

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie

Obor: Elektrotechnika, energetika a management

Zaměření: Aplikovaná elektrotechnika



Model chování jednoduché stavby  
Behavioral model of a simple building structure

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: **Michal Jacko**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.**

Rok: 2015

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Michal Jacko**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Model chování jednoduché stavby**

### Pokyny pro vypracování:

- 1) Vytvořte energetický model jednoduché stavby (stavební buňky).
- 2) V modelu zohledněte následující zdroje energie: prostup tepla stěnou a okny a energii získanou z FV systému na střeše stavby.
- 3) Vytvořte tepelný model systému a vyhodnoťte vliv parametrů materiálů použitých při stavbě a okolního prostředí.

### Seznam odborné literatury:

- [1] Odborné články z webových stránek <http://www.tzb-info.cz/>
- [2] STANĚK, Kamil. Fotovoltaika pro budovy. 1. vyd. Praha: Grada pro Katedru konstrukci pozemních staveb Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze, 2012. ISBN 978-802-4742-786.
- [3] Katalogové listy stavebních materiálů.

Vedoucí: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

  
Ing. Karel Dušek, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 25. 3. 2015

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma „Model chování jednoduché stavby“ vypracoval samostatně a použil jsem podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne.....

.....

Michal Jacko

**Poděkování:**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D. za jeho ochotu a odborné vedení mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval panu Doc. Dr. Ing. Janu Kynclovi za odbornou pomoc při sestavování tepelného modelu.

Michal Jacko

**Anotace:**

Cílem této závěrečné bakalářské práce na téma „Model chování jednoduché stavby“ bylo prozkoumat okolnosti ovlivňující teplotní podmínky a tedy i obyvatelnost jednoduché stavební buňky. Teoretická část se zaměřuje na veškeré faktory ovlivňující podmínky uvnitř stavby a možnosti upravení těchto podmínek pro naše potřeby spolu s faktory ovlivňující výrobu energie fotovoltaickými panely. Praktická část této práce se zabývá sestavováním algoritmu, díky kterému bude možno provést simulační model dané budovy s některými variabilními parametry. Závěrečná část shrnuje poznatky z tohoto modelu a určuje, zda bude tato budova soběstačná a obyvatelná.

**Klíčová slova**

Fotovoltaický panel, fotovoltaický systém, model chování, jednoduchá stavba, simulace podmínek, tepelný model

**Annotation:**

The aim of this bachelor thesis on „Behavioral model of a simple building structure“ was to examine factors which influence temperature conditions and habitability of a simple building structure. The theoretical part focuses on all factors that can influence conditions inside the structure and possibilities to alter these conditions for our needs alongside with factors that influence energy production of the photovoltaic panels. The practical part of this thesis deals with the compilation of the algorithm which will make possible to simulate model of this structure with a few variable parameters. The final part summarizes findings of this model and determines whether or not will be this building structure self-sufficient and habitable.

**Key terms**

Photovoltaic panel, photovoltaic system, behavioral model, simple building, condition simulation, thermal model

Seznam symbolů .....	9
Úvod .....	10
1. Stavební buňka .....	12
2. Fotovoltaické panely .....	14
2.1 Princip fotovoltaického článku .....	14
2.2 Fotovoltaický modul .....	14
2.3 Konstrukce panelu .....	15
2.4 Typy panelů .....	16
2.4.1 Křemíkový fotovoltaický panel .....	16
2.4.2 Fotovoltaické fólie – Tenkovrstvé FVP .....	16
2.4.3 Organický solární panel .....	18
2.4.4 Možná budoucnost .....	18
2.5 Úhel, Azimut .....	18
2.6 Umístění .....	19
3. Faktory ovlivňující podmínky uvnitř objektu .....	20
3.1 Vnější faktory .....	20
3.1.1 Intenzita záření .....	20
3.1.2 Denní a roční doba .....	21
3.1.3 Počasí .....	21
3.1.4 Teplota .....	22
3.1.5 Překážky .....	23
3.1.6 Lokalizace .....	23
3.2 Vnitřní faktory .....	25
3.2.1 Absorptance .....	25
3.2.2 Měření absorptance .....	26
3.2.3 Typy absorptancí .....	26
3.2.4 Lambertův zákon .....	27
3.2.5 Emisivita .....	27
3.2.6 Měření emisivity .....	28
3.2.7 Materiál a barva .....	28
3.2.8 Tepelná kapacita .....	29
3.2.9 Akumulace tepla .....	29
3.2.10 Různost konstrukce .....	30
3.2.11 Přenos Tepla .....	30
4. Praxe .....	31
4.1 Přímé záření - $G_B$ .....	31

4.2	Difuzní - $G_D$ .....	31
4.3	Albedo – $G_p$ .....	32
4.4	Globální záření - $G_{SUN}$ .....	33
4.5	Algoritmus simulačního programu.....	34
4.5.1	Rovnice pro výpočet energetické výtěžnosti fotovoltaických panelů:.....	34
4.5.2	Rovnice pro výpočet energie dopadající na konstrukci budovy: .....	38
4.5.3	Vzorce pro přenos tepla:.....	39
4.5.4	Tepelné ztráty stěnou: .....	40
4.6	Variabilita simulačního programu - Vstupy.....	41
4.7	Výstup simulace .....	43
4.7.1	Grafy toků dopadající na jednotlivé stěny - 1. – 6. července .....	43
4.7.2	Graf potřebné energie a energie z panelů - 1. – 6. července .....	45
4.7.3	Graf potřebné energie a energie z panelů - 1. – 6. ledna .....	45
5.	Závěr.....	46
	Použité zdroje.....	48



## Seznam symbolů

A	Absorptance [-]
R	Odrazivost [-]
T	Propustnost [-]
$\Phi$	Intenzita [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
P	Výkon [W]
$\alpha_s$	Absorpční koeficient [-]
$\varepsilon$	Emisivita materiálu [-], Součinitel závislý na nadmořské výšce [-]
$\delta$	Sluneční deklinace [°]
h	Výška Slunce nad obzorem [°]
$\theta$	Zeměpisná šířka [°]
$\omega$	Hodinový úhel [°]
A	Nadmořská výška [m]
Z	Součinitel znečištění atmosféry [-]
$\gamma_s$	Azimut Slunce [°]
$\beta$	Odklon panelu od vodorovné osy [°]
$\gamma$	Azimut panelu [°]
$\Psi$	Úhel dopadajících slunečních paprsků [°]
E	Energie [ $\text{kWh}/\text{m}^2$ ]
G	Intenzita záření [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$G_0$	Solární konstanta – $1367 \text{ W}/\text{m}^2$
T	Teplota [°C, K]
$\eta$	Účinnost [-]
S	Plocha [ $\text{m}^2$ ]
K	Konstanta oblačnosti [-]
q	Měrný tepelný tok [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$\alpha$	Součinitel přestupu tepla [ $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ]
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ]
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta – $5,670373\cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}^4$
Q	Výkon [W] – myšleno jako tepelné ztráty

## Úvod

Téma mé závěrečné bakalářské práce „Model chování jednoduché stavby“ nebyl vybrán náhodou, ale hned z několika důvodů. Prvním podnětem byl můj individuální projekt, který se zabýval výtěžností fotovoltaických panelů za různých vnějších podmínek. Tento projekt byl zpracováván také jako simulační program a byl výchozím bodem pro začátek této práce, neboť jeho součásti zde byly použity.

Dalším důvodem pro výběr tématu byla samozřejmě, čím dál tím více rozšířená, touha po zdrojích „zelené“ energie. Tím hlavním zdrojem takové energie je samozřejmě Slunce, proto jsem do své práce zakomponoval prvky, které umožňují využití solární energie – fotovoltaické panely.

Třetím a posledním důvodem byla má touha studovat v navazujícím studiu obor Inteligentní budovy, znalosti získané při tvorbě této práce pro mne jistě budou přínosem právě v tomto náročném interdisciplinárním oboru.

V první kapitole práce nejdříve představím vybranou stavební buňku, která je běžně dostupná na trhu a na kterou budu aplikovat svůj model. Dále se v této kapitole budu věnovat teorii fotovoltaického článku, typům solárních panelů a také jejich natočením, umístěním a dalším bodům ovlivňujícím funkci panelů.

V druhé kapitole nastíním několik základních faktorů, které ovlivňují nejen teplotu v budově z hlediska konstrukce a zateplení budovy ale i faktory, které ovlivňují výtěžnost solárních panelů a potažmo i dodávku energie do objektu.

Třetí kapitola bude věnována algoritmu programu použitého pro výpočty. Budou zde probrány rovnice a vztahy pro energetickou výtěžnost panelů, energii absorbovanou a odraženou konstrukcí buňky a také přenosů tepla do vnitřní části stavební buňky.

Ve čtvrté kapitole představím softwarové řešení, včetně možností nastavení vstupních parametrů, podobě výstupních parametrů a vizualizace dat. Pro vizualizaci dat bylo použito softwarové řešení vytvořené na katedře elektroenergetiky a bylo mi poskytnuto doc. Dr. Ing. Janem Kynclem spolu s disertační prací Ing. Richarda Najmana [31]. Tento program pro systém Wolfram Mathematica 9.0 jsem upravil v souladu s požadavky na výstupy potřebné pro řešení této bakalářské práce.

Závěr práce je věnován shrnutí a vyhodnocení poznatků, které vplynuly z matematického modelu a zhodnocením přesnosti modelu. Výstupem práce bude grafické zobrazení potřebné energie pro vytopení stavební buňky na teplotu vhodnou pro obyvatelnost, spolu s porovnáním energetické výtěžnosti fotovoltaických panelů a jejich schopnost pokrýt tuto spotřebu.

## 1. Stavební buňka

Abych byl schopen vytvořit simulační program podmínek uvnitř stavby, bylo třeba nejdříve vybrat budovu, která bude odpovídat našim požadavkům. Mezi tyto požadavky patří přiměřená jednoduchost stavby, dostupnost stavby na trhu a možnost připevnění fotovoltaických panelů na střechu. Jako tuto jednoduchou stavbu, která bude základem mého simulačního programu a na kterou budu aplikovat své výpočty, jsem vybral stavební buňku od firmy KOMA. Jedním z hlavních důvodů výběru firmy KOMA byla nejlépe zpracovaná technická dokumentace o použitých materiálech a jejich vlastnostech, což byla klíčová vlastnost, díky které budou výpočty co nejrealnější.

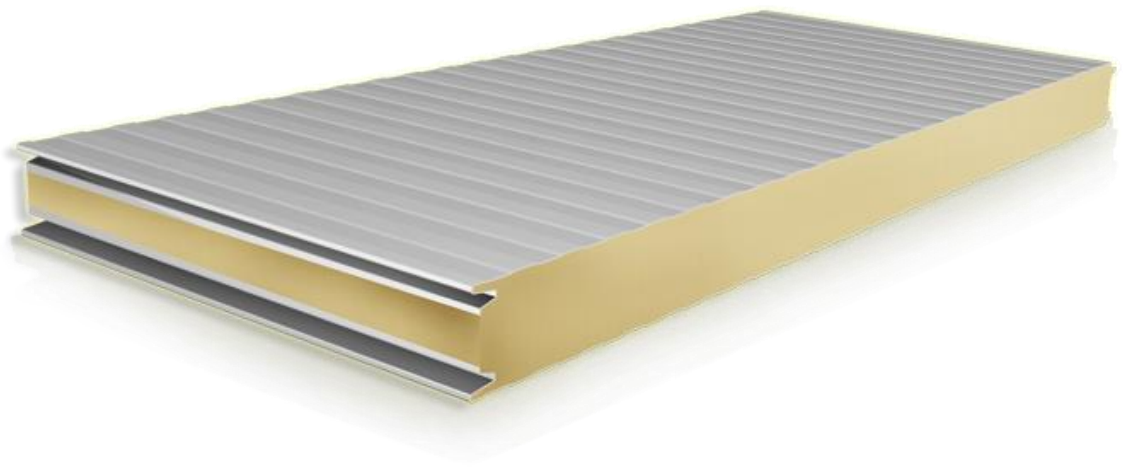


Obr. 1.1 – Stavební buňka KOMA [1]

Tato stavební buňka má rozměry 220 cm x 510 cm x 240 cm. Stěny se skládají z lakovaného profilového plechu RAL 9002, izolace je z PUR panelu o tloušťce 40 mm ( $K=0,5 \text{ W/m}^2$ ) a vnitřní obložení je z laminované dřevotřísky. Střešní krytina je také z PUR panelu o tloušťce 40 mm ( $K=0,5 \text{ W/m}^2$ ) a vydrží zatížení  $150 \text{ kg/m}^2$ , což by mělo být pro instalaci solárních panelů dostačující. Buňka je opatřena plastovými okny

o rozměrech 80 cm x 120 cm, které budou mít také vliv na podmínky uvnitř a budou do výpočtů zahrnuty. Všechny další technické specifikace se nacházejí v technické dokumentaci v příloze.

