacej ceny LSK systému.

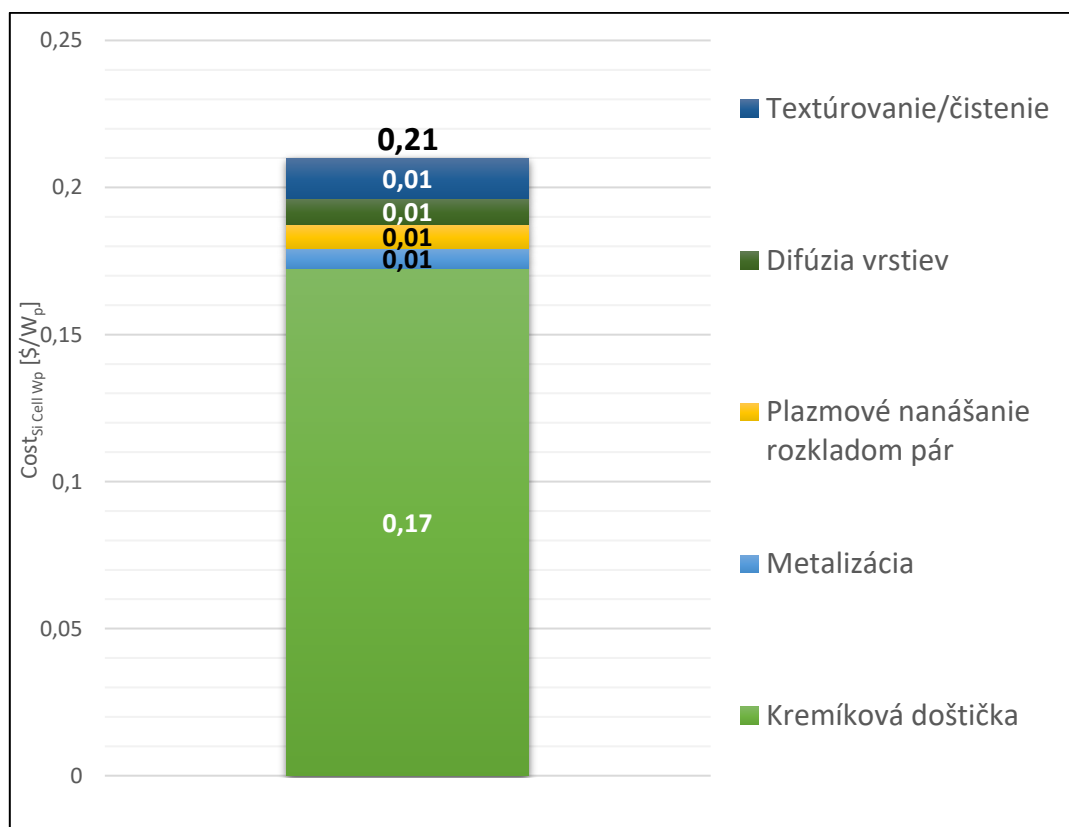
4.2 Ekonomické porovnanie LSK a kremíkovej fotovoltaiky

V tejto kapitole budeme na viacerých úrovniach porovnávať LSK a kremíkový solárny článok. Najskôr budú odhadnuté materiálne náklady na prototyp LSK laboratórnych rozmerov a budú porovnané s nákladmi na kremíkový FV článok. Následne bude navrhnuté možné riešenie modulu LSK a budú špecifikované jeho materiálne náklady. V ďalšom kroku bude zvolená aplikácia s konkrétnym inštalovaným výkonom a dôjde k ekonomickému porovnaniu variant kremíkoveho FV systému a LSK systému s využitím metódy rozdielovej investície. Nakoniec budú navrhnuté optimálne rozmery a koncentrácia farbiva LSK vo forme modulu s cieľom minimalizovať celkovú obstarávaciu cenu systému v $\$/W_p$.

4.2.1 Prehľad súčasných materiálnych nákladov laboratórneho LSK a kremíkoveho článku

V tejto podkapitole najskôr uvedieme hodnotu materiálnych nákladov na výrobu kremíkoveho článku. Následne dôjde k odhadnutiu materiálnych nákladov potrebných na výrobu laboratórneho LSK s pripojeným kremíkovým článkom a obe zariadenia budú porovnané.

Jednotlivé náklady na výrobu kremíkoveho článku vidíme na obr. 4.4. Hlavnú zložku tvorí cena za kremíkovú doštičku. Ďalšie náklady sú spojené s úpravou povrchu použitej doštičky.



Obr. 4.4: Zobrazenie položiek tvoriacich náklady na výrobu kremíkoveho článku. [33]

Ak chceme spočítať náklady na výrobu prototypu LSK musíme najskôr spočítať množstvo materiálu na jeho výrobu. V časti 3.3.3 bola pre konkrétny rozmer hrany 20 mm, hrúbku skla 2 mm a koncentráciu nanášaného roztoku $c = 10^{-2}$ M, vypočítaná výkonová účinnosť LSK. Jej hodnota bola 1,4 %. Pre túto koncentráciu sme v časti 3.1.1 spočítali množstvo materiálu na výrobu vrstvy s farbivom na päť LSK

(pretože sme počítali s objemom 1 ml a na tento rozmer pri jednom nanesení postačuje 0,2 ml - viac časť 3.1.1). V tabuľke 4.1 vidíme ceny materiálov, ktoré sú potrebné na výrobu farbiva.

Ak pripočítame náklady na sklo, antireflexnú vrstvu (AR) a kremíkový solárny článok dostaneme celkové náklady na výrobu LSK s pripojeným kremíkovým článkom. Keďže pre tento prípad poznáme aj účinnosť LSK, môžeme dopočítať predpokladaný dodávaný výkon pri osvetlení štandardizovaným solárnym spektrom AM1.5 Global s intenzitou dopadajúceho žiarenia 1000 W/m^2 a porovnať ho s klasickým kremíkovým solárnym článkom.

Použitý materiál	Cena	Jednotka	Zdroj
RED 300	2	\$/g	[29]
PMMA	1	\$/kg	[30]
Toluén	1,6	\$/kg	[31]
Sklo s AR vrstvou	5,1	\$/m ²	[32]
$Cost_{Si \text{ Cell } W_p}$	0,21	\$/W _p	[33]

Tabuľka 4.1: Prehľad cien za materiál na výrobu LSK s pripojeným kremíkovým článkom (obr. 2.9).

Cenu kremíkoveho FV článku môžeme z $$/W_p$ jednoducho prepočítať na $$/m^2$, ak poznáme jeho účinnosť a uvažujeme, že je osvetlený štandardizovaným solárnym spektrom AM1.5 Global. V tomto prípade je účinnosť článku ($\eta_{Si \text{ cell}}$) 20,7 % [33].

$$Cost_{Si \text{ cell } m^2} = Cost_{Si \text{ cell } W_p} \cdot \eta_{Si \text{ cell}} \cdot I_e = 0,21 \frac{\$}{W_p} \cdot 20,7 \% \cdot 1000 \frac{W}{m^2} = 43,5 \frac{\$}{m^2} \quad (4.6),$$

kde I_e je intenzita dopadajúceho žiarenia ($W \cdot m^{-2}$).

Následne môžeme vypočítať hodnotu nákladov pre náš prototyp LSK. Tie vidíme v tabuľke 4.2.

Použitý materiál	RED 305	PMMA	Toluén	Sklo s AR vrstvou	$Cost_{Si \text{ Cell } m^2}$
Použité množstvo	2,16 mg	29,3 mg	173 mg	$4 \cdot 10^{-4} \text{ } /m^2$	$1,6 \cdot 10^{-4} \text{ } /m^2$
Čiastkové náklady (\$)	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$
Celkové náklady (\$)	0,014				

Tabuľka 4.2: Materiálne náklady na prototyp LSK s pripojeným kremíkovým článkom.

Poznáme rozmery LSK a teda jednoducho určíme hodnotu nákladov na m^2 ako:

$$Cost_{LSK \text{ cell } m^2} = \frac{Cost_{LSK \text{ cell}}}{L^2} = \frac{0,014 \$}{20 \cdot 20 \cdot 10^{-6} m^2} = 34 \frac{\$}{m^2} \quad (4.7),$$

kde $Cost_{LSK \text{ cell}}$ sú náklady na jeden LSK s pripojeným kremíkovým článkom (\$) a L predstavuje rozmer LSK (m).

Rovnicou (3.21) sme určili výkon dodávaný prototypom LSK s pripojeným kremíkovým článkom. Následne určíme hodnotu nákladov na LSK s pripojeným kremíkovým článkom v $$/W_p$ ako:

$$Cost_{LSK \text{ cell } W_p} = \frac{Cost_{LSK \text{ cell}}}{P_m} = \frac{0,014 \$}{5,4 \cdot 10^{-3} W_p} = 2,5 \frac{\$}{W_p} \quad (4.8)$$

Získané výsledky sú zobrazené v tabuľke 4.3. Vidíme, že hodnota účinnosti LSK s pripojeným kremíkovým článkom je oproti kremíkovému článku je oveľa nižšia. Tiež vidíme, že náklady na vyrobený W_p sú pre LSK s pripojeným kremíkovým článkom vyššie než pre kremíkový článok. To je dané práve nízkou hodnotou účinnosti, na ktorú majú výrazný vplyv optické straty.

	Si článok	LSK
Účinnosť	20,7 %	1,4 %
Náklady $_{W_p}$ (\$/ W_p)	0,21	2,5
Náklady $_{m^2}$ (\$/ m^2)	44	34
Náklady na jeden produkt (\$)	0,017	0,014

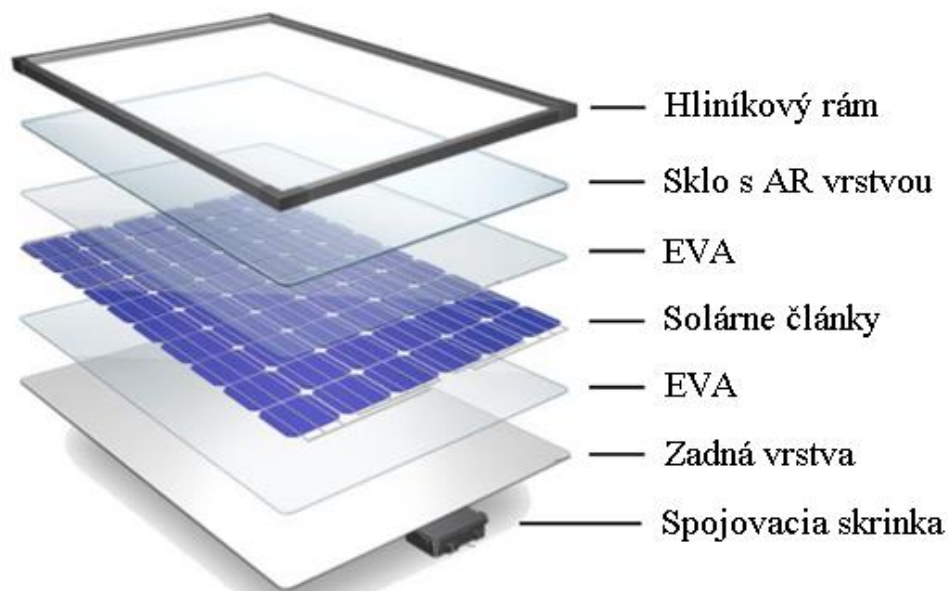
Tabuľka 4.3: Porovnanie materiálnych nákladov na kremíkový článok o rozmeroch 20 mm x 20 mm a LSK s pripojeným kremíkovým článkom o rovnakých rozmeroch, hrúbke 2 mm a koncentrácií použitého farbiva 10^{-2} M.