PUR panel je složen ze dvou ocelových pásů, které tvoří vnitřní a vnější část panelu, mezera mezi ocelovými pásy je vyplněna polyuretanovou pěnou.



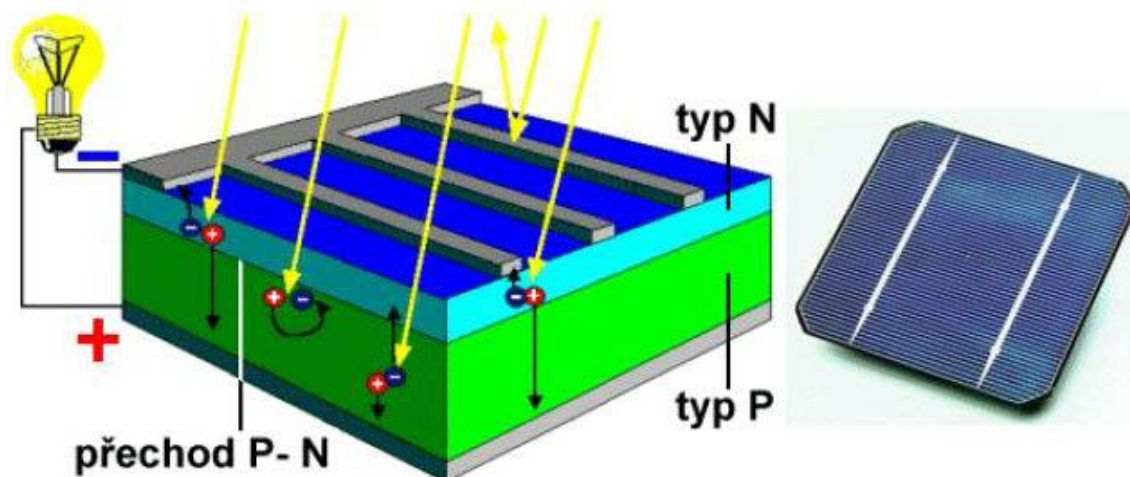
Obr. 1.2 – PUR panel [2]

Stavební buňka bude použita tak, jak ji dodává výrobce a vylepšena bude pouze instalací fotovoltaických panelů pro částečné, případně kompletní napájení. V simulaci bude možno změnit parametry materiálů kvůli zjištění, zda jsou použité materiály buňky optimální a nedaly by se vylepšit.

## 2. Fotovoltaické panely

### 2.1 Princip fotovoltaického článku

Základním prvkem fotovoltaiky, oboru který se zabývá přeměnou světelné energie ze Slunce, je fotovoltaický článek. Tento článek je tvořen dvěma destičkami, které jsou oddělené tzv. P-N přechodem. Jedna destička je křemíková s vodivostí typu P, kde jsou nosičem kladného náboje díry a na této destičce je tenká vrstva polovodiče typu N, kde náboj nesou elektrony. V ozářeném článku se generují elektricky nabitě částice – páry elektron-díra. Elektrony a díry jsou separovány vnitřním elektrickým polem a tím se vytváří rozdíl potenciálů mezi kladným a záporným kontaktem, obvodem prochází stejnosměrný proud. Energie dopadajících fotonů se tedy mění na energii elektrickou.

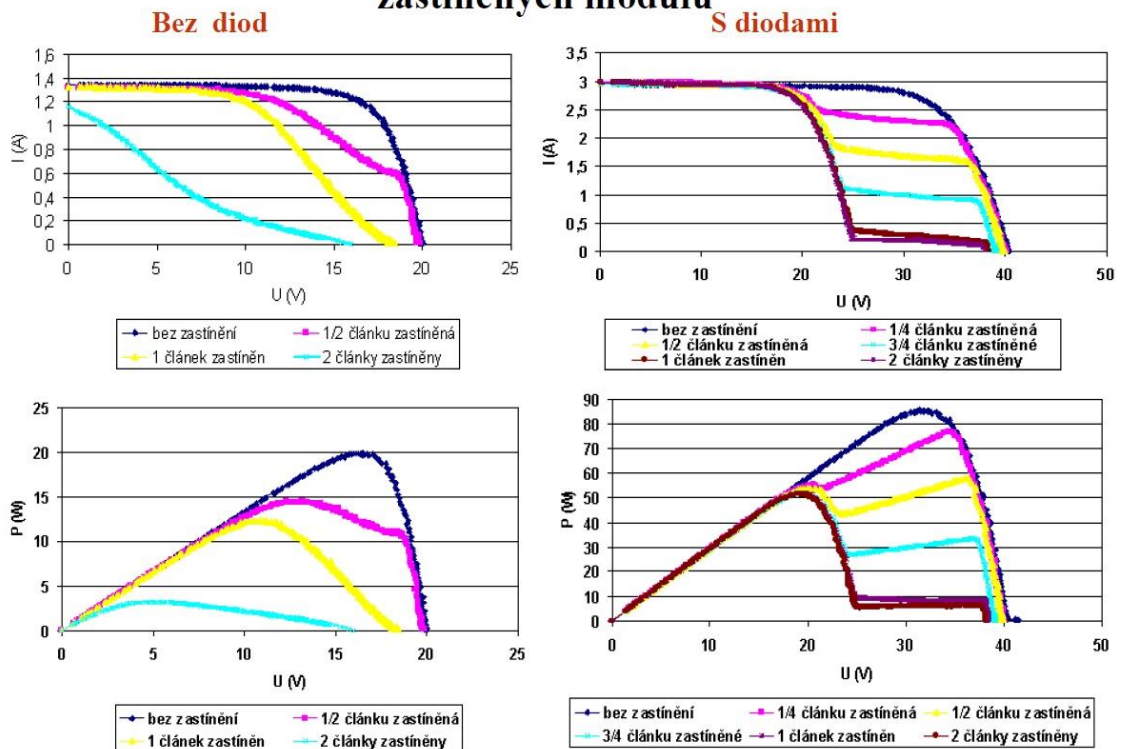


Obr. 1.3 – Struktura křemíkového panelu [3]

### 2.2 Fotovoltaický modul

Fotovoltaický modul je sérioparalelní zapojení jednotlivých solárních článků. Obvykle se ještě používají tzv. bypass diody (překlenovací diody) pro jednotlivé větve modulů pro případ, že by byla část panelu zastíněna. Pokud by totiž byl modul sestaven pouze ze sériově zapojených článků a alespoň jeden z nich by byl kompletně zastíněn, teorie říká, že výroba energie tohoto modulu by klesla na nulu. V případě, že bude modul sestaven například ze čtyř sériově spojených článků, přičemž každý bude vybaven bypass diodou a jeden z článků bude zastíněn, přestane vyrábět energii pouze jeden článek a ostatní tři články nebudou ovlivněny.

## Vliv překlenovacích diod na V-A charakteristiku částečně zastíněných modulů



Obr. 1.4 – Vliv překlenovacích diod [4]

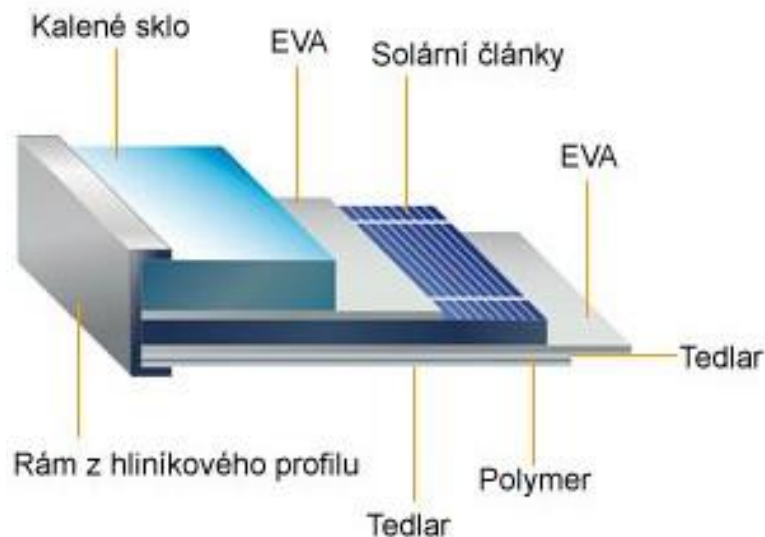
### 2.3 Konstrukce panelu

Sérioparalelně zapojené solární články (obvykle s bypass diodami) jsou zapouzdřeny a tím hermeticky uzavřeny do ochranných materiálů, díky kterým jsou schopny odolávat nepříznivým vnějším vlivům. Fotovoltaický panel se skládá tzv. vrstvením (laminací) jednotlivých vrstev jako jsou EVA fólie, polymer, tedlar a kalené sklo na povrchu panelu. Vše je zasazeno do hliníkového rámu.

## 2.4 Typy panelů

### 2.4.1 Křemíkový fotovoltaický panel

Jako polovodičový materiál, jak již název napovídá, se zde používá krystalický křemík, což je nejběžněji používaný polovodičový materiál pro výrobu fotovoltaických článků. Tyto fotovoltaické články jsou tvořeny polovodičovými vrstvami tenčími než 1 mm. Povrch panelu je chráněn tvrzeným sklem, které chrání křemíkové články před nepříznivými vnějšími vlivy. Toto sklo má vysokou propustnost a nízkou odrazivost. Křehké články a tvrzené sklo odděluje speciální materiál EVA, který má vysokou světelnou propustnost. Teoretická účinnost křemíkových panelů se pohybuje okolo 15 % - 18 %.

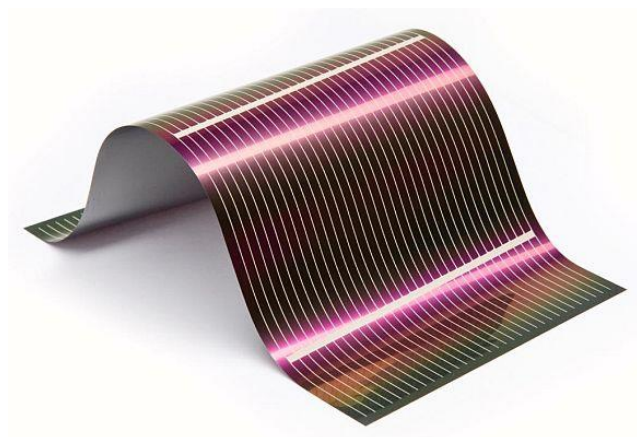


Obr. 1.5 – Struktura panelu [5]

### 2.4.2 Fotovoltaické fólie – Tenkovrstvé FVP

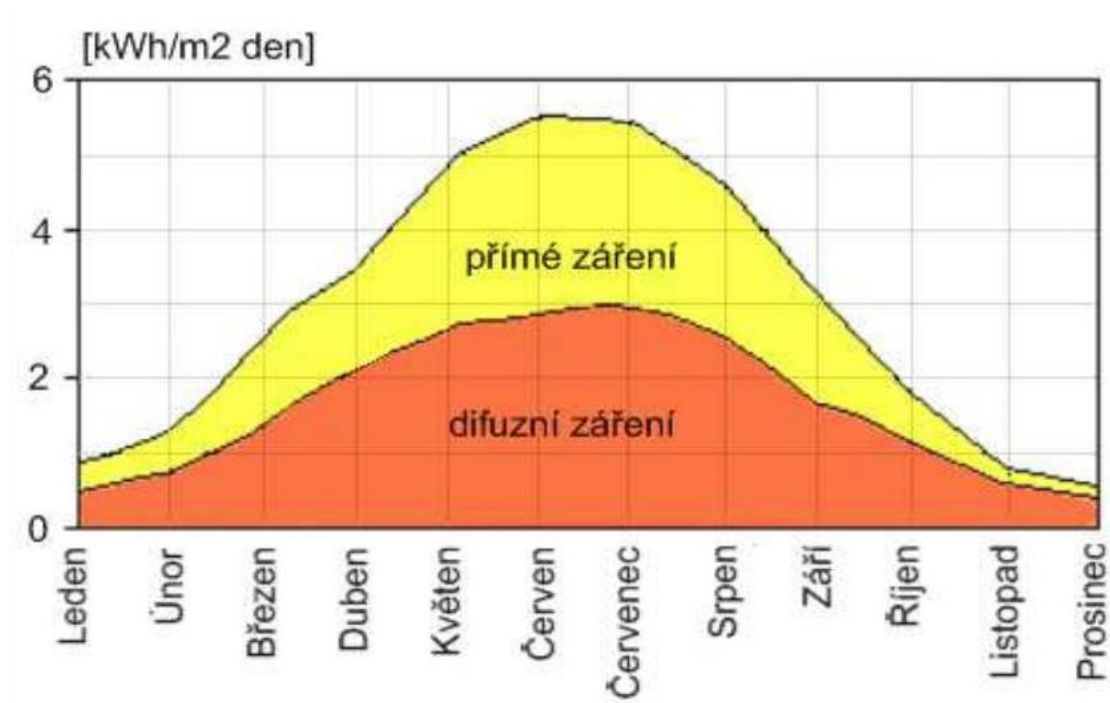
Dalším typem fotovoltaických článků jsou tenkovrstvé neboli „thin film solar cells“. Výhodou tenkovrstvých článků je to, že polovodičová vrstva je široká pouhý jeden mikrometr. Zajímavé jsou například nové tenkovrstvé panely druhé generace používající technologii Thin-film CIGS. Za touto zkratkou se skrývají anglické názvy čtyř prvků tvořící P-N přechod a to – měď, indium, galium a selen. Tyto prvky jsou nanášeny ve vrstvách pomocí napařovací technologie. Tenkovrstvé FVP jsou také výhodné z hlediska citlivosti na difuzní záření a tedy i poměru výnosů v případě například fasádní montáže.





Obr. 1.6 – Fotovoltaická fólie [6]

Z hlediska fotovoltaiky platí, že fotovoltaické panely složené z monokrystalických nebo polykrystalických fotovoltaických článků potřebují k dosažení maximální výtěžnosti zejména přímé záření, tedy přímé sluneční světlo. Tenkovrstvé fotovoltaické panely vyrobené na bázi amorfního křemíku, umějí dobře zužitkovat i záření difuzní a proto v celoročním úhrnu vyrobí tenkovrstvý panel více energie z jednotky instalovaného výkonu (maximálně však asi o 10 %) než panel z mono či polykrystalických křemíkových článků.



Obr. 1.7 – Poměr přímého k difuznímu záření [7]

### 2.4.3 Organický solární panel

Organické články, jak už název napovídá, využívají organické, polymerní nebo uměle vytvořené nanomateriály. Tyto materiály mají schopnost absorbovat světlo a přeměnit energii světla na energii elektrickou. Příkladem takového materiálu je perovskit ( $\text{CaTiO}_3$ ), což je vzácný minerál pro výrobu nového typu polovodiče. Články vyrobeny z tohoto polovodiče dosahují účinnosti kolem 15 % s možným zvýšením až na 25 % a jsou levnější než články křemíkové.

### 2.4.4 Možná budoucnost

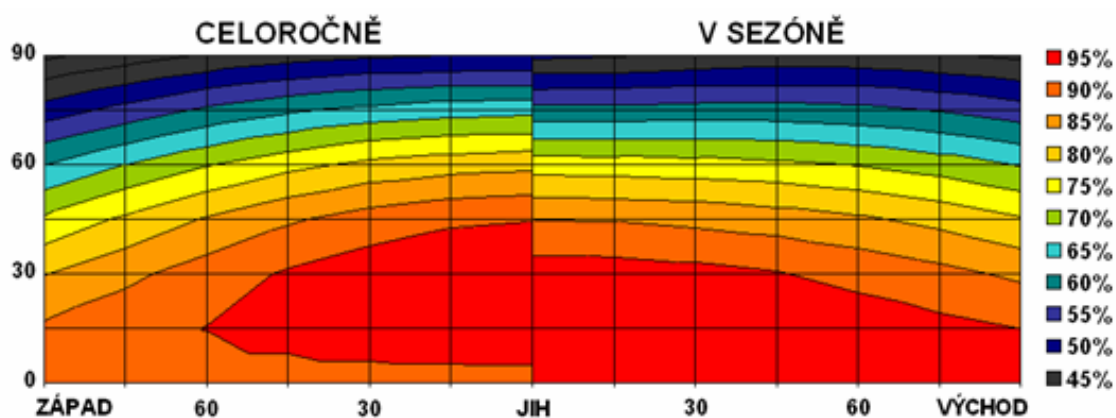
S další novou technologií přišli vědci z Univerzity Nového Jižního Walesu [9] a ta slibuje účinnost až 46 %. Těchto hodnot by měli dosahovat díky použití čtyř solárních článků. Světlo, které dopadá na povrch panelu, se díky speciálnímu filtru v podobě fólie štěpí na různé vlnové délky a každý ze čtyř článků se bude „specializovat“ na jiný rozsah vlnových délek.

## 2.5 Úhel, Azimut

Pro podmínky střední Evropy platí následující. Optimální sklon panelů se pohybuje mezi  $35^\circ$  až  $49^\circ$ . V letním období je slunce výše nad úrovní horizontu, než v zimě. V období cca od března do října bude vhodné zvolit sklon od vodorovné osy kolem  $35^\circ$  (panely budou více „naplocho“) a pokud budou panely používány celoročně, nebo pouze v zimě, pak je vhodné panely „zvednout“ na vyšší úhel, tedy až  $49^\circ$  aby bylo možné ve špatných zimních podmínkách získat ze systému o trochu více elektrické energie.

Největší množství slunečního záření, co se ročního průměru týče, je na plochu se sklonem přibližně  $30^\circ$  orientovanou k jihu. Při jiné orientaci je energetický zisk nižší. Pro provoz v sezóně může být sklon nižší nebo i vodorovný. Orientace panelů na jiho-západ, nebo jiho-východ (namísto na jih) snižuje v zimě výkon fotovoltaických panelů asi o 10 %, v létě asi o 3 %.

Pokud vezmeme jako výchozí hodnotu pro naklopení panelů úhel 35°, který je optimální pro období března–října, pak naklopením panelů na 45° získáme v létě asi o 1 % nižší výkon, a v zimě získáme asi 1 % navíc. Naklopením panelů na 49° získáme v létě asi o 4 % nižší výkon, a v zimě získáme asi 5 % navíc. Naklopení panelů na vyšší úhel než 49°, nebo naopak nižší než 35°, je již kontraproduktivní nejen pro léto, ale i pro zimní období. Jinak řečeno: Naklopením panelů na úhel vyšší než 49° nebo nižší než 35° již nezískáme nic navíc, pouze ztrácíme na výkonu, a to jak v létě, tak i v zimě.



Obr. 1.8 – Ideální azimut a natočení

(Vodorovná osa – azimut, svislá osa natočení od vodorovné roviny) [10]

## 2.6 Umístění

Nejčastěji se využívá umístění panelů na střechách budov (orientace střechy na jih) nebo také na polích či loukách. V některých případech se osvědčila i svislá poloha panelů na fasádách domů – relativně nižší energetickou výtěžnost zde nahrazuje několik jiných pozitivních faktorů jako například levnější montáž a údržba, nižší tepelné ztráty v rozvodech, kolektor může sloužit jako izolace budovy a také se díky svislé poloze tolik nešpiní a dosahuje vyšší účinnosti. Na panelu totiž neulpívá tolik prachu a nečistot a také díky svislé poloze nedochází k přehřívání v létě a zapadání sněhem v zimě.

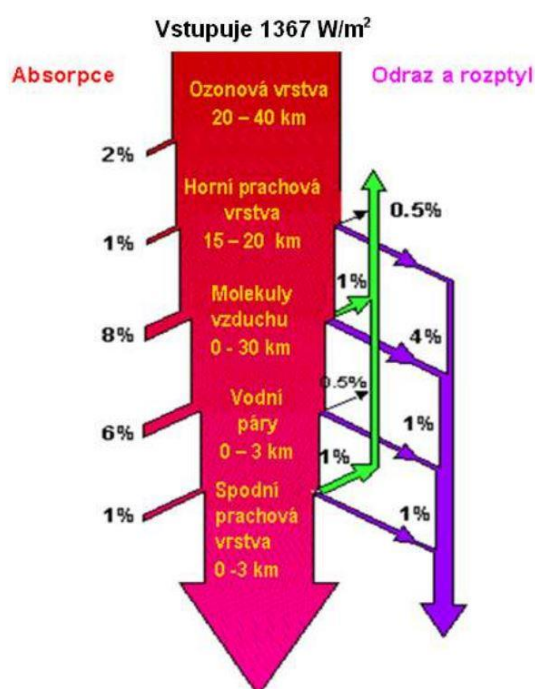
### 3. Faktory ovlivňující podmínky uvnitř objektu

Faktory ovlivňující podmínky uvnitř objektu můžeme rozdělit na dvě skupiny, a to vnější a vnitřní. Mezi vnější faktory patří například počasí, jehož nedílnou součástí je teplota vzduchu a intenzita slunečního záření. Mezi vnější faktory se dále řadí umístění a natočení budovy, s čímž také souvisí energetická výtěžnost solárních panelů. Vnitřními faktory by se daly nazvat ty, které jsou spojené se stavební buňkou jako takovou, například materiál, z kterého je buňka postavena, použité zateplení, ale také barva nátěru buňky.

#### 3.1 Vnější faktory

##### 3.1.1 Intenzita záření

Na povrch atmosféry dopadá záření o velikosti asi  $1367 \text{ W/m}^2$ . Po průchodu jednotlivými vrstvami atmosféry se část záření absorbuje – asi 18 %, část záření se odrazí – asi 3 % a zhruba 6 % se rozptýlí. Výsledné záření, které tedy dopadne na povrch při nejkratší dráze fotonů, kterou se myslí kolmý směr k horizontální rovině, je asi  $1000 \text{ W/m}^2$ . Intenzita dopadajícího záření na povrch Země úzce souvisí s počasím. O počasí pojednává kapitola 3.1.3.



Obr. 1.9 – Absorpce, odraz a rozptyl v atmosféře [13]

### 3.1.2 Denní a roční doba

Nejzásadnější rozdíl bude mezi intenzitou záření ve dne a v noci. Pokud bychom porovnávali záření, které dopadne na povrch Země v slunném poledni, což je v létě  $800 \text{ W/m}^2$  až  $1000 \text{ W/m}^2$  (v zimě max. asi  $300 \text{ W/m}^2$ ) oproti noci, kdy bude výkon činit přibližně  $0,01 \text{ W/m}^2$ , je zde vidět značný rozdíl. V mlhavém podzimním dni dopadne na kolmý povrch  $100 \text{ W/m}^2$  až  $300 \text{ W/m}^2$  a v zamračený zimní den bude hodnota velice nízká – asi  $50 \text{ W/m}^2$ .

### 3.1.3 Počasí











Počasí je fyzikální stav atmosféry, který je v určitém okamžiku nebo časovém období a na určitém místě charakterizován souhrnem hodnot meteorologických prvků a atmosférickými jevy [32]. Počasí je tedy náš celkový vjem meteorologických prvků a jevů v daném okamžiku. Je vnějším projevem komplexu složitých fyzikálních dějů probíhajících v atmosféře. Při přesném měření meteorologických prvků lze považovat počasí za neopakovatelné, může však být podobné a na základě toho rozeznáváme určité typy počasí. Počasím se rovněž rozumějí změny meteorologických prvků a jevů v určitém krátkém časovém úseku (řádově minuty nebo hodiny). Pokud bychom se zajímali o delší časové období, budeme ho již nazývat podnebím.