Zvolená hrúbka pripojeného kremíkového článku bola 2 mm.. Jej zníženie prináša zníženie nákladov, keďže sa znižuje plocha, ktorú zaberá kremíkový článok. Dolná hranica hrúbky je z výrobných dôvodov stanovená na 1 mm. [34]

4.2.2 Náklady na modul LSK

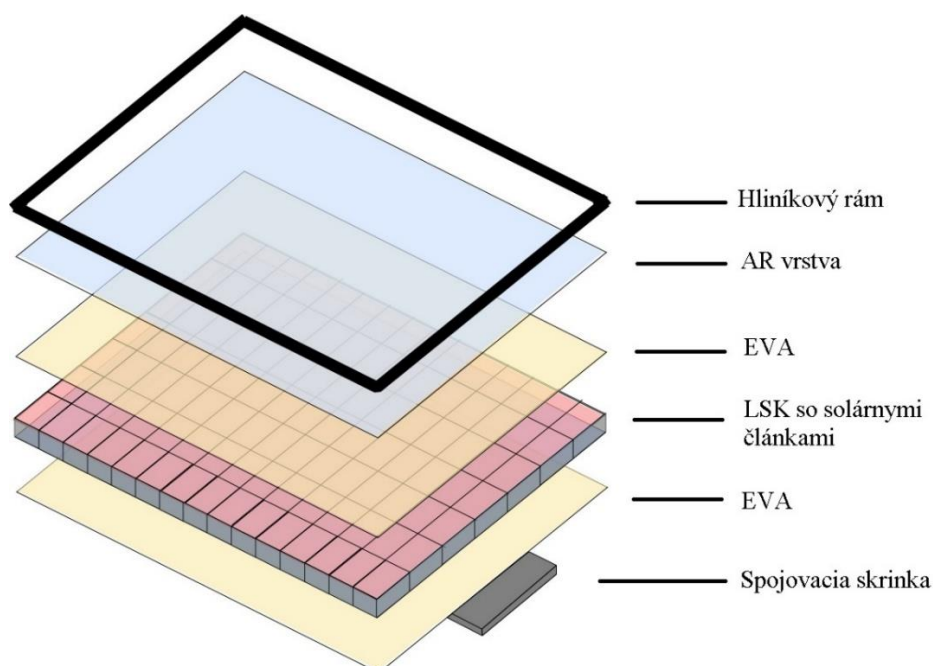
Táto podkapitola sa bude zaoberať vytvorením jednoduchého návrhu FV modulu zloženého z LSK s pripojenými kremíkovými článkami. Po uvedení materiálnych nákladov na kremíkový FV modul, odhadneme materiálne náklady na LSK modul.

Podobne ako z klasických kremíkových článkov je možné aj z LSK vytvoriť modul. Príklad zloženia klasického modulu vytvoreného z kremíkových článkov je zobrazený na obr. 4.5.



Obr. 4.5: Schematické znázornenie častí klasického kremíkového modulu. [35]

Od klasického kremíkového modulu sa návrh modulu zloženého z LSK bude líšiť tým, že solárne články budú nahradené LSK s pripojenými kremíkovými článkami. Sklo bude zahrnuté v LSK. Vrstva EVA (ethylene-vinyl acetate) slúžiaca ako ochrana proti preniknutiu vlhkosti bude umiestnená podobne ako pri kremíkovom module. Zadná vrstva tu nebude, aby bol LSK modul transparentný. Ide len o základný návrh.



Obr. 4.6: Schematické znázornenie častí modulu zloženého z LSK s pripojenými kremíkovými článkami.

Ako podklad pre odhad nákladov na modul LSK môžeme použiť údaje získané pre kremíkový FV modul. Tieto údaje vidíme v tabuľke 4.4. Uvažovaný modul má rozmery 1,65 m x 0,99 m.

Použitý materiál	Náklady	Jednotka
Rám	13,5	\$/modul
EVA	1,9	\$/m ²
Káblovanie	2,5	\$/m ²
Spojovacia skrinka	6,5	\$/modul

Tabuľka 4.4: Časť nákladov na kremíkový FV modul. [33]

Ak budeme predpokladať zjednodušenú situáciu, môžeme všetky tieto náklady prepočítať na \$/m². Z obr. 4.6 vidíme, že vrstva EVA (ethylene-vinyl acetate) sa v module LSK nachádza dva krát. Poznáme tiež náklady na LSK v \$/m² a teda môžeme určiť celkové náklady na LSK modul v \$/m². Z nich môžeme pomocou vzťahu (4.9) určiť náklady na LSK modul v \$/W_p.

$$Cost_{LSK\ module\ W_p} = Cost_{LSK\ module\ m^2} \cdot \frac{L^2}{P_m} \left(\frac{\$}{W_p} \right) \quad (4.9)$$

Výsledky sú znázornené v tabuľke 4.5.

Použitý materiál	Náklady	Jednotka
Rám	8,3	\$/m ²
EVA	1,9	\$/m ²
Káblovanie	1,5	\$/m ²
Spojovacia skrinka	4,0	\$/m ²
$Cost_{Si\ Cell\ m^2}$	34,0	\$/m ²
$Cost_{LSK\ module\ m^2}$	51,5	\$/m ²
$Cost_{LSK\ module\ W_p}$	3,8	\$/W _p

Tabuľka 4.5: Odhadnuté náklady na LSK modul.

Pri kremíkových FV systémoch platí, že účinnosť FV článku je väčšia než účinnosť FV modulu. To je dané optickými stratami ku ktorým dochádza pri prechode svetla napríklad medzi vrstvou vzduchu a skla (obr. 4.5). Pri LSK module by mal byť tento dodatočný typ optických strát minimálny, nakoľko vrstva skla je priamo súčasťou LSK.

Po vytvorení návrhu modulu LSK a odhadnutí jeho materiálnych nákladov, môžeme prejsť k odhadnutiu celkovej obstarávacej ceny na LSK systém s konkrétnym inštalovaným výkonom. To urobíme v nasledujúcej kapitole.

4.2.3 Obstarávací cena LSK systému

Ak chceme porovnávať konečnú obstarávaciu cenu kremíkového FV systému so systémom zloženým z LSK modulov, nestačí nám porovnať náklady na moduly, pretože k výslednej obstarávacej cene sa pripočítajú aj ďalšie položky. Ak zvolíme konkrétny prípad, v ktorom vytvárame FV systém o inštalovanom výkone 7 kW_p pripojený k sieti, pri ktorom sú moduly inštalované na strechu domu, môžeme náklady na klasický kremíkový systém vyjadriť tabuľkou 4.6. Tento prípad bol zvolený pretože sa jedná o systém s relatívne nízkym inštalovaným výkonom, pre ktorý sú dostupné dostatočne reprezentatívne dáta. Tieto dáta sú platné pre USA [36], v Česku pretože neboli nájdené aktuálne štúdie, ktoré by na väčšej vzorke predajcov a kupujúcich do detailov dokumentovali jednotlivé položky, z ktorých sa skladá výsledná cena FV systému. Bolo by možné realizovať aj štúdiu pre prípad vyššieho inštalovaného výkonu, no ako ďalej ukážeme, rozmery systému realizovaného z LSK by boli veľmi veľké (tisíce m^2) a z ekonomického pohľadu by mali priniesť rovnaké výsledky.

Jednotky	(\$/W _p)	(\$/m ²)
Profit	0,29	57
Réžia	0,27	53
Marketing	0,43	84
Povolenia a inšpekcie	0,24	47
Inštalácia	0,19	37
Daň	0,06	12
Dodávateľské náklady	0,26	51
Elektrické BOS	0,23	45
Konštrukčné BOS	0,08	16
Striedač	0,25	49
Si modul	0,41	80
Spolu	2,71	528

Tabuľka 4.6: Kalkulačný vzorec pre konečnú cenu FV systému zloženého z monokryštalických kremíkových modulov s účinnosťou 19,5 %. [36] Červenou farbou sú označené položky, ktoré sú priamo úmerne ploche FV systému.

Keďže poznáme účinnosť FV modulov a požadovaný inštalovaný výkon, môžeme si spočítať aká bude plocha použitých modulov.

$$S_{Si \text{ modules}} = \frac{P_{inst}}{\eta_{Si \text{ modul}} \cdot I_e} = \frac{7000 W_p}{19,5\% \cdot 1000 W_p/m^2} = 36 \text{ m}^2 \quad (4.10),$$

kde P_{inst} je hodnota inštalovaného výkonu (W_p), $\eta_{Si \text{ modul}}$ je účinnosť kremíkového FV modulu (%).

V tabuľke 4.6 môžeme prepočítať hodnoty jednotlivých položiek z $\$/W_p$ na $\$/m^2$. Príklad výpočtu pre profit je nasledovný:

$$Profit_{Si \text{ } \$/m^2} = Profit_{Si \text{ } \$/W_p} \cdot \frac{P_{inst}}{S_{Si \text{ modules}}} = 0,29 \frac{\$}{W_p} \cdot \frac{7000 W_p}{36 \text{ m}^2} = 57 \frac{\$}{m^2} \quad (4.11),$$

Budeme predpokladať, že ak vytvoríme systém o rovnakom inštalovanom výkone z LSK modulov, časť položiek bude rovnaká, niektoré však budú rozdielne, pretože plocha na ktorej bude FV systém inštalovaný, bude pre oba prípady rozdielna.

Medzi položky, ktoré budú rozdielne budeme radiť náklady na inštaláciu, elektrické BOS (balance of system) a štrukturálne BOS, pretože sú úmerné ploche systému (obr. 4.3). Keďže používame iný systém, líšiť sa budú tiež náklady na modul. Plochu na ktorej sa bude nachádzať LSK systém určíme vzťahom 4.12 ako:

$$S_{LSK \text{ modules}} = \frac{P_{inst}}{\eta_{LSK \text{ modul}} \cdot I_e} = \frac{7000 W_p}{1,4 \% \cdot 1000 W_p/m^2} = 515 \text{ m}^2 \quad (4.12),$$

Vidíme, že táto plocha viac než 14 krát väčšia.