#### Popis stavu oblačnosti:

Oblačnost je mírou, jež udává stupeň pokrytí oblohy oblaky. Oblačnost je významným meteorologickým a klimatologickým prvkem. V klimatologii se vyjadřuje v desetinách pokrytí oblohy – 0/10 do 10/10. V synoptické meteorologii se používá osmin – 0/8 až 8/8 pokrytí oblohy oblaky. V obou případech znamená 0/10 nebo 0/8 jasnou bezoblačnou oblohu, 10/10 nebo 8/8 znamená zcela zataženou oblohu.

Množství oblačnosti lze vyjádřit v procentech. Globální hodnota oblačnosti pro planetu Zemi je udávána kolem 54 %, což je více než jedna polovina povrchu Země.

Množství oblačnosti je významným meteorologickým a klimatologickým prvkem, neboť oblaky hrají zásadní roli v energetické bilanci Země a jsou součástí zpětných vazeb uvažovaných i při modelování počasí a podnebí. Stačí si uvědomit, jaký mají vliv na albedo Země –  $\alpha_{\text{Země}} = 30 \%$ ;  $\alpha_{\text{oceány}} = 2 \%$  až  $7 \%$ ;  $\alpha_{\text{oblaky}} =$  až  $75 \%$ .

Pokrytí x kód	Význam	Symbol
0/8 x 0	Jasno	
1/8 x 1	Jasno	
2/8 x 2	Skoro jasno	
3/8 x 3	Malá oblačnost	
4/8 x 4	Polojasno	
5/8 x 5	Oblačno	
6/8 x 6	Oblačno	
7/8 x 7	Skoro zataženo	
8/8 x 8	Zataženo	
x 9	Nelze rozeznat	

Tabulka 1.1 – Značení oblačnosti [14]

### 3.1.4 Teplota

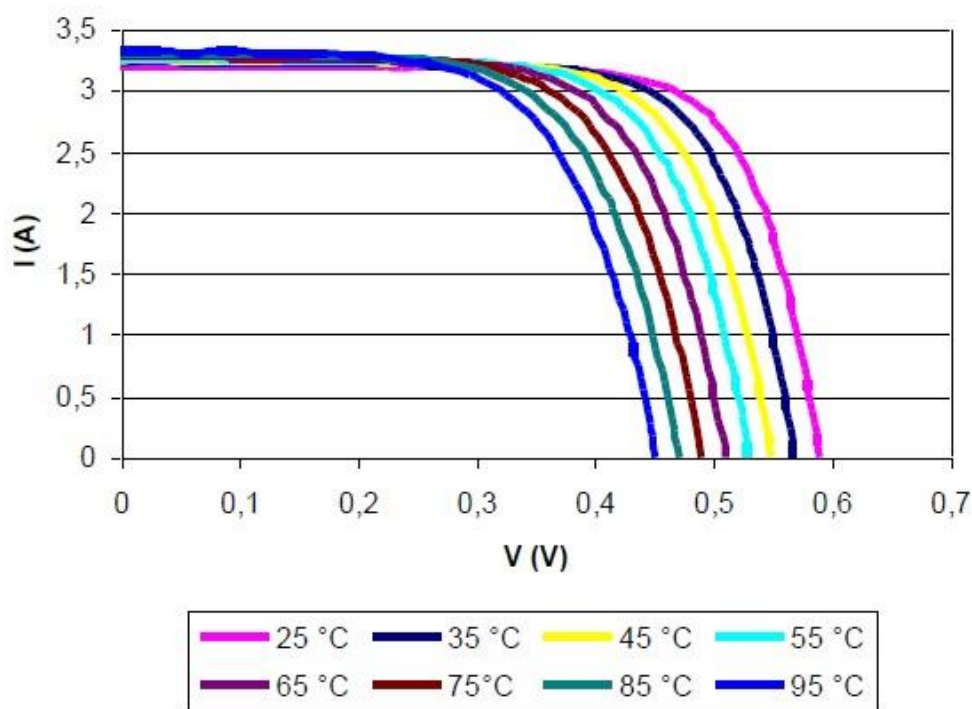
Teplota vně budovy má vliv nejen na konstrukci a tím i na teplotu uvnitř ale také má vliv na výrobu energie solárními panely.

#### Vliv na konstrukci budovy

Vliv na konstrukci budovy se bude lišit pro případy, kdy bude teplota vzduchu vně objektu nižší než uvnitř a kdy bude teplota vně vyšší než uvnitř. Nižší teplota bude konstrukci ochlazovat a vyšší teplota naopak oteplovat, tato energie se bude dále díky tepelné vodivosti konstrukce promítat do podmínek uvnitř.

#### Vliv na výrobu panelů

Vliv teploty na panely bude spočívat v jejich schopnosti pracovat při dané teplotě. Pro křemíkové fotovoltaické články obecně platí, že s rostoucí teplotou klesá napětí naprázdno o 0,4 %/K. Hodnota proudu na krátko se skoro nemění a tak lze konstatovat, že pokles výkonu je obdobný, tedy -0,4 % na každý stupeň Celsia.



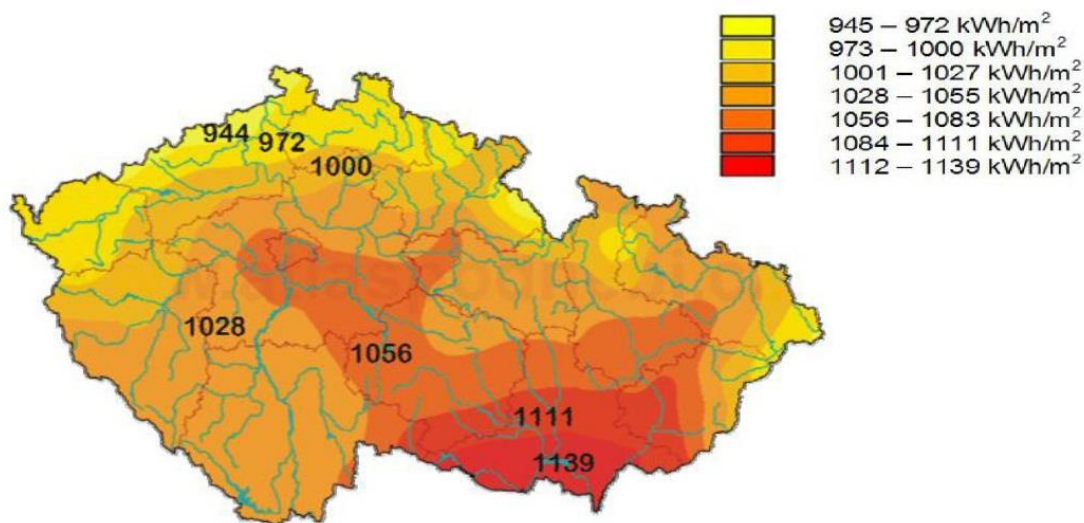
Obr. 1.11 – Vliv teploty na voltampérovou charakteristiku FV článku [11]

### 3.1.5 Překážky

Jak již bylo zmíněno výše, tak mraky, stromy a jiné překážky snižují množství záření (fotonů) dopadající na solární kolektor a tím snižují i jeho výkon. Výjimkou mohou být rozptýlená světlá oblaka, od nichž se záření silně odráží a tak na panel dopadá fotonů více.

### 3.1.6 Lokalizace

O energii ve formě slunečního záření dopadajícího na povrch Země za rok můžeme říci, že jeho největší množství ( $\text{kWh/m}^2$ ) dopadá zhruba okolo 20. rovnoběžky jak na severní tak jižní polokouli. S přibývajícím zeměpisnou šířkou (ve směru dál od rovníku na sever či na jih) se bude toto číslo snižovat. Pokud bychom hovořili o České republice a vycházeli bychom z dlouholetých průměrů, místa, kam dopadá za rok nejvíce solární energie, najdeme na Moravě v povodí řeky Dyje. Hodnoty pro Prahu se pohybují někde mezi  $1050 \text{ kWh/m}^2$  –  $1080 \text{ kWh/m}^2$ .



Obr. 1.12 – Energie dopadající na povrch ČR za rok [12]

Co se týká oblasti, pro kterou je model navrhován, použil jsem ve svém programu několik hodnot, které vycházejí z dlouhodobých měření nebo průměrů. Jelikož navrhuji úpravy pro budovu v podmínkách České republiky, použil jsem jako hodnotu množství záření, které v průměru dopadá na území ČR a to 1050 W/m<sup>2</sup>. Jako další jsem použil hodnotu 50° zeměpisné šířky. Tyto hodnoty jsou zvoleny pouze pro zjednodušení práce s programem, aby uživatel nemusel zadávat příliš mnoho dat. Tyto hodnoty se samozřejmě dají kdykoliv okamžitě změnit.



## 3.2 Vnitřní faktory

Hlavním z takzvaných vnitřních faktorů je materiál, z kterého je stavební buňka vyrobena a kterým je zateplena. Každý materiál má totiž jiné parametry, jako například absorptanci, emisivitu záření, tepelnou kapacitu a další.

### 3.2.1 Absorptance

Absorptance je proces, při kterém dopadá záření na povrch materiálu a energie fotonů je pohlcována materiálem. Množství energie, která je absorbována, se udává desetinným číslem - absorpční koeficient. Energie přijatá látkou může být opět vyzářena a tomuto procesu se říká emisivita, viz níže.

Absorptanci je možné vypočítat za pomoci Kirchhoffova zákona tepelného vyzařování pomocí rovnice

$$A = 1 - R - T, \quad (1.1)$$

kde písmeno  $R[-]$  značí odrazivost a  $T[-]$  označuje propustnost.

Pokud dopadne na povrch materiálu světlo o intenzitě  $\Phi_{in}[W/m^2]$ , část světla o intenzitě  $\Phi_0[W/m^2]$  vstoupí do objemu materiálu.

$$\Phi_0 = \Phi_{in} (1 - R) = \alpha_s \cdot \Phi_{in} \quad (1.2)$$

kde  $\alpha_s[-]$  je absorptivita povrchu. Výkon absorbovaný materiálem je pak

$$P = \Phi_{in} (1 - R) = \alpha_s \cdot \Phi_{in} \quad (1.3)$$

a povrch materiálu, na který dopadá záření, se ohřívá.

Absolutně černé těleso je fyzikální model ideálního tělesa, které pohlcuje veškeré záření všech vlnových délek, dopadající na povrch tohoto tělesa. Absorptance (pohltivost) černého tělesa je tedy  $\alpha = 1$ , a u všech ostatních těles se pohltivost vyjadřuje v poměru k absolutně černému tělesu a tedy nemůže být větší než 1.

Absorptance záření závisí na několika faktorech. Nejvíce bude například záviset na materiálu a jeho struktuře, dále to bude barva, zašpinění materiálu nebo také vlnová délka dopadajícího záření a směr, ze kterého záření dopadá.

### **3.2.2 Měření absorptance**

#### Nepřímá radiometrická metoda

K použití této metody je třeba nejdříve změřit odrazivost a propustnost vzorku, což nám dále umožní vypočítat absorptanci pomocí Kirchhoffova zákona, viz vzorec 1.1.

#### Kalorimetrická metoda

Tato metoda má ve skutečnosti dvě variace. Principem první metody je ozařování materiálu o známé tepelné kapacitě paprskem o známém výkonu při izolaci vzorku od okolí a sledování, jak se zvýší teplota vzorku. Principem druhé metody je umístění vzorku do vakuové komory, jejíž stěny budou mít vyšší teplotu než samotný vzorek a měření tepla, které je odebíráno chlazením.

### **3.2.3 Typy absorptancí**

#### Termální absorptance

Termální absorptance reprezentuje část dopadajícího dlouhovlnného záření, které je absorbováno materiálem. Tento parametr nabývá hodnot mezi 0 a 1. (kde 1 reprezentuje absolutně černé těleso).