Podobne ako sme vytvorili tabuľku 4.6 pre kremíkový FV systém, vytvoríme tabuľku aj pre LSK systém. Uviedli sme, že ak predpokladáme rovnaký inštalovaný výkon, bude časť položiek v $\$/W_p$ pre obe variant rovnaká. Náklady na LSK modul sme určili v predošlej kapitole. Teraz ostáva odhadnúť zvyšné položky, ktoré nebudú pre oba systémy rovnaké. Predpokladáme, že tieto náklady rastú úmerne s nárastom rozmerov systému. Preto budeme uvažovať, že pre tento druh nákladov bude platiť rovnosť hodnôt v $\$/m^2$. Tieto hodnoty môžeme potom prepočítať na hodnoty v $\$/W_p$. Prepočet pre inštalčné náklady bude nasledovný:

$$Inštalácia_{LSK \text{ } \$/W_p} = \frac{Inštalácia_{LSK \text{ } \$/m^2}}{\eta_{LSK \text{ modul}} \cdot I_e} = \frac{37 \frac{\$}{m^2}}{1,4 \% \cdot 1000 W_p/m^2} = 2,72 \frac{\$}{W_p} \quad (4.13)$$

Použili sme, že $Inštalácia_{Si \text{ } \$/m^2} = Inštalácia_{LSK \text{ } \$/m^2}$.

Podobne môžeme pre LSK prepočítať hodnoty z $\$/W_p$ na $\$/m^2$. Výpočet pre profit bude nasledovný:

$$Profit_{LSK \text{ } \$/m^2} = Profit_{LSK \text{ } \$/W_p} \cdot \eta_{LSK \text{ modul}} \cdot I_e = 0,29 \frac{\$}{W_p} \cdot 1,4 \% \cdot 1000 \frac{W_p}{m^2} = 4 \frac{\$}{m^2} \quad (4.14)$$

Výsledné hodnoty vidíme v tabuľke 4.7.

Jednotky	(\$/W _p)	(\$/m ²)
Profit	0,29	4
Réžia	0,27	4
Marketing	0,43	6
Povolenia a inšpekcie	0,24	3
Inštalácia	2,72	37
Daň	0,06	1
Dodávateľské náklady	0,26	4
Elektrické BOS	3,30	45
Konštrukčné BOS	1,15	16
Striedač	0,25	3
LSK modul	3,79	51
Spolu	12,76	173

Tabuľka 4.7: Kalkulačný vzorec pre konečnú cenu FV systému zloženého z LSK modulov s účinnosťou 1,4 %.

Vidíme, že časti obstarávacej ceny na W_p sú pri LSK výrazne vyššie než pri klasickom kremíkovom FV systéme. Dôvodom je nízka účinnosť LSK.

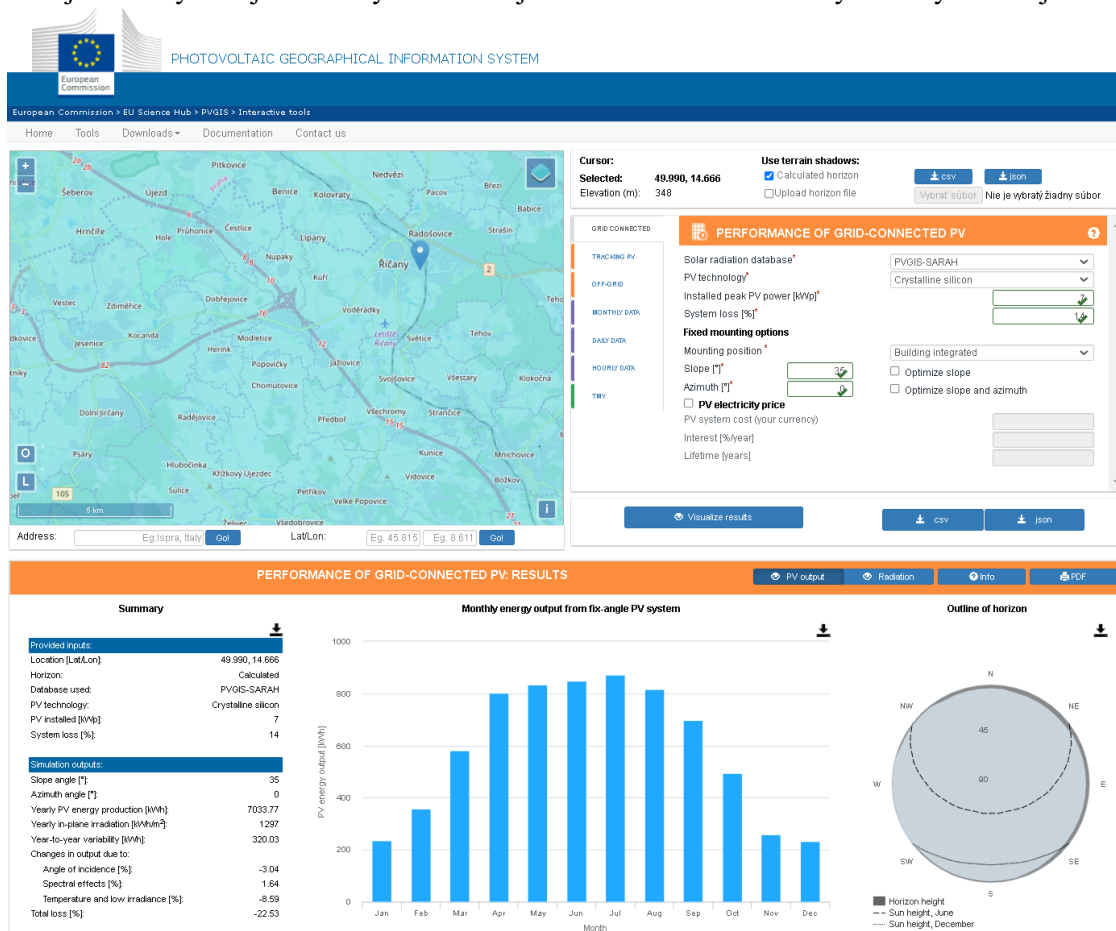
V kapitole 3.3.5 bola popísaná zmena účinnosti LSK modulu v čase. Z nej vyplynulo, že účinnosť LSK vo forme modulu bude vždy nižšia než účinnosť kremíkového modulu. Degradácia nanosenej vrstvy na povrch LSK bola v sledovanom období veľmi nízka a preto, ak budeme predpokladať, že tento pokles bude pokračovať rovnakým tempom, nie je výhodné vrstvu počas prevádzky znovu nanášať. Keďže LSK systém v sebe obsahuje ako subsystém solárne články, môžeme uvažovať, že náklady na prevádzku budú porovnateľné s nákladmi na prevádzku kremíkového FV systému.

Ak chceme pre porovnanie použiť metódu rozdielovej investície, malo by byť splnené, že porovnané investície sú rovnako rizikové a majú rovnakú životnosť. Keďže ide o hrubé porovnanie, predpokladajme, že tieto predpoklady sú splnené. Ďalej je nutné poznať rozdiel hotovostných tokov jednotlivých investícií v stanovenom časovom období a tiež určiť hodnotu diskontu.

Životnosť použitých kremíkových modulov je 30 rokov. [36] Budeme teda predpokladať, že LSK systém dokáže fungovať rovnaké obdobie.

Hodnotu diskontu môžeme určiť napríklad tak, že nájdeme inú investíciu, ktorej časový horizont je rovnaký a miera rizika je porovnateľná. Môžeme sa pozrieť napríklad na výnosnosť dvadsaťročných českých štátnych dlhopisov. Tá sa pohybuje okolo 2 %. [38] Hodnotu diskontu teda zvolíme na túto úroveň.

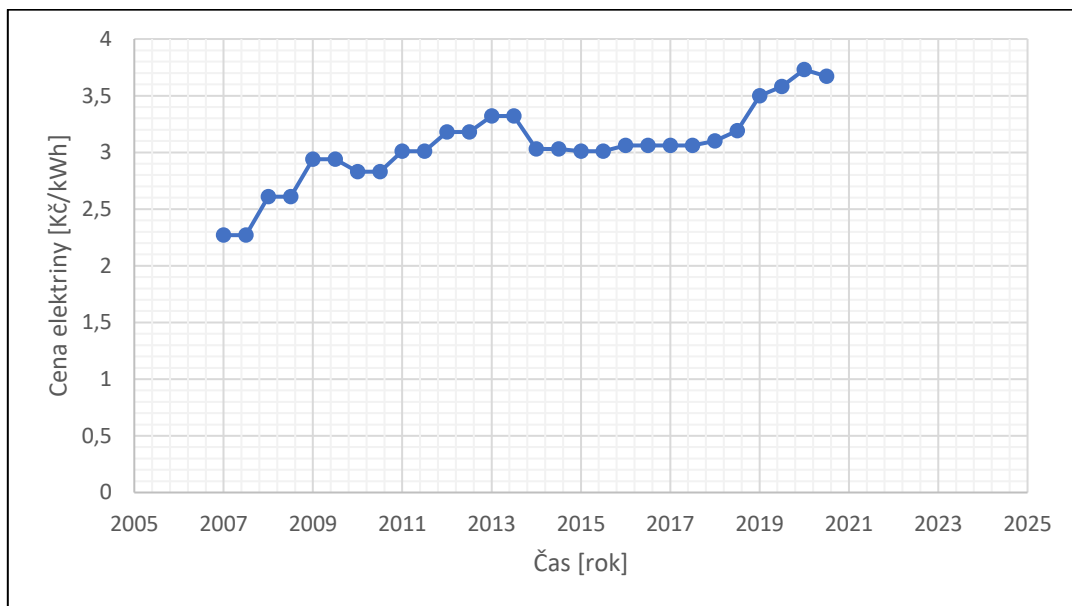
Pre konkrétny výpočet je tiež nutné zvoliť oblasť, v ktorej budú systémy umiestnené. Z nej je potom možné pomocou programu PVGIS (obr. 4.7) odhadnúť množstvo dopadajúceho žiarenia na plochu systémov za rok. V našom prípade zvolíme rodinný dom nachádzajúci sa v meste Říčany. Pre toto umiestnenie dostávame z programu PVGIS hodnotu ročnej produkcie 7034 kWh. Zvolený sklon systému je 35 ° a systém je natočený smerom k juhu. Odhadnutá hodnota systémových strát je 14 %.



Obr. 4.7: Znáznornenie hodnôt získaných z programu PVGIS pre konkrétne umiestnenie systému. [39]

Taktiež je nutné zvolit referenčnú cenu elektrickej energie, aby bolo možné určiť koľko financií ušetríme produkciou elektriny z FV systému, pričom pre jednoduchosť predpokladáme, že všetka vyrobená elektrina bude spotrebovaná. Ak sa napríklad pozrieme na aktuálny cenník elektriny spoločnosti Pražská energetika, a.s. a zvolíme tarifu D02d vidíme, že celkom s DPH zaplatíme 3,87 Kč/kWh. Je tu zahrnutý poplatok za spotrebovanú elektrinu, daň z elektriny, poplatok za distribuované množstvo elektriny a poplatok za systémové služby. [40]

Keďže uvažujeme časový horizont 30 rokov je rozumné predpokladať, že cena elektriny nebude konštantná. Avšak detailná predikcia zmeny cien elektriny nie je v rozsahu tejto práce. Môžeme sa ale pozrieť na odpovedajúce ceny elektriny pre Českú republiku z minulých rokov (obr. 4.8) a pomocou nich odhadnúť jej priemernú percentuálnu zmenu. Ak to urobíme, dostávame medziročný nárast o 3,7 %. V ďalších úvahách preto budeme uvažovať uvedený nárast ceny elektriny v každom roku.