#### Solární absorptance

Solární absorptance představuje zlomek solárního záření absorbovaného materiálem, které zahrnuje viditelné spektrum, ultrafialové záření, ale i infračervené záření. Tento parametr opět nabývá hodnot mezi 0 a 1 a používá se při výpočtu množství dopadajícího záření absorbovaného materiálem, které ovlivňuje tepelnou bilanci materiálu.

## Viditelná absorptance

Viditelná absorptance popisuje část dopadajícího viditelného spektra absorbovaného materiálem. Viditelná absorptance se liší od solární tím, že se zabývá užším spektrem dopadajícího světla – světlem viditelným. Použití tohoto parametru je ve své podstatě stejné jako u solární absorptance a stejně tak hodnoty, kterých nabývá.

### **3.2.4 Lambertův zákon**

Při pohlcení světelné energie látkou může v některých případech dojít k přeměně této energie na energii kinetickou. Tato energie se projeví neuspořádaným pohybem částic v absorbující látce, což má za následek zvýšení teploty dané látky. Pokud se však pohlcená energie přemění zpět v energii světelnou, jedná se o jev zvaný luminiscence. Lambertův zákon je dán rovnicí

$$I = I_0 \cdot e^{-\beta\delta},$$

kde  $I[\text{lm}]$  je intenzita světla po průchodu prostředím o tloušťce  $\delta$ ,  $I_0[\text{lm}]$  představuje intenzitu vstupujícího světla a  $\beta[-]$  je absorpční koeficient.

### **3.2.5 Emisivita**

Emisivita, podobně jako absorptance, je vztažena k absolutně černému tělesu. Definice zní, že emisivita se vyjadřuje jako desetinné číslo mezi 0 a 1, což je poměr intenzity vyzařování reálné látky -  $H_E$  k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa -  $H_{OE}$  o stejné teplotě.

Absolutně černé těleso je ideální zářič, což znamená, že ze všech těles se stejnou teplotou vysílá do prostoru největší množství zářivé energie. Můžeme tedy říci, že emisivita absolutně černého tělesa je  $\epsilon_T = 1$ . Opět zde platí, že reálná tělesa této hodnoty dosáhnout nemohou a pouze se k ní přibližují. Emisivita takových těles teda nabývá hodnot menších než 1.

$$\epsilon_T = \frac{H_E}{H_{OE}} \quad (1.4)$$

### 3.2.6 Měření emisivity

K měření emisivity můžeme použít také více metod a závisí na tom, jaký požadujeme výstup.

#### Přímá metoda za vysokých teplot

Pro tuto metodu se využívá zařízení zvané spektrometr, jehož naměřené hodnoty se porovnávají s vyzařováním absolutně černého tělesa o stejné teplotě.

#### Nepřímá metoda za pokojové teploty

Pro měření touto metodou je zapotřebí opět použít Kirchhoffův zákon tepelného vyzařování a úpravou rovnice 1.1 při známé odrazivosti a propustnosti vypočítat emisivitu.

Emisivita tělesa závisí na několika faktorech a to jsou například barva povrchu, struktura povrchu jako je například lesk a mat, hrubost a hladkost nebo také teplota objektu a vlnová délka záření. Existují však tělesa, u nichž můžeme emisivitu považovat za frekvenčně nezávislou, takováto tělesa nazýváme šedé zářiče.

### 3.2.7 Materiál a barva

Jak bylo zmíněno výše, různé materiály mají různé koeficienty absorptivity a emisivity, takže bude záležet na materiálu, z kterého bude buňka vyrobena, ale také bude záležet na materiálu zateplení, který může částečně zabraňovat v uvolňování energie z materiálu ven do okolí budovy. Naakumulované teplo tak bude zůstat v konstrukci nebo se bude uvolňovat do vnitřní části objektu a bude oteplovat vzduch uvnitř buňky a tok energie směrem ven bude částečně omezen. Tento jev bude žádoucí hlavně v zimě, kdy bude třeba udržet uvnitř objektu maximální možnou tepelnou energii, pokud by měla být budova energeticky úsporná. Konkrétně v případě stavební buňky je na stěny použit ocelových plech, jehož absorpční koeficient je mezi 0,40 – 0,65 a koeficient emisivity mezi 0,20 – 0,30.

Parametry absorptance a emisivity také může ovlivnit povrchová úprava materiálu. Jedná se zde hlavně o hrubost povrchu a barvu. První zmíněná úprava bude v našem konkrétním případě zanedbána kvůli zjednodušení a budeme tedy považovat stěny buňky za hladké. Druhá zmíněná povrchová úprava může mít vliv na energii

absorbovanou ale i vyzářenou. Různé barvy totiž odrážejí různě velkou část světelné energie. Pro představu absorpční koeficient bílého nátěru se pohybuje mezi 0,23 – 0,49 kdežto u černého nátěru je to okolo 0,95.

Absorpční koeficienty a koeficienty emisivity se můžou v různých tabulkách lišit. Je to nejspíše proto, že autoři tabulek mohou popisovat jiný typ barvy, jiný typ materiálu s různými příměsemi a povrchovými úpravami, takže pokud bychom chtěli znát přesné koeficienty pro konkrétní materiál a konkrétní barvu použitou na konstrukci stavební buňky, museli bychom zažádat o dodatečnou technickou dokumentaci přímo výrobce.

### **3.2.8 Tepelná kapacita**

Podle fyzikální definice tepelná kapacita vyjadřuje množství tepla, které těleso ohřeje o 1 Kelvin. Jednotka veličiny je J/K. Tepelná kapacita materiálu buňky bude důležitou vlastností pro výpočet teploty, kterou konstrukce dosáhne při dané velikosti záření a okolní teplotě.

### **3.2.9 Akumulace tepla**

Akumulace tepla je uložení energie v objemu materiálu za pomoci přeměny. V tomto případě konkrétně světelné energie na energii kinetickou, neboli neuspořádaný pohyb částic. Záleží na parametrech materiálu, kolik energie bude schopen naakumulovat a následně vyzářit do vnitřní části objektu. Tyto parametry byly zmíněny v kapitolách absorptance (3.2.1) a emisivity (3.2.5).

V reálné situaci je konstrukce, například v létě, ozářena slunečním zářením a také přijímá energii ve formě tepla z okolního vzduchu. Tuto energii stěny buňky přijímají až do té doby, než se naplní její tepelná kapacita. Dále už není schopná více energie přijmout a zůstává v ustáleném stavu. Toto teplo zároveň předává zpět okolí díky koeficientu emisivity pro daný materiál. Do té doby se jedná o jev přechodný, který budeme ve výpočetním algoritmu zanedbávat.

### **3.2.10 Různost konstrukce**

Konstrukce budovy není úplně všude stejná a jsou zde místa, která je třeba prozkoumat více do hloubky. Takovým příkladem je okno. U okna můžeme počítat s jinými koeficienty absorptance a emisivity. Tato část konstrukce bude propouštět více energie ve formě infračerveného záření do objektu a tedy přímo oteplovat vzduch v místnosti a stejně tak bude oteplovat povrch stěny zevnitř budovy. V zimě také můžeme očekávat největší tepelné ztráty skrz tuto část, kvůli únikům tepla v mezerách mezi oknem a konstrukcí. Bude tedy záležet na velikost a technologii oken, kdy tyto parametry určí, kolik tepelné energie bude skrz tuto část procházet.

### **3.2.11 Přenos tepla**

K přenosu tepla dochází v případě stavební buňky v několika fázích. Nejdříve se přenáší teplo konvekcí z okolního vzduchu do materiálu konstrukce. Dalším krokem je přenos tepelného toku vedením, skrz materiál (v našem případě stěnu buňky). Dále dochází k přenosu tepla zářením z materiálu do vzduchu uvnitř buňky. K tomuto procesu dochází i ve směru opačném, který můžeme nazvat ztráty neboli přenos tepla směrem ven ze stavební buňky. Tyto procesy jsou detailně popsány rovnicemi v závěru kapitoly 4.5.

## 4. Praxe

V této části se dostáváme k samotnému simulačnímu programu a vzorcům, které jsou použity pro výpočet a které vysvětlují fyzikální principy probíhajících událostí. Spolu s použitými vzorci a vysvětlení jejich použití bude v této kapitole také objasněno několik klíčových termínů týkajících se slunečního záření.

### 4.1 Přímé záření - $G_B$

Přímé záření je energie ve formě fotonů přicházející k Zemi přímo od slunečního disku, tedy z velice malého prostorového úhlu. Intenzita tohoto záření se snižuje s rostoucí vzdáleností, kterou musí urazit (koeficient atmosférické masy  $AM$  – viz vzorce 1.5 a 1.6), což závisí na výšce Slunce nad obzorem, ale také se snižuje, narazí-li na nečistoty v atmosféře, či oblačnost. Pokud je obloha souvisle pokryta mraky, intenzita přímého záření by měla být nulová, protože záření bylo rozptýleno a stává se zářením difuzním. Atmosférická masa je vyjádřena vzorcem

$$AM = \frac{1}{\sin\varphi}, \quad (1.5)$$

kde  $\varphi$  značí úhel od horizontální roviny, pod kterým vstupuje záření do atmosféry. Pokud je obloha jasná, můžeme vyjádřit intenzitu přímého dopadajícího záření jako

$$G_B(\varphi) = G_{B0}(0,7)^{AM}, \quad (1.6)$$

### 4.2 Difuzní - $G_D$

Difuzní, neboli rozptýlené záření je energie přicházející z prostorového úhlu  $2\pi$  při plně zakrytém slunečním disku, což znamená, že do tohoto záření se nezapočítává záření přímé. K rozptylu přímého záření na záření difuzní dochází na molekulách vzduchu a také na nečistotách a mracích v atmosféře. Nejvíce energie přicházející k povrchu Země v podobě difuzního záření bude přicházet z prostoru okolo slunečního disku, neboť z tohoto prostoru budou mít fotony zprostředkovávající energii nejkratší dráhu k Zemi a také nejméně překážek, při jejichž průchodu by mohly ztratit část své energie.

	Záření [W/m <sup>2</sup> ]	Difuzní podíl [%]
Modré nebe bez mraků	800 - 1000	10
Mlha	600 - 900	<50
Podzimní den, mlha	100 - 300	100
Zimní den, zamračeno	50	100
Celoroční průměr	600	50 - 60

Tabulka 1.2 – Průměrné hodnoty záření a difuzní podíl [13]

### 4.3 Albedo – $G_p$

Záření odražené neboli Albedo je záření, které bylo odraženo od předmětů většinou na Zemském povrchu. Albedo udává poměr mezi zářením, které je odraženo a zářením, které je pohlceno předmětem. Z tabulky níže je patrné, že čím světlejší povrch, tím více odráží záření a proto předmětem s jednou z největších odrazivostí záření je sníh.

Povrch	Odrazivost	Povrch	Odrazivost
Polní cesta	4 %	Betonový povrch	22 %
Jehličnatý les	7 %	Zelená tráva	26 %
Asfaltová cesta	10 %	Tmavé stavební povrchy	27 %
Štěrková asfaltová střecha	13 %	Opadané listí	30 %
Pole	14 %	Písek	40 %
Suchá tráva	20 %	Světlé stavební plochy	60 %
Kamenitý povrch	20 %	Sníh	75 %

Tabulka 1.3 – Odrazivost povrchů [15]



#### 4.4 Globální záření - $G_{SUN}$

Globálním zářením nazýváme veškerou energii v podobě slunečního záření směřující k zemskému povrchu. Je tedy dáno součtem přímého záření, difuzního záření a záření odraženého.

$$G_{SUN} = G_B + G_D + G_\rho \quad (1.7)$$

Kvůli naprosté korektnosti práce je zde nutné doplnit, že kvůli zhotovení výpočetního algoritmu bylo globální záření dopadající na stavební buňku zjednodušeno zanedbáním odraženého záření – nepočítá se tedy s okolním prostředím, které by mohlo odrážet sluneční paprsky. Jako konstanta bylo použito přímé záření o velikosti  $950 \text{ W/m}^2$ , ke kterému bylo připočteno 12 %, což představuje záření difuzní. Velikost záření použitého pro výpočty je tedy zhruba  $1060 \text{ W/m}^2$ .

## 4.5 Algoritmus simulačního programu

V této části jsou uvedeny rovnice fyzikálních jevů, ze kterých vychází algoritmus pro simulační program, spolu s jejich vysvětlením.

### 4.5.1 Rovnice pro výpočet energetické výtěžnosti fotovoltaických panelů:

Sluneční deklinace  $\delta$  [°] určuje zeměpisnou šířku, kde se v daný měsíc a den tohoto měsíce nachází Slunce kolmo nad obzorem, a je dána rovnicí

$$\delta = -23,45 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{360} \cdot (0,98 \cdot D + 29,7 \cdot M - 21)\right), \quad (1.8)$$

kde M udává pořadí měsíce v roce a D pořadí dne v daném měsíci.

Výška Slunce nad obzorem  $h$  [°] je dána vztahem

$$\sin h = \sin \delta \cdot \sin \theta + \cos \delta \cdot \cos \theta \cdot \cos \omega, \quad (1.9)$$

do kterého dosadíme Sluneční deklinaci. Symbol  $\theta$  reprezentuje zeměpisnou šířku  $\theta$  [°], která je v algoritmu zvolena 50°. Symbol  $\omega$  [°] určuje denní dobu mezi východem a západem Slunce v daný den. V poledne je  $\omega = 0^\circ$  a dále pak každá hodina odpovídá 15°. Před polednem se 15° s každou hodinou odečítá a po poledni s každou hodinou přičítá.

Součinitel  $\varepsilon$  [-], který je závislý na nadmořské výšce a výšce Slunce nad obzorem je dán vztahem

$$\varepsilon = 9,38076 \cdot \frac{\sin h + \sqrt{(0,003 + \sin^2 h)}}{2,0015 \cdot \left(1 - \frac{A}{10000}\right)} + 0,91018, \quad (1.10)$$

kde  $A$  [m] je nadmořská výška. Nadmořská výška byla zvolena 450 metrů, což je střední nadmořská výška pro Českou republiku.

Intenzita přímého slunečního záření dopadající na plochu kolmou ke směru slunečních paprsků je vyjádřena rovnicí

$$G_{bn} = G_0 \cdot e^{-\frac{Z}{\varepsilon}}, \quad (1.11)$$

kde  $G_0$  je solární konstanta (přibližně 1367 W/m<sup>2</sup>) a  $Z$  [-] je součinitel znečištění atmosféry.

Jelikož se počítá s použitím stavební buňky na stavbách při pracích ve městech, byl součinitel znečištění atmosféry zvolen  $Z=4$ , neboť tato hodnota odpovídá městům s průmyslovými exhalacemi.

Za normálních okolností lze počítat s průměrnými hodnotami:

$Z=2$  pro místa nad 2.000 m n. m.

$Z=2,5$  pro místa nad 1.000 m n. m.

$Z=3$  pro venkov bez průmyslových exhalací

$Z=4$  pro města s průmyslovými exhalacemi

Měsíc	Průměrné měsíční součinitele Z pro oblasti s rozdílnou čistotou ovzduší ve střední Evropě			
	Horské oblasti	Venkov	Města	Průmyslové oblasti
1.	1,5	2,1	3,1	4,1
2.	1,6	2,2	3,2	4,3
3.	1,8	2,5	3,5	4,7
4.	1,9	2,9	4,0	5,3
5.	2,0	3,2	4,2	5,5
6.	2,3	3,4	4,3	5,7
7.	2,3	3,5	4,4	5,8
8.	2,3	3,3	4,3	5,7
9.	2,1	2,9	4,0	5,3
10.	1,8	2,6	3,6	4,9
11.	1,6	2,3	3,3	4,5
12.	1,5	2,2	3,1	4,2
<b>Roční průměr</b>	<b>1,9</b>	<b>2,75</b>	<b>3,75</b>	<b>5,0</b>

Tabulka 1.4 – Součinitel znečištění [16]

Azimut Slunce  $\gamma_S$  [°] je dán vztahem

$$\sin \gamma_S = \left( \frac{\cos \delta}{\cos h} \right) \cdot \sin \omega \quad (1.12)$$

Úhel dopadajících slunečních paprsků na povrch fotovoltaického panelu je úhel, který svírají tyto paprsky s přímkou kolmou k ploše panelu (normálou). Tento úhel můžeme vyjádřit jako

$$\cos \Psi = \sin h \cdot \cos \beta + \cos h \cdot \sin \beta \cdot \cos(\gamma_S - \gamma), \quad (1.13)$$

kde  $\beta$  [°] určuje úhel, který svírá fotovoltaický panel s vodorovnou osou a  $\gamma$  [°] je úhel, který svírá přímka kolmá k vodorovné ploše panelu (normála) s poledníkem. Zjednodušeně řečeno se jedná o orientaci vůči jihu.

Intenzita přímého solárního záření  $G_B$  [W/m<sup>2</sup>] na skloněnou plochu je dána součinem intenzity záření na plochu ke slunečním paprskům kolmou -  $G_{bn}$  a úhlu dopadu těchto slunečních paprsků -  $\Psi$  [°].

$$G_B = G_{bn} \cdot \cos \Psi \quad (1.14)$$

Energie přímého záření jak pak dána integrálem

$$E_B = \int_{t_1}^{t_2} G_B dt, \quad (1.15)$$

kde je tato energie vyjádřena v kWh/m<sup>2</sup>.

Intenzita přímého záření na vodorovnou plochu -  $G_{bh}$  [W/m<sup>2</sup>] je vyjádřena jako

$$G_{bh} = b_n \cdot \sin h, \quad (1.16)$$

díky které dostaneme intenzitu difuzního záření na vodorovnou plochu -  $G_{dh}$  [W/m<sup>2</sup>]

$$G_{dh} = 0,33 \cdot (G_0 - G_{bn}) \cdot \sin h \quad (1.17)$$

Na základě dvou předchozích rovnic můžeme vypočítat hodnotu difuzního záření  $G_D$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] na plochu skloněnou

$$G_D = 0,5 \cdot (1 + \cos \beta) \cdot G_{dh} + 0,5\rho \cdot (1 - \cos \beta) \cdot (G_{bh} + G_{ah}), \quad (1.18)$$

kde parametr  $\rho$ [-] udává odrazivost okolního prostředí. Hodnota  $\rho = 0,27$  by odpovídala odrazivosti domů, při umístění panelů například na pole by se odrazivost  $\rho = 0,14$ .

Pokud energii difuzního záření  $E_D$  [ $\text{kWh}/\text{m}^2$ ] opět vyjádříme integrálem

$$E_D = \int_{t_1}^{t_2} G_D dt, \quad (1.19)$$

pak dostaneme, že celková energie  $E_{SUN}$  [ $\text{kWh}/\text{m}^2$ ] je

$$E_{SUN} = E_B + E_D \quad (1.20)$$

Podobný vztah platí také pro globální záření  $G_{SUN}$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$$G_{SUN} = G_B + G_D \quad (1.21)$$

Dále by se měla zohlednit okolní teplota vzduchu  $T_{air}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], jelikož ovlivňuje výrobu energie panelem. Teplota panelu  $T_{cell}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] je dána následujícím vztahem

$$T_{cell} = T_{air} + \frac{NOCT-20}{80} \cdot S, \quad (1.22)$$

kde  $S$  je ozáření panelu v  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , můžeme tedy napsat

$$T_{cell} = T_{air} + \frac{NOCT-20}{80} \cdot \frac{E_{SUN}}{10}, \quad (1.23)$$

kde NOCT je nominální operační teplota panelu.

Hodnotu  $T_{cell}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] dosadíme do rovnice pro vyrobenou energii v závislosti na teplotě panelu

$$E_{SUN/T} = \frac{(-0,4 \cdot T_{cell} + 100)}{100} \cdot E_{SUN} \quad (1.24)$$

Celkový energetický výnos fotovoltaického panelu  $E_{SYS}$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] odpovídá obecné rovnici

$$E_{SYS} = (1 - p) \cdot E \cdot \eta \cdot S \cdot K, \quad (1.25)$$

kde  $p[-]$  jsou ztráty v systému (u střešních systémů obvykle 2 % - 8 %),  $E$  reprezentuje  $E_{SUN/T}$ ,  $\eta[-]$  představuje účinnost konkrétních fotovoltaických panelů,  $S[m^2]$  je plocha panelů a  $K[-]$  je konstanta, která značí aktuální oblačnost. (Jasno –  $K=1$ , Zataženo –  $K=0,25$ )

#### 4.5.2 Rovnice pro výpočet energie dopadající na konstrukci budovy:

Tyto rovnice budou principiálně velice podobné základním rovnicím pro fotovoltaické panely, ale budou se v některých aspektech lišit.

Úhel dopadajících slunečních paprsků na povrch konstrukce buňky  $\cos_B \Psi [^\circ]$  bude po úpravě pro jednotlivé stěny vypadat takto

$$1) \cos_{B1} \Psi = \sin h \cdot \cos 90^\circ + \cos h \cdot \sin 90^\circ \cdot \cos(\gamma_S - \gamma) \quad (1.26)$$

$$2) \cos_{B2} \Psi = \sin h \cdot \cos 90^\circ + \cos h \cdot \sin 90^\circ \cdot \cos(\gamma_S - (\gamma + 180^\circ)) \quad (1.27)$$

$$3) \cos_{B3} \Psi = \sin h \cdot \cos 90^\circ + \cos h \cdot \sin 90^\circ \cdot \cos(\gamma_S - (\gamma + 90^\circ)) \quad (1.28)$$

$$4) \cos_{B4} \Psi = \sin h \cdot \cos 90^\circ + \cos h \cdot \sin 90^\circ \cdot \cos(\gamma_S - (\gamma - 90^\circ)) \quad (1.29)$$

Parametr  $\beta [^\circ]$  z rovnice 1.13 zde bude stále roven  $90^\circ$ , neboť se jedná o odklon plochy od vodorovné pozice a boční stěny buňky budou od této pozice vždy odkloněny o  $90^\circ$ .

Intenzity přímého záření  $G_{B1}$ ,  $G_{B2}$ ,  $G_{B3}$ ,  $G_{B4}$  (vše ve  $W/m^2$ ) na stěny konstrukce jsou dány úpravou rovnice 1.14 pro potřeby jednotlivých stěn do tvarů

$$1) G_{B1} = G_{bn} \cdot \cos_{B1} \Psi \quad (1.30)$$

$$2) G_{B2} = G_{bn} \cdot \cos_{B2} \Psi \quad (1.31)$$

$$3) G_{B3} = G_{bn} \cdot \cos_{B3} \Psi \quad (1.32)$$

$$4) G_{B4} = G_{bn} \cdot \cos_{B4} \Psi, \quad (1.33)$$

Hodnota difuzního záření  $G_{DB}[W/m^2]$  na skloněnou plochu konstrukce buňky je pak dána vztahem

$$G_{DB} = 0,5 \cdot (1 + \cos 90^\circ) \cdot G_{dh} + 0,5\rho \cdot (1 - \cos 90^\circ) \cdot (G_{bh} + G_{dh}), \quad (1.34)$$

příčemž výpočet  $G_{DB1}$ ,  $G_{DB2}$ ,  $G_{DB3}$  a  $G_{DB4}$  (vše ve  $W/m^2$ ) pro jednotlivé stěny bude shodný, budou se lišit jen výsledné hodnoty při konkrétním výpočtu kvůli velikosti stěny. Tyto hodnoty již však budou pouze ve Watech.

Celková hodnota záření  $G_{SUNB}[W/m^2]$ , která dopadne na stěny buňky je dána součtem

$$G_{SUNB} = \sum_{m=1}^4 G_{DBm} + \sum_{n=1}^4 G_{Bn} \quad (1.35)$$

Záření, které bude pohlceno jednotlivými stěnami, bude vycházet z obecného vztahu

$$\Phi = \Phi_{IN} \cdot (1 - R) = \alpha_S \cdot \Phi_{IN}, \quad (1.36)$$

kde  $R[-]$  je odrazivost povrchu a  $\alpha_S[-]$  je absorptivita povrchu.