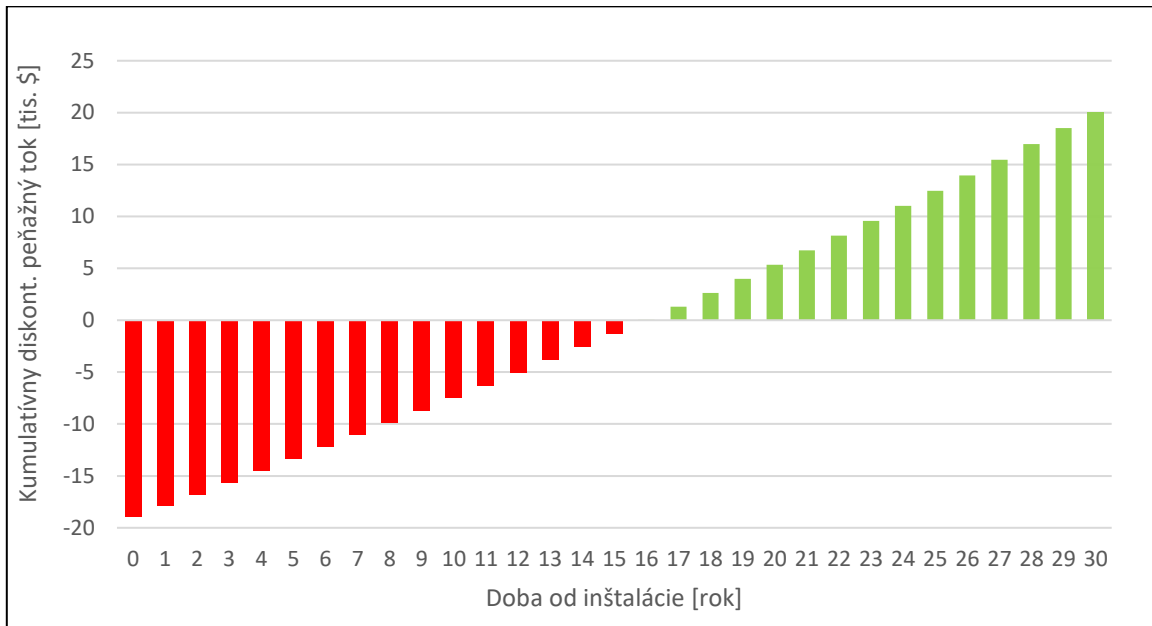
Obr. 4.8: Znáročenie zmeny ceny elektriny od roku 2007 do roku 2020. Konkrétne hodnoty odpovedajú priemerným cenám pre domácnosti v Českej republike. Ceny sú uvádzané s DPH. [41]

Keďže sú všetky ostatné hodnoty okrem ceny elektrickej energie uvedené v \$, prepočítame cenu elektriny na \$, pričom uvažujeme, že 1 Kč je 0,046 \$. [42] Z 3,87 Kč/kWh teda dostávame 0,18 \$/ kWh.

Poslednou úlohou je odhadnúť náklady na prevádzku a údržbu pre oba systémy. Začneme kremíkovým systémom, pre ktorý ich môžeme odhadnúť na 20 \$/kW_p za rok. [43] Ďalej budeme uvažovať, že náklady na prevádzku a údržbu LSK budú rovnaké ako pre kremíkový systém. Keďže inštalovaný výkon oboch systémov je 7 kW_p, odhadujeme ich prevádzkové náklady 140 \$ za rok.

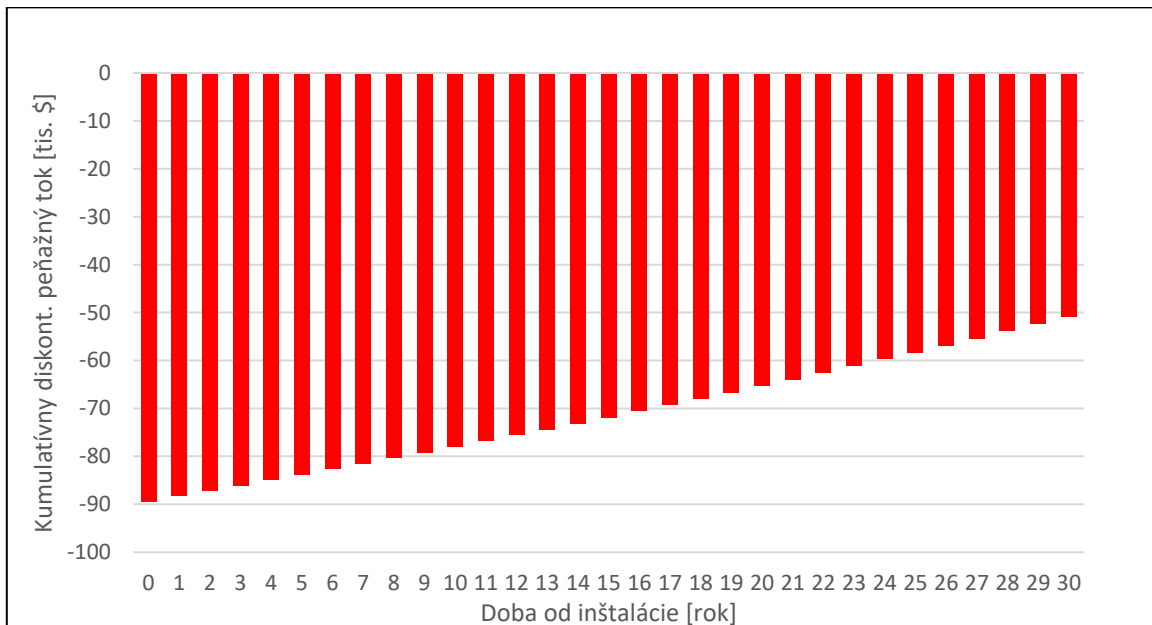
Po stanovení hodnôt všetkých parametrov môžeme vykonať výpočet rozdielovej investície. Predtým ale pre názornosť spočítame *NPV* jednotlivých projektov.

Vidíme, že kremíkový FV systém začína byť rentabilný už v 16. roku jeho používania. Tento výsledok je očakávaný.



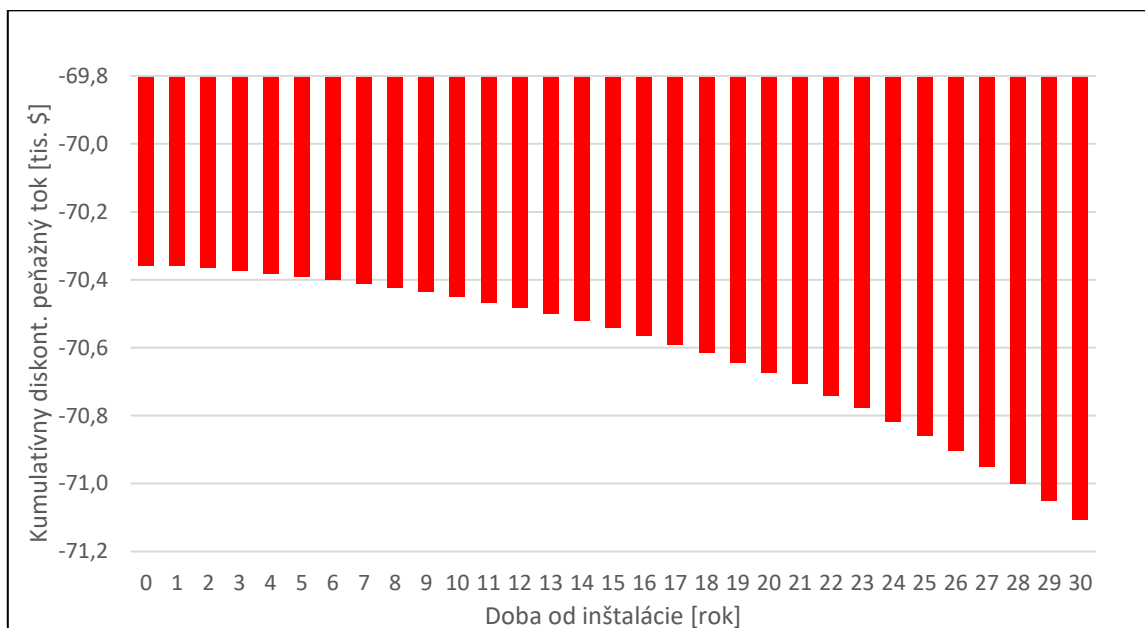
Obr. 4.9: Znáročnenie kumulatívneho diskontovaného peňažného toku v tis. \$ pre kremíkový FV systém. Konkrétny výpočet je uvedený v prílohe A.

FV systém zložený z LSK sa javí ako nerentabilný. Dôvodom je, že počiatočné investičné výdaje FV LSK systému sú oproti kremíkovému systému oveľa vyššie. Tiež vidíme, že tempo návratnosti je príliš pomalé, nakoľko aj po tridsiatich rokoch je hodnota *NPV* stále výrazne záporná.



Obr. 4.10: Znáročnenie kumulatívneho diskontovaného peňažného toku v tis. \$ pre LSK systém. Konkrétny výpočet je uvedený v prílohe B.

Teraz metódou rozdielovej investície porovnáme oba systémy. V nultom roku dostávame výsledok rozdielu hotovostných tokov rozdielom investičných výdavkov na oba systémy. Pri porovnaní tabuľky 4.6 a 4.7 vidíme, že hodnota obstarávacej ceny je pre LSK vyššia. Ak teda v súlade so značením v kapitole 4.1.2 zvolíme LSK za systém *Y* a za systém *Z* zvolíme variantu s kremíkom, dostávame v nultom roku zápornú hodnotu hotovostného toku. V ďalších rokoch by bol hotovostný tok jednotlivých investícií zložený z nákladov na prevádzku, ktoré sú pre oba systémy rovnaké a z potencionálneho ušetrenia pri nákupe z elektrickej energie. Oba systémy boli konštruované na rovnaký inštalovaný výkon. V kapitole 3.3.5 sme uviedli, že pri prijatých predpokladoch je postupná rýchlosť degradácie LSK systému vždy vyššia než rýchlosť degradácie kremíkového systému. To znamená, že v čase bude LSK systém vyrábať menej energie než kremíkový systém. Množstvo vyrobenej energie predstavuje kladný prírastok k hotovostnému toku. Z toho vyplýva, že ak urobíme rozdiel hotovostných tokov LSK systému a kremíkového systému, výsledok bude záporný.



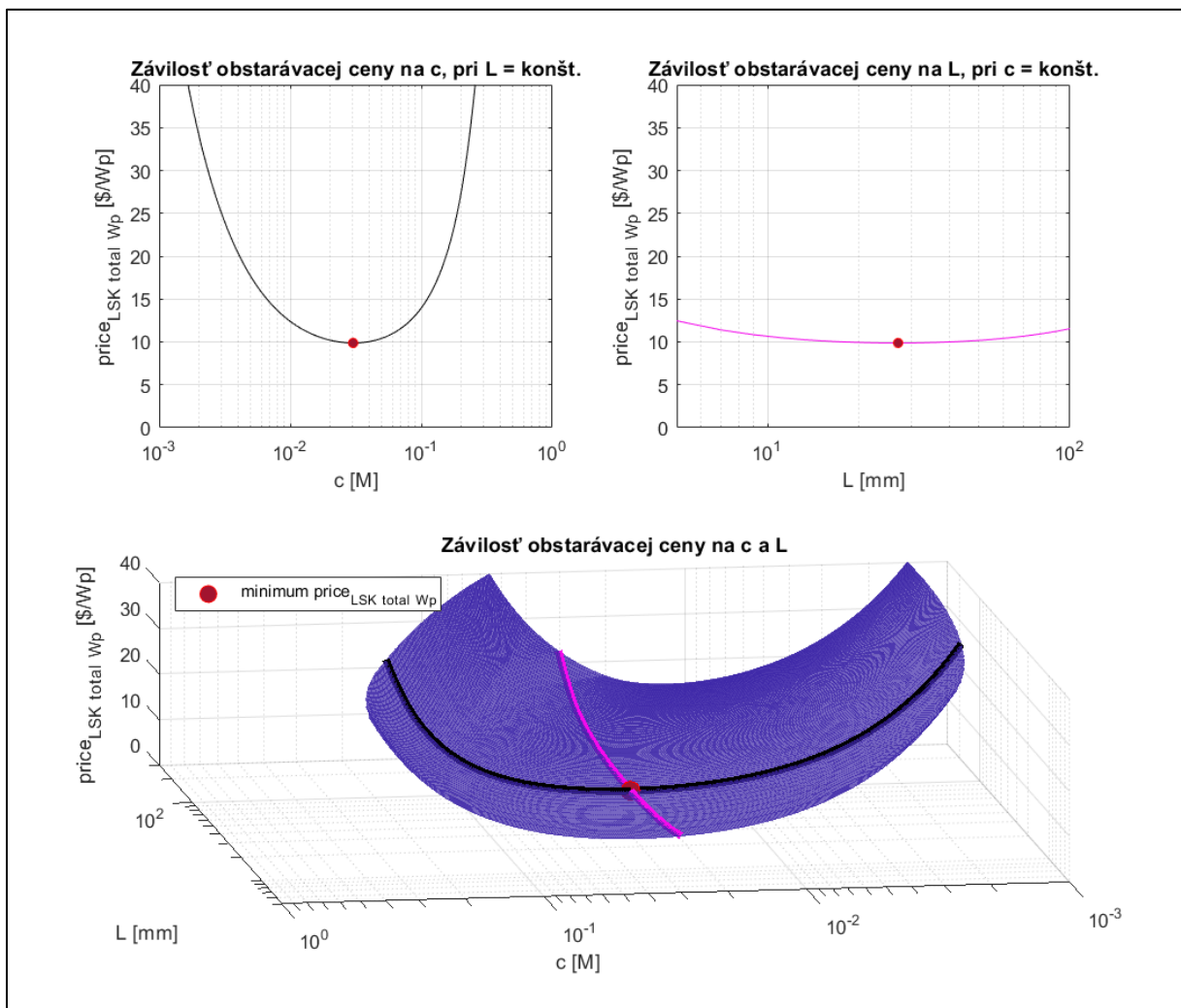
Obr. 4.11: Znáročenie kumulatívneho diskontovaného peňažného toku v tis. \$ rozdielovej investície. Konkrétny výpočet je uvedený v prílohe C.

Keďže je rozdiel hotovostných tokov vždy záporný, je záporná aj výsledná hodnota *NPV* rozdielovej investície. Z toho plynie, že z ekonomického pohľadu nie je systém zložený z LSK oproti kremíkovému FV systému výhodný. Z charakteru *NPV* rozdielovej investície (obr. D.1) vyplýva, že hodnotu *IRR* nie je možné stanoviť.

Je dobré si uvedomiť, že v tomto prípade konkrétna voľba diskontu ani hodnota medziročného percentuálneho rastu ceny elektrickej energie nehrajú výraznú rolu na výslednom hodnotení. Viac vidíme v prílohe D.

4.2.4 Zníženie optických strát s cieľom optimalizácie obstarávacej ceny LSK

Z predchádzajúcej kapitoly vidíme, že aby bol systém zložený z LSK oproti kremíkového systému ekonomicky výhodnejší, musí byť nižšia jeho obstarávacia cena, alebo musí generovať viac elektrickej energie než kremíkový systém. Zmenou hodnoty koncentrácie nanášaného farbiva a rozmerov hrany LSK ovplyvňujeme optické straty systému. Z toho vyplýva, že takto ovplyvňujeme aj výsledné množstvo vyprodukovanej elektrickej energie a teda aj obstarávaciu cenu LSK systému. Podobne ako v kapitole 3.3.4 sú z praktických dôvodov uvažované hodnoty rozmerov LSK v intervale 1 mm až 2000 mm. Vzhľadom na tieto hraničné podmienky môžeme nájsť optimálne hodnoty s cieľom minimalizácie hodnoty obstarávacej ceny. Tá bola stanovená na 9,88 $\$/W_p$. Tomu odpovedajú $L = 27$ mm a $c = 0,03$ M (obr. 4.12). Ak to porovnáme s hodnotami určenými v kapitole 3.3.4., kde došlo k optimalizácii s cieľom nájsť maximálnu hodnotu účinnosti, vidíme, že hodnoty rozmerov a koncentrácie nanášaného farbiva sa líšia. To je dané cenami jednotlivých materiálov. Jednotlivé položky tvoriace obstarávaciu cenu vidíme v tabuľke 4.8.



Obr. 4.12: Znázornenie závislosti obstarávacej ceny LSK systému na rozmeroch hrany LSK a koncentrácií nanášaného farbiva. Červenou farbou je vyznačená hodnota optimálnej obstarávacej ceny LSK.

Aj keď došlo k zníženiu obstarávacích nákladov na LSK systém, sú v porovnaní s kremíkovým systémom stále vysoké. Je to spôsobené tým, že samotné náklady na LSK modul sú vysoké a hodnota účinnosti LSK systému je v porovnaní s kremíkovým systémom nízka.

Jednotky	(\$/W _p)	(\$/m ²)
Profit	0,29	6
Réžia	0,27	6
Marketing	0,43	9
Povolenia a inšpekcie	0,24	5
Inštalácia	1,80	37
Daň	0,06	1
Dodávateľské náklady	0,26	5
Elektrické BOS	2,18	45
Konštrukčné BOS	0,76	16
Striedač	0,25	5
LSK modul	3,34	69
Spolu	9,88	203

Tabuľka 4.8: Optimalizácia výslednej obstarávacej ceny pre LSK v \$/W_p. Menenými parametrami sú rozmer hrany LSK a koncentrácia nanášaného farbiva. Optimálna hodnota rozmeru LSK bola stanovená na 27 mm a hodnota koncentrácie na 0,03 M. Pri týchto podmienkach bola určená hodnota účinnosti LSK systému na 2,1 %.

Záver:

Cieľom tejto bakalárskej práce je poskytnúť hlbší pohľad na luminiscenčný solárny koncentrátor. V súčasnosti sa stal opäť predmetom záujmu, vďaka rastúcej snahe podporiť rozvoj FV systémov. Analýza LSK v tejto práci prebehla v teoretickej, experimentálnej aj ekonomickej rovine.

V teoretickej časti bol popísaný spôsob vytvárania nového druhu LSK. Od konvenčných LSK sa líši tým, že luminiscenčné farbivo je nanášané vo forme tenkej vrstvy na povrch sklenenej platne. Ďalej bol vysvetlený princíp funkcie LSK a došlo k analýze jeho optických vlastností. Boli vysvetlené mechanizmy, pri ktorých dochádza k optickým stratám. Dôraz bol kladený na reabsorpciu, pretože je hlavným faktorom strát. Následne bol na obr. 2.9 ilustrovaný systém, v ktorom kremíkový článok a LSK fungujú spolu. Z nameraných údajov určiť prvé odhady výkonovej účinnosti LSK systému. Dôležité je tiež uviesť, že pri popise LSK sme pracovali v zjednodušenej geometrii. Preto sa ponúka možné rozšírenie, pri ktorom by došlo k simulácii systému napríklad pomocou metódy "Monte Carlo" alebo metódy "ray tracing". To by malo viesť k spresneniu našej analýzy.

V experimentálnej časti bolo pripravených päť prototypov LSK s rôznou koncentráciou nanášaného farbiva. Z merania absorpčných spektier bolo zistené, že s rastúcou hodnotou koncentrácie nanášaného farbiva dochádza k nárastu maxima absorptancie (obr. 3.4). Následne došlo k meraniu fluorescenčných spektier a bol navrhnutý systém, pri ktorom je možné merať vplyv zmeny dĺžky hrany LSK na hodnoty reabsorpcie, bez nutnosti vytvárania veľkého počtu LSK. Z nameraných údajov vyplýva, že pravdepodobnosť reabsorpcie rastie s rastúcou koncentráciou farbiva v nanášanvej vrstve a so zvyšujúcou sa hodnotou rozmerov LSK. Po určení hodnôt reabsorpcie došlo k výpočtu účinnosti kolekcie (Q_c), pričom boli zanedbané optické straty spôsobené odrazom. Pri meraní reabsorpcie bol LSK excitovaný len bodovo, jednou vlnovou dĺžkou pomocou použitého lasera. Skvalitnenie merania by preto mohlo priniesť vystavenie celej plochy LSK solárnemu spektru, keďže k tomu dochádza pri bežnom používaní.

Po experimentálnych meraniach bola ďalším krokom optimalizácia parametrov LSK. K tomu je však potrebné určiť závislosť optimalizovanej veličiny na menených parametroch. Bolo teda nutné namerané a vypočítané hodnoty preložiť krivkami závislostí na menných parametroch a ich priebeh takýmto spôsobom aproximovať. V našom prípade boli menenými parametrami rozmer hrany LSK a koncentrácia nanášaného farbiva. Oba parametre vplývajú na optické vlastnosti LSK. Aproximované boli hodnoty absorptancie (A), absorpčného spektra a reabsorpcie (r). Prvou optimalizovanou veličinou bola výkonová účinnosť LSK (η). V časti 3.3.3 je uvedený príklad jej výpočtu. Pri tomto výpočte sme predpokladali, že koncentrátor je ožiarený referenčným spektrom AM1.5 Global. V časti 3.3.4 sme maximalizovali hodnoty výkonovej účinnosti v závislosti na rozmere hrany LSK a koncentrácii nanášaného farbiva. Jej hodnota bola stanovená na $\eta = 2,5\%$. Tomu odpovedá $L = 5$ mm a $c = 0,09$ M. Ide o teoreticky určenú hodnotu výkonovej účinnosti. Pri jej výpočte neboli uvažované straty vo vzduchovej medzere medzi LSK a kremíkovým solárnym článkom. Hodnota účinnosti LSK je v porovnaní s účinnosťou bežného kremíkoveho článku nízka. Z toho vyplýva, že ak budeme vytvárať systém s požadovanou hodnotou inštalovaného výkonu, riešenie využívajúce LSK bude pokrývať oveľa väčšiu plochu v porovnaní s kremíkovým systémom. Pri ďalšej analýze LSK systému by malo dôjsť k zhotoveniu kombinácie LSK a solárneho článku. Prepojenie by mohlo byť realizované pomocou lepkového materiálu s indexom lomu rovnajúcim sa indexu lomu skla. Tak by malo dôjsť k redukcii optických strát na rozhraní. Po zhotovení by bolo možné porovnať teoretickú hodnotu výkonovej účinnosti LSK systému s reálnymi výsledkami. Tak by tiež došlo k overeniu správnosti teoreticky vytvoreného modelu.