#### 4.5.3 Vzorce pro přenos tepla:

Pokud dochází k přenosu tepla mezi vzduchem a pevnou látkou nebo opačně, můžeme vyjádřit jednotkový tepelný tok rovnicí

$$q = S \cdot \alpha \cdot (T_1 - T_2), \quad (1.37)$$

kde  $T_1[^\circ C]$  je teplota zdroje a  $T_2[^\circ C]$  je teplota příjemce tepelného toku.

Dále pak dochází k přenosu tepla vedením skrz danou pevnou látku se součinitelem tepelné vodivosti  $\lambda[W/m \cdot K]$

$$q = S \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot (T_2 - T_3), \quad (1.38)$$

kde  $T_2[^\circ C]$  a  $T_3[^\circ C]$  jsou teploty na krajních bodech látky (na vnější a vnitřní straně stěny).

V neposlední řadě dochází k přenosu tepla zářením, neboli materiál stěny vyzařuje teplo do okolního vzduchu. Tento jev je popsán rovnicí

$$q = S \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_3^4 - T_4^4), \quad (1.39)$$

kde  $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ),  $\varepsilon$  je emisivita viz kapitola 3.2.5 a  $T_3[K]$ ,  $T_4[K]$  jsou opět teploty zdroje a příjemce.

#### 4.5.4 Tepelné ztráty stěnou:

Tepelný tok stěnou v opačném směru (směrem ven ze stavební buňky - ztráty) bude vycházet z obdobných vzorců jako tepelný tok směrem dovnitř. Nejdříve dochází k přenosu tepla ze vzduchu do konstrukce

$$Q = S \cdot \alpha_{in} \cdot (T_B - T_{S1}), \quad (1.40)$$

kde  $\alpha_{in}[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$  představuje součinitel přestupu tepla pro vnitřní prostory,  $T_B[^\circ\text{C}]$  je teplota budovy,  $T_{S1}[^\circ\text{C}]$  je teplota povrchu stěny na vnitřní straně a  $S[\text{m}^2]$  je plocha stěny.

Dále opět dochází k přenosu tepla vedením skrz materiál konstrukce

$$Q = S \cdot \frac{\lambda_S}{d_S} \cdot (T_{S1} - T_{S2}), \quad (1.41)$$

kde  $\lambda_S[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$  je tepelná vodivost stěny,  $d_S[\text{m}]$  je šířka stěny,  $T_{S1}[^\circ\text{C}]$  je opět teplota na vnitřní straně stěny a  $T_{S2}[^\circ\text{C}]$  je teplota na vnější straně stěny na styku stěny a izolace (PUR panel).

Stejným principem vedení dochází k přenosu tepla izolací (PUR panel)

$$Q = S \cdot \frac{\lambda_{PUR}}{d_{PUR}} \cdot (T_{S2} - T_{S3}), \quad (1.42)$$

kde  $\lambda_{PUR}[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$  je tepelná vodivost izolace,  $d_S[\text{m}]$  je šířka izolace,  $T_{S2}[^\circ\text{C}]$  je teplota na vnitřní straně izolace a  $T_{S3}[^\circ\text{C}]$  je teplota na vnější straně izolace (vnější povrch celé stavební buňky).

Obdobná situace jako uvnitř buňky nastává na vnější straně stěny buňky, kde dochází k přenosu tepla ze stěny do okolního vzduchu

$$Q = S \cdot \alpha_{ext} \cdot (T_{S3} - T_{ext}), \quad (1.43)$$

V neposlední řadě zde ještě dochází k přenosu tepla do okolí zářením, které se dá vyjádřit pomocí rovnice

$$Q = S \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_3^4 - T_{ekv}^4), \quad (1.44)$$

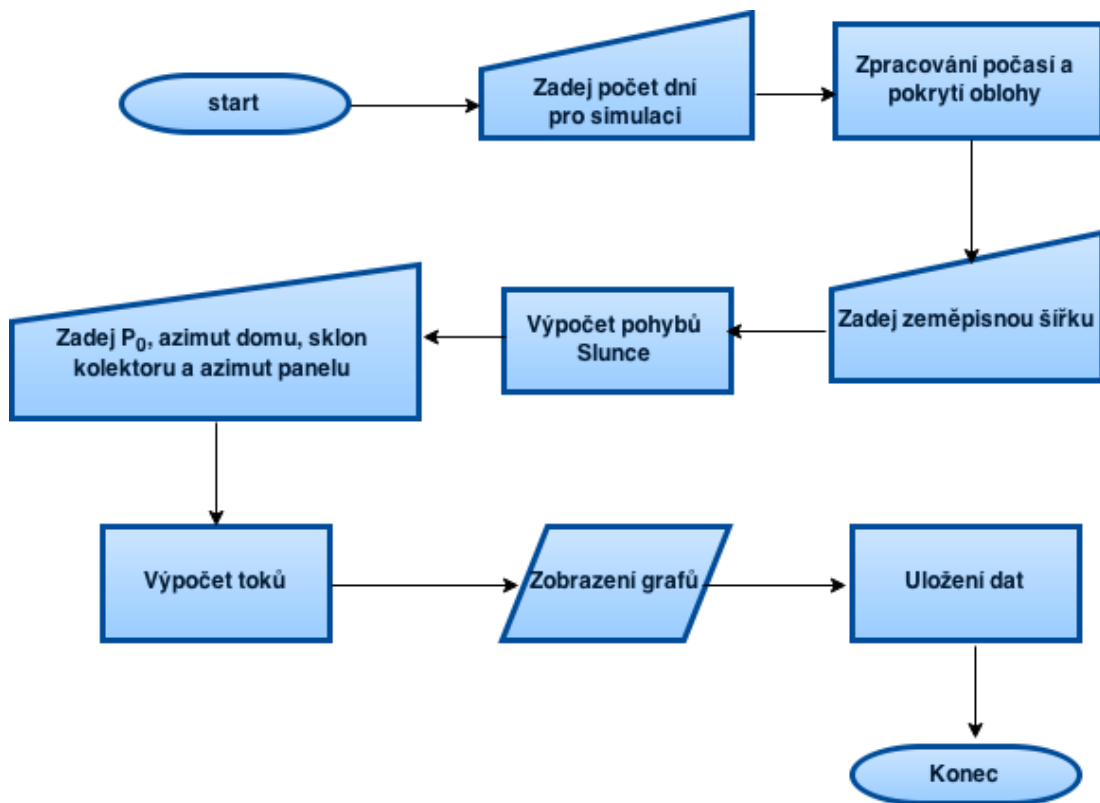
kde  $T_{ekv}[\text{K}]$  představuje ekvivalentní vyzařovací teplotu okolí.  $T_3[\text{K}]$  zde představuje termodynamickou teplotu a tak by měla být zadána v Kelvinech.



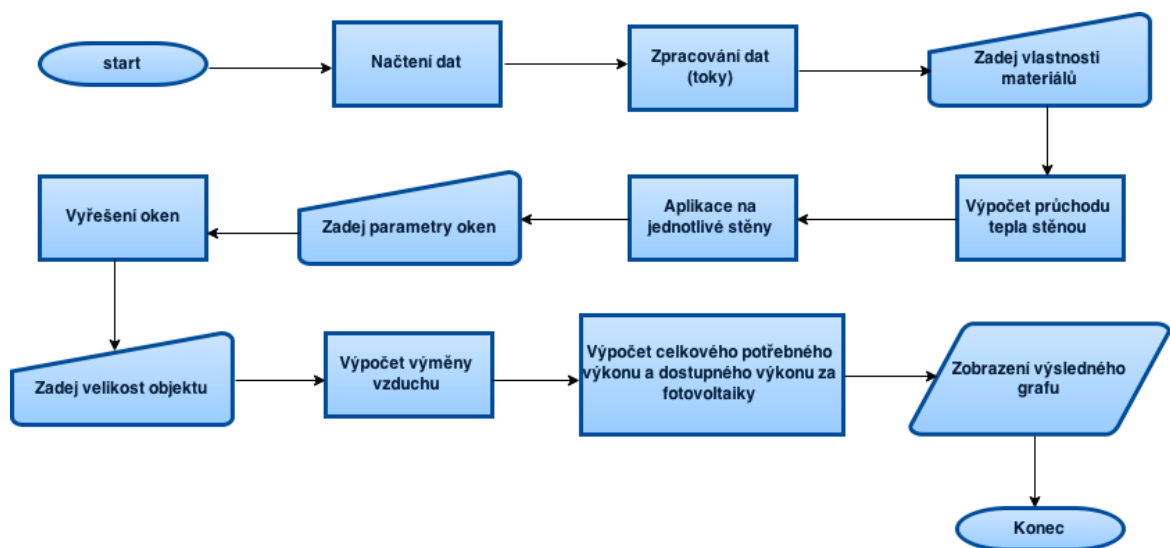
## 4.6 Variabilita simulačního programu - Vstupy

- 1) Počasí – stav oblačnosti je generován přímo funkcí programu Wolfram Mathematica v podobě textového souboru. Přibližné hodnoty koeficientů jsou k nahlédnutí níže.
  - a) Jasno –  $K = 1,00$
  - b) Skoro jasno –  $K = 0,85$
  - c) Malá oblačnost –  $K = 0,70$
  - d) Polojasno –  $K = 0,55$
  - e) Oblačno –  $K = 0,45$
  - f) Skoro zataženo –  $K = 0,35$
  - g) Zataženo –  $K = 0,25$
- 2) Venkovní teplota – Obdobně jako stav oblačnosti je také generován funkcí do textového souboru.
- 3) Počet dnů – tímto parametrem lze nastavit, pro kolik dní se bude simulace počítat.
- 4) Měsíc –
- 5) Den v měsíci –
- 6) Zeměpisná šířka – °
- 7) Natočení panelů vůči vodorovné pozici – °
- 8) Azimut panelu – °
- 9) Azimut domu – °
- 10) Plocha panelů –  $m^2$
- 11) Účinnost panelů – v rozmezí 0 a 1
- 12) Materiál buňky
  - a) Ocelový plech –  $d$  [cm],  $\lambda$ [W/m·K],  
–  $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>],  $c$ [J/kg·K]
  - b) PUR panel –  $d$  [cm],  $\lambda$ [W/m·K],  
–  $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>],  $c$ [J/kg·K]
- 13) Vnitřní požadovaná teplota – °
- 14) Okna
  - a) Počet –
  - b) Rozměry – m
- 15) Rozměry stavby – m