Dôležitá je tiež otázka degradácie LSK a teda aj zmeny hodnôt výkonovej účinnosti v čase. Pri jej predikcii sme uvažovali priemerný lineárny pokles účinnosti tohto systému 0,75 % za rok a lineárny pokles absorptancie zodpovedajúci hodnote 0,3 % za 6,5 roka. [25] Uvažovaná doba životnosti pri kremíkovom module, s ktorým modul LSK porovnáваме, je 30 rokov. Pre zredukovanie vplyvu degradácie je tiež možné uvažovať možnosť opätovného nanosenia vrstvy s farbivom na povrch LSK. Ako sa však ukázalo v kapitole 3.3.5, pokles hodnôt absorpčného spektra by mal byť minimálny, preto by opätovné nanášanie nemalo výrazný efekt.

Jedným z cieľov práce bolo z ekonomického pohľadu porovnať LSK a kremíkový článok. Náklady na laboratórny prototyp LSK v $\$/W_p$ niekoľko násobne prevyšujú náklady na kremíkový článok v $\$/W_p$. Dôvodom je nízka výkonová účinnosť prototypu LSK oproti účinnosti kremíkoveho článku. Výslednú obstarávaciu cenu systému netvorí len náklady na články. Preto bol vytvorený návrh modulu LSK (obr. 4.6) a boli odhadnuté jeho materiálové náklady. Ak by bol modul zložený z prototypov LSK porovnávaných v kapitole 4.2.1., boli by materiálne náklady na tento modul výrazne vyššie než náklady na kremíkový modul. Po určení materiálnych nákladov na modul boli odhadnuté hodnoty položiek tvoriacich obstarávaciu cenu systému zloženého z LSK, pričom bol zvolený systém o inštalovanom výkone 7 kW_p, rodinného typu, s modulmi umiestnenými na streche. Tento systém bol porovnaný s kremíkovým FV systémom rovnakého typu, s rovnakým inštalovaným výkonom. Údaje pre tento systém pochádzajú z rozsiahlej štúdie z USA [36], nakoľko sa nepodarilo nájsť podobne reprezentatívnu štúdiu pre Českú republiku. Prevádzkové náklady oboch systémom boli považované za rovnaké. Uvažovaná doba životnosti je 30 rokov. Pri porovnávaní systémov boli pre hodnotu diskontu 2 % a medziročný rast ceny elektrickej energie o 3,7% najskôr určené hodnoty NPV oboch systémom (obr. 4.9 a obr. 4.10). Kremíkový FV systém dosiahol kladnú hodnotu NPV už v 16. roku. Systém LSK sa ukázal byť nerentabilný. Po výpočte NPV boli systémy porovnané metódou rozdielovej investície (obr. 4.11), pri ktorej sa kremíkový systém ukázal byť z ekonomického pohľadu výhodnejší. Tiež je dobré si uvedomiť, že konkrétna voľba diskontu ani hodnota medziročného percentuálneho rastu ceny elektrickej energie v tomto prípade nehrajú výraznú rolu na výslednom hodnotení (obr. D.1). Zníženie investičných nákladov prinieslo hľadanie minima obstarávacej ceny pri meniacich sa rozmeroch LSK a koncentrácií nanášaného farbiva. Ukázalo sa však, že aj po optimalizácii je táto hodnota stále vysoká a tak sa výsledné hodnotenie nezmení. Overenie správnosti vytvorenej ekonomickej analýzy by priniesla až skutočná realizácia LSK systému. Predtým je však potrebné zvládnuť technické riešenie prepojenia LSK a kremíkoveho článku, ako aj vytvorenie LSK modulu.

Bolo by možné porovnávať aj FV systémy s akumuláciou. Pribudli by výdaje spojené s nákupom batérie a teda aj jednorazové prevádzkové výdaje na výmenu batérie. Keďže porovnáваме systémy o rovnakom inštalovanom výkone, tak by pri variante s akumuláciou došlo pri výpočte metódy rozdielovej investície k odčítaniu rovnakých položiek pre zhodné roky a výsledok by ostal rovnaký.

Naša analýza ukázala, že ak nedôjde k zvýšeniu účinnosti LSK systému, zníženiu ceny použitých materiálov, či k zvýšeniu životnosti, nedokáže systém LSK v aktuálnom prevedení konkurovať klasickému kremíkovému systému vo výrobe elektrickej energie zo slnečného žiarenia. Je namieste hľadať uplatnenie v oblastiach, kde klasické kremíkové moduly nie sú vhodné, napríklad preto, že nie sú transparentné.

Ponúka sa integrácia LSK do veľkých presklených budov, v ktorých by tvorili zložku tieniaceho systému. Ich výhoda by mala byť v tom, že dokážu zredukovať veľké množstvo priamo dopadajúceho žiarenia a premeniť ho na difúzne žiarenie. Požadované tienenie je možné docieľiť zemnou optických strát. Tie je možné regulovať vhodnou kombináciou koncentrácie nanášaného farbiva a rozmerov LSK. Tým by sme dokázali ušetriť náklady spojené s prevádzkou klimatizácie, keďže LSK produkujú elektrickú energiu a zároveň sú tieniacim prvkom. Odhadované náklady na takýto modul vo forme okna dostaneme z tabuľky 4.8. Ich hodnota je 69 $\$/m^2$. Avšak je treba počítať s nízkou hodnotou účinnosti (2,1 %).

Použitá literatúra:

- [1] Mohamed Ibrahim A. Arafa. A different visions for uninterruptible load using hybrid solar-grid energy , Figure 1 [online]. [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: doi:<http://doi.org/10.11591/ijpeds.v10.i1.pp381-387>
- [2] Michael G. DEBIJE and Paul P. C. VERBUNT. Thirty Years of Luminescent Solar Concentrator Research: Solar Energy for the Built Environment [online]. 2012, 12–35 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: doi:DOI: 10.1002/aenm.201100554
- [3] RONCALI, Jean. Luminescent Solar Collectors: Quo Vadis? [online]. 2012, 1–28 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/aenm.202001907>
- [4] Molární koncentrace [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Mol%C3%A1rn%C3%AD_koncentrace
- [5] Scriven, L. . Physics and Applications of DIP Coating and Spin Coating [online]. 1988 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1557/PROC-121-717>
- [6] RYER, Alex. Light Measurement Handbook. 1998. Technical Publications Dept. ISBN 0-9658356-9-3.
- [7] Ing. Pavel Májek, PhD., ed. E-Analytická chémia: Využitie elektromagnetického žiarenia v analytickej chémii [online]. 2006, s. 88-170 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <http://www.chtf.stuba.sk/kalch/AC/ii-3.pdf>
- [8] Fluorescence. Wikipedia [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescence>
- [9] Stokes shift. Wikipedia [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Stokes_shift
- [10] BATCHELDER, J., A. ZEWAIL a T. COLE. Luminescent solar concentrators. 1: Theory of operation and techniques for performance evaluation [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: doi:<http://dx.doi.org/10.1364/AO.18.003090>
- [11] Reflectance. Wikipedia [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Reflectance>
- [12] HINDLEY, Emily. Fabrication of Luminescent Solar Concentrators [online]. 2018 [cit. 2021-4-29]. Research Project. Lancaster University. Vedoucí práce Lefteris Danos.
- [13] Fotón: Energia, hmotnosť. Wikipedia [online]. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://sk.wikipedia.org/wiki/Fot%C3%B3n>
- [14] Quantum_efficiency. Wikipedia [online]. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_efficiency
- [15] Diode Equation. Pveducation [online]. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/diode-equation>
- [16] Standard Solar Spectra. Pveducation [online]. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra>
- [17] Reference Air Mass 1.5 Spectra. Nrel [online]. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>

- [18] MASTNÝ, Petr, Jiř DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. Obnovitelné zdroje elektrické energie [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011 [cit. 2021-4-29]. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-2-oze.pdf>
- [19] Fresnel equations: Normal incidence. Wikipedia [online]. [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_equations
- [20] TUMMELTSHAMMER, C., A. TAYLOR, A.J. KENYON a I. PAPAKONSTANTINO. Losses in luminescent solar concentrators unveiled [online]. 2016 [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.08.008](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.08.008)
- [21] Toluene. Wikipedia [online]. [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Toluene>
- [22] TIWARI, Atul, Rabah BOUKHERROU a Maheshwar SHARON, ed. [online]. 2013, , 280-283 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: [doi:10.1002/9781118845721](https://doi.org/10.1002/9781118845721)
- [23] MEYER, E. L. Extraction of Saturation Current and Ideality Factor from Measuring Voc and Isc of Photovoltaic Modules: 4. Application of the Voc-Isc Method [online]. 2017 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1155/2017/8479487](https://doi.org/10.1155/2017/8479487)
- [24] Fill Factor. Pveducation [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/fill-factor>
- [25] SLOOFF, Lenneke H., Nicolaas J. BAKKER, Paul M. SOMMELING, Andreas BÜCHTEMANN, Armin WEDEL a Wilfried VAN SARK. Long-term optical stability of fluorescent solar concentrator plates [online]. 2014 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1002/pssa.201330447](https://doi.org/10.1002/pssa.201330447)
- [26] JORDAN, Dirk, Sarah R. KURTZ, Kaitlyn VANSANT a Jeff NEWMILLE. Compendium of photovoltaic degradation rates [online]. 2016 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: [doi:DOI: 10.1002/pip.2744](https://doi.org/10.1002/pip.2744)
- [27] STARÝ, Oldřich. Kritéria efektivity. 2018 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=188678>
- [28] STARÝ, Oldřich. Online prednáška: Kritéria efektivity. 2020 [cit. 2021-5-12].
- [29] Basf Lumogen Red 300 [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.guidechem.com/trade/basf-lumogen-red-300-rot-300--id3062878.html>
- [30] Prieskum trhu: POLYMETHYL METHACRYLATE. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/POLY-METHYL-METHACRYLATE-cas-9011-14_62010273949.html?spm=a2700.details.deiletai6.1.69e95813sNxINr
- [31] Prieskum trhu: Toluene. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/Hot-sale-Toluene-Diisocyanate-TDI-80_62045289625.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.71f65b41QQGWv9
- [32] HOROWITZ, Kelsey A. W., Ran FU, Xingshu SUN, Tim SILVERMAN, Mike WOODHOUSE a Muhammad A. ALAM. An Analysis of the Cost and Performance of Photovoltaic Systems as a Function of Module Area: The Effect of Module Area on Module Manufacturing Cost per Watt [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67006.pdf>

- [33] LOUWEN, Atse, Wilfried van SARK, Ruud SCHROPP a André FAAIJ. A cost roadmap for silicon heterojunction solar cells [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.12.026>
- [34] WILTON, Samuel R. MONTE CARLO RAY-TRACING SIMULATION FOR OPTIMIZING LUMINESCENT SOLAR CONCENTRATORS Table 10: Thickness [online]. May 2012 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/7055
- [35] SVARC, Jason. Cleanenergyreviews [online]. 2020 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>
- [36] FELDMAN, David, Vignesh RAMASAMY, Ran FU, Ashwin RAMDAS, Jal DESAI a Robert MARGOLIS. U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmark: Q1 2020 [online]. 2021 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/77324.pdf>
- [37] BENDA, Vítězslav. Ekonomické aspekty fotovoltaiky [online]. 2021 [cit. 2021-7-20]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/298423/mod_resource/content/0/B1B%2014b.pdf
- [38] Czech Republic 20 Years Bond - Forecast [online]. [cit. 2021-8-3]. Dostupné z: <http://www.worldgovernmentbonds.com/bond-forecast/czech-republic/20-years/>
- [39] PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#PVP
- [40] PRE - Pražská energetika: Ceník elektřiny pro domácnosti: PRE PROUD STANDARD [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.pre.cz/Files/domacnosti/elektrina/archiv-produktu/2021/07/pre-proud-standard-predi/>
- [41] Eurostat: Electricity prices for household consumers [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>
- [42] ČNB: Kurzy devizového trhu [online]. 29.07.2021 [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/financni-trhy/devizovy-trh/kurzy-devizoveho-trhu/kurzy-devizoveho-trhu/>
- [43] LUQUE, Antonio a Steven HEGEDUS. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering: Operation and Maintenance/Monitoring [online]. 2. 2011 [cit. 2021-7-29]. ISBN 978-0-470-72169-8.

Zoznam použitých skratiek a symbolov:

ρ_T – hustota toluénu (g/l)

A – absorptancia (–)

a – aproximačný koeficient

a_1 – aproximačný koeficient

a_2 – aproximačný koeficient

A_A – priemerná hodnota absorptancie v absorpčnom intervale (–)

A_{in} – vstupná plocha koncentrátora (m^2)

AM – "Air Mass"

A_N – nameraná hodnota absorptancie (–)

A_{out} – výstupná plocha koncentrátora (m^2)

AR – antireflexná vrstva

A_R – výsledná absorptancia roztoku (–)

A_S – hodnota absorptancie skla (–)

a_λ – aproximačný koeficient pre danú vlnovú dĺžku

B – absorbancia (–)

BOS – "balance of system"

c – látková koncentrácia (M)

C_0 – koncová hodnota koncentrácie (M)

CF_t – hotovostný tok (cash flow) v období t (\$)

CF_{Yt} – hotovostný tok (cash flow) investície Y v období t (\$)

CF_{Zt} – hotovostný tok (cash flow) investície Z v období t (\$)

c_l – rýchlosť svetla ($m \cdot s^{-1}$)

$Cost_{LSK\ Cell}$ – náklady na jeden LSK článok (\$)

$Cost_{LSK\ Cell\ m^2}$ – náklady na LSK článok v $\$/m^2$ ($\$/m^2$)

$Cost_{LSK\ Cell\ W_p}$ – náklady na LSK článok v $\$/W_p$ ($\$/W_p$)

$Cost_{LSK\ module\ m^2}$ – náklady na LSK modul v $\$/m^2$ ($\$/m^2$)

$Cost_{LSK\ module\ W_p}$ – náklady na LSK modul v $\$/W_p$ ($\$/W_p$)

$Cost_{Si\ Cell\ m^2}$ – náklady na kremíkový článok v $\$/m^2$ ($\$/m^2$)

$Cost_{Si\ Cell\ W_p}$ – náklady na kremíkový článok v $\$/W_p$ ($\$/W_p$)

d – hrúbka vrstvy (cm)

DPH – daň z pridanej hodnoty (%)

E – energia fotónu (J)

e – Eulerovo číslo

EQE – externá kvantová účinnosť (–)

EQE_A – priemerná hodnota EQE v intervale, v ktorom dochádza k fluorescenciám (–)

EVA – "ethylene-vinyl acetate"

f – je frekvencia (Hz)

FF – "Fill Factor" (–)

FV – fotovoltický

h – predstavuje Planckovu konštantu (J·s)

I – elektrický prúd (A)

I_0 – saturačný prúd v záverom smere (A)

I_e – intenzita dopadajúceho žiarenia ($W \cdot m^{-2}$)

I_{in} – výkon vyžiarený z plochy koncentrátora ($W \cdot m^{-2}$)

I_L – elektrický prúd generovaný svetlom (A)

I_{LC} – maximálny prúd dodávaný jedným solárnym článkom (A)

I_{mp} – prúd v bode maximálneho výkonu (A)

$inštalácia_{LSK} \$/m^2$ – hodnota nákladov na inštaláciu LSK systému v $\$/m^2$ ($\$/m^2$)

$inštalácia_{LSK} \$/W_p$ – hodnota nákladov na inštaláciu LSK systému v $\$/W_p$ ($\$/W_p$)

I_{out} – výkon dopadajúci na plochu koncentrátora ($W \cdot m^{-2}$)

IQE – interná kvantová účinnosť (–)

IRR – vnútorné výnosové percento (internal rate of return) (%)

I_{SC} – prúd nakrátko (A)

k – diskont (%)

k_B – Boltzmannova konštantu ($J \cdot K^{-1}$)

L – rozmer hrany LSK (m)

L_0 – koncová hodnota rozmeru hrany (m)

LSK – luminiscenčný solárny koncentrátor

M_A – molárna hmotnosť zložky A (g/mol)

m_A – hmotnosť zložky A (g)

m_{PMMA} – hmotnosť polymetylmetakrylátu (mg)

m_T – hmotnosť toluénu (mg)

N – faktor ideality solárneho článku (–)
 n – index lomu prostredia, z ktorého lúč prichádza (–)
 n' – index lomu prostredia, do ktorého lúč dopadá (–)
 n_1 – index lomu prostredia, z ktorého lúč dopadá na LSK (–)
 n_2 – index lomu vrchnej vrstvy LSK (–)
 n_A – látkové množstvo zložky A (mol)
 N_{abs} – počet fotónov vstupujúcich do kolektoru (–)
 $Náklady_{m^2}$ – náklady v \$/ m² (\$/m²)
 $Náklady_{W_p}$ – náklady v \$/W_p (\$/W_p)
 N_D – súčet počtu dopadajúcich fotónov v danom intervale vlnových dĺžok (–)
 N_e – počet emitovaných fotónov z kolektoru (–)
 N_{in} – počet dopadnutých fotónov (–)
 N_{out} – počet zhromaždených fotónov (–)
 NPV – čistá súčasná hodnota (net present value) (\$)
 N_λ – počet dopadajúcich fotónov odpovedajúcich danej vlnovej dĺžke (–)
 obr. – obrázok
 P_E – straty únikovým kužeľom (–)
 P_{in} – výkonu dopadajúceho slnečného žiarenia (W)
 P_{inst} – hodnota inštalovaného výkonu (W_p)
 P_m – maximálny výkon FV článku (W)
 PMMA – polymetylmetakrylát
 $price_{LSK\ total\ W_p}$ – obstarávacia cena LSK systému v \$/W_p (\$/W_p)
 $profit_{LSK\ \$/m^2}$ – hodnota profitu z LSK systému v \$/m²
 $profit_{LSK\ \$/W_p}$ – hodnota profitu z LSK systému v \$/W_p
 $profit_{Si\ \$/m^2}$ – hodnota profitu z kremikového systému v \$/m² (\$/m²)
 $profit_{Si\ \$/W_p}$ – hodnota profitu z kremikového systému v \$/W_p (\$/W_p)
 PVGIS – "photovoltaic Geographical Information System"
 q – elementárny elektrický náboj (C)
 Q_c – účinnosť kolekcie (collection efficiency) (–)
 Q_{C_i} – i-tá hodnota účinnosti kolekcie (–)
 $Q_{CA\ C_0\ L_0}$ – priemernú hodnotu účinnosti kolekcie od nuly po hodnotu C₀ a L₀ (–)
 Q_{CA} – priemernú hodnotu účinnosti kolekcie (–)

Q_y – kvantový výťažok (quantum yield) (–)
 R – odrazivosť (reflektancia) (–)
 r – reabsorpcia (samoabsorpcia) (–)
rpm – otáčok za minútu (revolutions per minute)
Si – kremík
 $S_{LSK\ modules}$ – plocha LSK modulov (m^2)
 $S_{Si\ modules}$ – plocha kremíkových FV modulov (m^2)
 t – čas (rok)
 T – termodynamická teplota (K)
 T_ζ – transmitancia (priepustnosť) (–)
 T_γ – predpokladaná životnosť investície (rok)
 U – napätie medzi svorkami solárneho článku (V)
 U_{OC} – napätia naprázdno (V)
 U_{mp} – napätie v bode maximálneho výkonu (V)
 u_{oc} – normované napätia naprázdno (–)
 V – objem (l)
 x – pomocná premenná (%)
 ε – je molový absorpčný koeficient ($dm^3 \cdot cm^{-1} \cdot mol^{-1}$)
 η – výkonová účinnosť LSK (%)
 η_0 – počiatočná hodnota účinnosti (%)
 $\eta_{LSK\ modul}$ – účinnosť LSK modulu (%)
 η_{opt} – optická účinnosť (%)
 η_P – výkonová účinnosť (%)
 η_r – relatívna účinnosť (%)
 $\eta_{Si\ cell}$ – výkonová účinnosť kremíkového FV článku (%)
 $\eta_{Si\ modules}$ – účinnosť kremíkového modulu (%)
 η_t – hodnota účinnosti v čase t (%)
 θ – uhol dopadu na rozhranie ($^\circ$)
 θ' – uhol pod ktorým sa lúč zlomí ($^\circ$)
 θ_c – kritický uhol ($^\circ$)
 λ – je vlnová dĺžka (m)
 Φ – výstupný žiarivý tok (W)

Φ_0 – vstupujúci žiarivý tok (W)

Φ_{0N} – absorbovaný žiarivý tok pre povrch LSK (W)

Φ_{0S} – absorbovaný žiarivý tok pre povrch skla (W)

$\Phi_{0\lambda}$ – spektrálna intenzita žiarenia pre konkrétnu vlnovú dĺžku ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$)

Φ_a – absorbovaný žiarivý tok (W)

Φ_F – fluorescenčný žiarivý tok (W)

Φ_N – výstupný žiarivý tok z povrchu LSK (W)

Φ_R – odrazený žiarivý tok (W)

Φ_S – výstupný žiarivý tok z povrchu skla (W)

Zoznam príloh:

Príloha A: Výpočet NPV pre kremíkový FV systém

Príloha B: Výpočet NPV pre FV systém zložený z LSK

Príloha C: Výpočet NPV rozdielovej investície

Príloha D: Citlivostná analýza závislosti NPV rozdielovej investície od výšky zvoleného diskontu.

Príloha A: Výpočet NPV pre kremíkový FV systém.						
Rok	Výroba FVE [kWh]	Cena elektriny [\$]	Hotovostné výdaje [\$]	Hotovostné príjmy [\$]	Diskontovaný CF [\$]	Kumulatívny CF [\$]
0	0		18970	0	-18970	-18970
1	7034	0,18	140	1252	1090	-17880
2	7034	0,18	140	1298	1113	-16766
3	6963	0,19	140	1333	1124	-15642
4	6893	0,20	140	1368	1135	-14507
5	6823	0,21	140	1404	1145	-13362
6	6752	0,21	140	1441	1155	-12207
7	6682	0,22	140	1479	1166	-11041
8	6612	0,23	140	1517	1176	-9866
9	6541	0,24	140	1557	1185	-8680
10	6471	0,25	140	1597	1195	-7485
11	6401	0,26	140	1638	1205	-6281
12	6330	0,27	140	1680	1214	-5066
13	6330	0,28	140	1742	1238	-3828
14	6330	0,29	140	1806	1263	-2565
15	6260	0,30	140	1852	1272	-1293
16	6260	0,31	140	1921	1297	4
17	6190	0,32	140	1969	1306	1310
18	6190	0,33	140	2042	1332	2641
19	6119	0,34	140	2093	1341	3982
20	6119	0,35	140	2171	1367	5349
21	6119	0,37	140	2251	1393	6741
22	6049	0,38	140	2307	1402	8143
23	6049	0,40	140	2392	1428	9572
24	5979	0,41	140	2452	1437	11009
25	5979	0,43	140	2543	1464	12473
26	5932	0,44	140	2616	1479	13953
27	5897	0,46	140	2696	1498	15450
28	5861	0,47	140	2779	1516	16966
29	5826	0,49	140	2865	1534	18501
30	5791	0,51	140	2953	1553	20054

Tabuľka A.1: Ukážka výpočtu NPV pre kremíkový FV systém.

Diskont	2%
Rast ceny elektriny	3,7%

Tabuľka A.2: Zvolené parametre výpočtu NPV pre kremíkový FV systém.

Príloha B: Výpočet NPV FV systém zložený z LSK.						
Rok	Výroba FVE [kWh]	Cena elektriny [€]	Hotovostné výdaje [€]	Hotovostné príjmy [€]	Diskontovaný CF [€]	Kumulatívny CF [€]
0	0	0,18	89329	0	-89329	-89329
1	7034	0,18	140	1252	1090	-88238
2	6999	0,18	140	1292	1107	-87131
3	6925	0,19	140	1326	1117	-86014
4	6852	0,20	140	1360	1127	-84887
5	6778	0,21	140	1395	1137	-83750
6	6705	0,21	140	1431	1146	-82603
7	6632	0,22	140	1468	1156	-81447
8	6559	0,23	140	1505	1165	-80282
9	6486	0,24	140	1543	1174	-79108
10	6413	0,25	140	1583	1183	-77924
11	6340	0,26	140	1622	1192	-76732
12	6267	0,27	140	1663	1201	-75531
13	6264	0,28	140	1724	1224	-74307
14	6261	0,29	140	1786	1248	-73059
15	6188	0,30	140	1831	1256	-71803
16	6185	0,31	140	1898	1280	-70523
17	6113	0,32	140	1945	1289	-69234
18	6110	0,33	140	2015	1313	-67921
19	6037	0,34	140	2065	1321	-66599
20	6034	0,35	140	2140	1346	-65253
21	6031	0,37	140	2218	1371	-63882
22	5959	0,38	140	2273	1380	-62502
23	5956	0,40	140	2356	1405	-61097
24	5884	0,41	140	2413	1413	-59684
25	5881	0,43	140	2501	1439	-58245
26	5832	0,44	140	2572	1453	-56792
27	5794	0,46	140	2650	1470	-55322
28	5757	0,47	140	2730	1487	-53834
29	5719	0,49	140	2812	1505	-52330
30	5682	0,51	140	2897	1522	-50808

Tabuľka B.1: Ukážka výpočtu NPV pre FV systém zložený z LSK.

Diskont	2%
Rast ceny elektriny	3,7%

Tabuľka B.2: Zvolené parametre výpočtu NPV pre FV systém zložený z LSK.

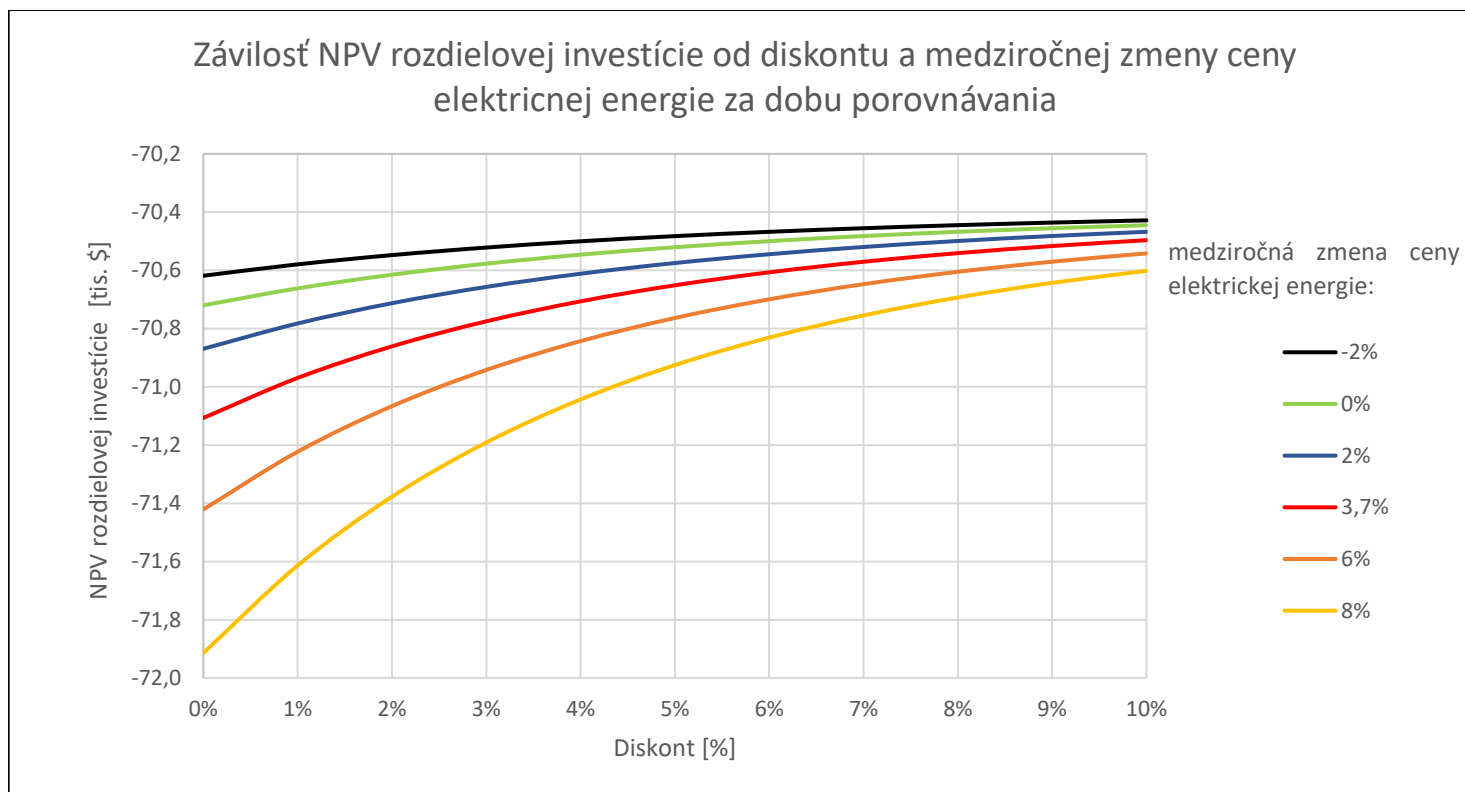
Príloha C: Výpočet NPV rozdielovej investície.						
Rok	Rozdielová výroba [kWh]	Cena elektriny [\$]	Diskontovaný CF Z [\$]	Diskontovaný CF Y [\$]	Rozdielový CF [\$]	Kumulatívny CF [\$]
0	0		-18970	-89329	-70359	-70359
1	0	0,18	1090	1090	0	-70359
2	-35	0,18	1113	1107	-6	-70365
3	-38	0,19	1124	1117	-7	-70372
4	-41	0,20	1135	1127	-8	-70379
5	-44	0,21	1145	1137	-8	-70388
6	-47	0,21	1155	1146	-9	-70396
7	-50	0,22	1166	1156	-10	-70406
8	-53	0,23	1176	1165	-10	-70416
9	-55	0,24	1185	1174	-11	-70427
10	-58	0,25	1195	1183	-12	-70439
11	-61	0,26	1205	1192	-12	-70452
12	-63	0,27	1214	1201	-13	-70465
13	-66	0,28	1238	1224	-14	-70479
14	-69	0,29	1263	1248	-15	-70494
15	-72	0,30	1272	1256	-16	-70510
16	-75	0,31	1297	1280	-17	-70526
17	-77	0,32	1306	1289	-17	-70544
18	-80	0,33	1332	1313	-18	-70562
19	-82	0,34	1341	1321	-19	-70582
20	-85	0,35	1367	1346	-20	-70602
21	-88	0,37	1393	1371	-21	-70623
22	-90	0,38	1402	1380	-22	-70646
23	-93	0,40	1428	1405	-23	-70669
24	-95	0,41	1437	1413	-24	-70693
25	-98	0,43	1464	1439	-25	-70719
26	-100	0,44	1479	1453	-26	-70745
27	-102	0,46	1498	1470	-27	-70772
28	-105	0,47	1516	1487	-29	-70801
29	-107	0,49	1534	1505	-30	-70831
30	-109	0,51	1553	1522	-31	-70861

Tabuľka C.1: Ukážka výpočtu NPV rozdielovej investície.

Diskont	2%
Rast ceny elektriny	3,7%

Tabuľka C.2: Zvolené parametre výpočtu NPV rozdielovej investície.

Príloha D: Citlivostná analýza závislosti NPV rozdielovej investície od medzoročnej zmeny ceny elektrickej energie a od výšky zvolenej diskontnej miery.



Obr. D.1: Znáznornenie závislosti NPV rozdielovej investície od výšky stanoveného diskontu a od medzoročnej zmeny ceny elektrickej energie v časovom horizonte 30 rokov.

Z obr. D.1 vyplýva, že so zvyšujúcou sa hodnotou diskontnej miery narastá hodnota NPV rozdielovej investície, avšak tempo rastu je veľmi pomalé. Hodnota NPV rozdielovej investície naopak s rastúcou hodnotou medzoročnej zmeny ceny elektrickej energie klesá. Vo výsledku vidíme, že zmena hodnoty diskontu a medzoročná zmena ceny elektrickej energie nemá vplyv na celkové hodnotenie, pretože hodnota NPV rozdielovej investície zostáva stále záporná.