### Diagram funkce programu – 1. část



### Diagram funkce programu – 2. část



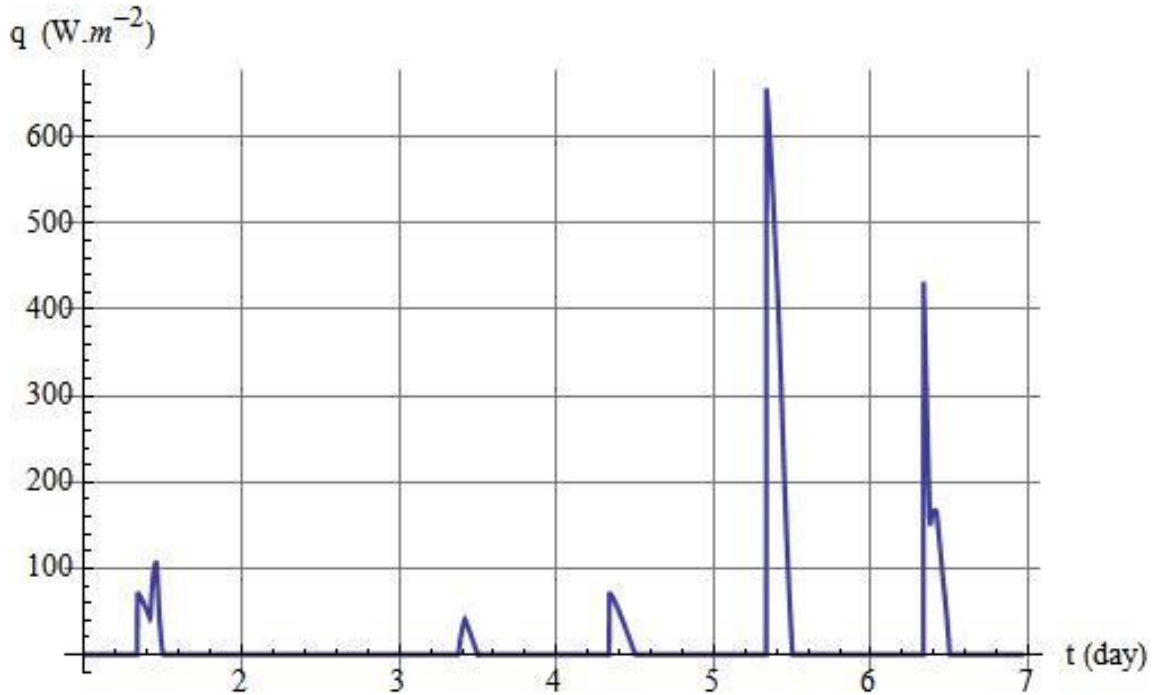
## 4.7 Výstup simulace

### 4.7.1 Grafy toků dopadající na jednotlivé stěny - 1. – 6. července

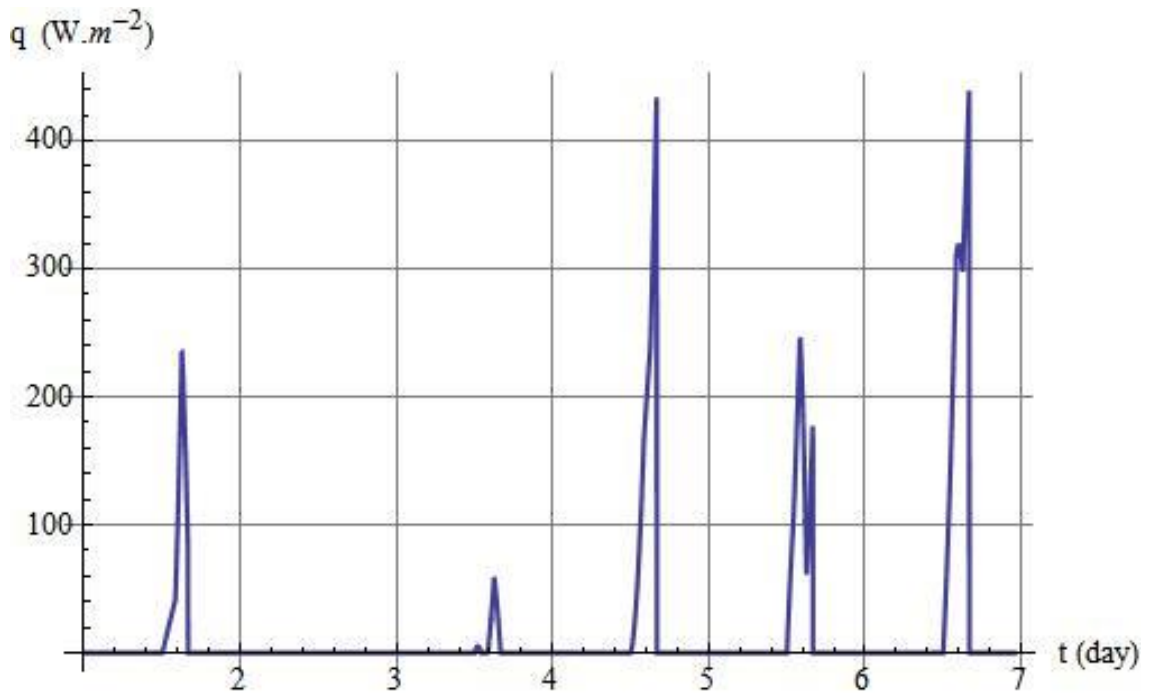
Azimut panelu – 0°    Sklon panelu – 35°    Azimut domu – 0°     $P_0=1060 \text{ W/m}^2$

Zeměpisná šířka – 50°

Východní stěna

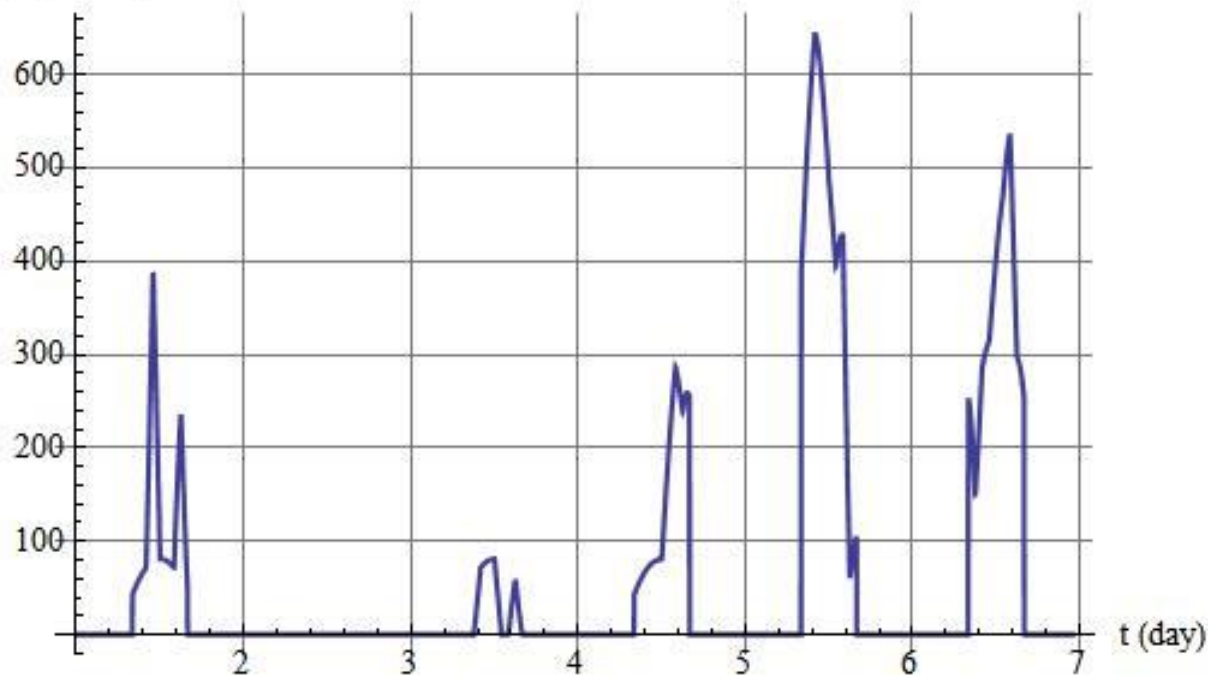


Západní stěna



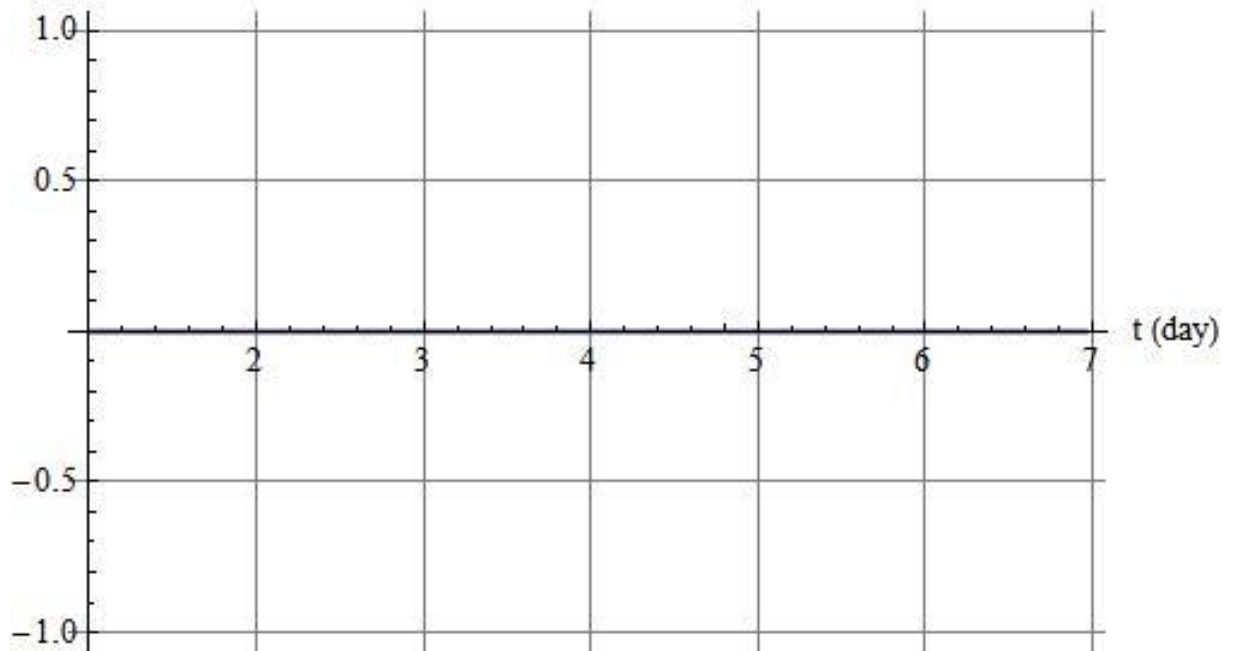
Jižní stěna

$q$  ( $W.m^{-2}$ )



Severní stěna

$q$  ( $W.m^{-2}$ )

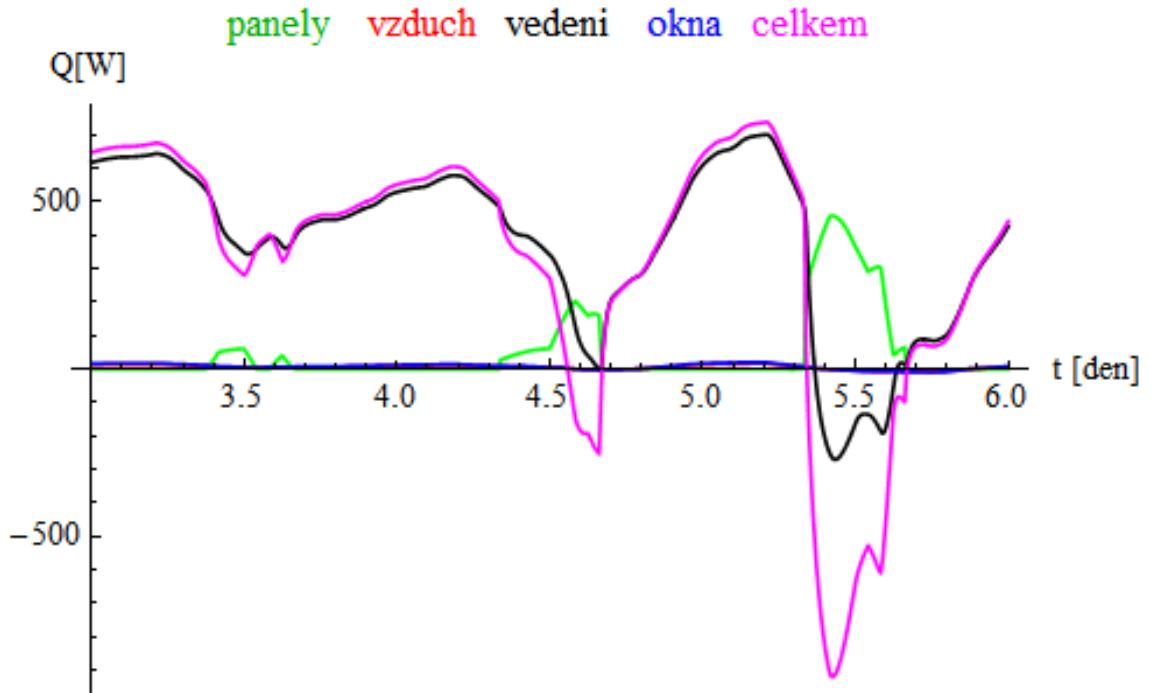


#### 4.7.2 Graf potřebné energie a energie z panelů - 1. – 6. července

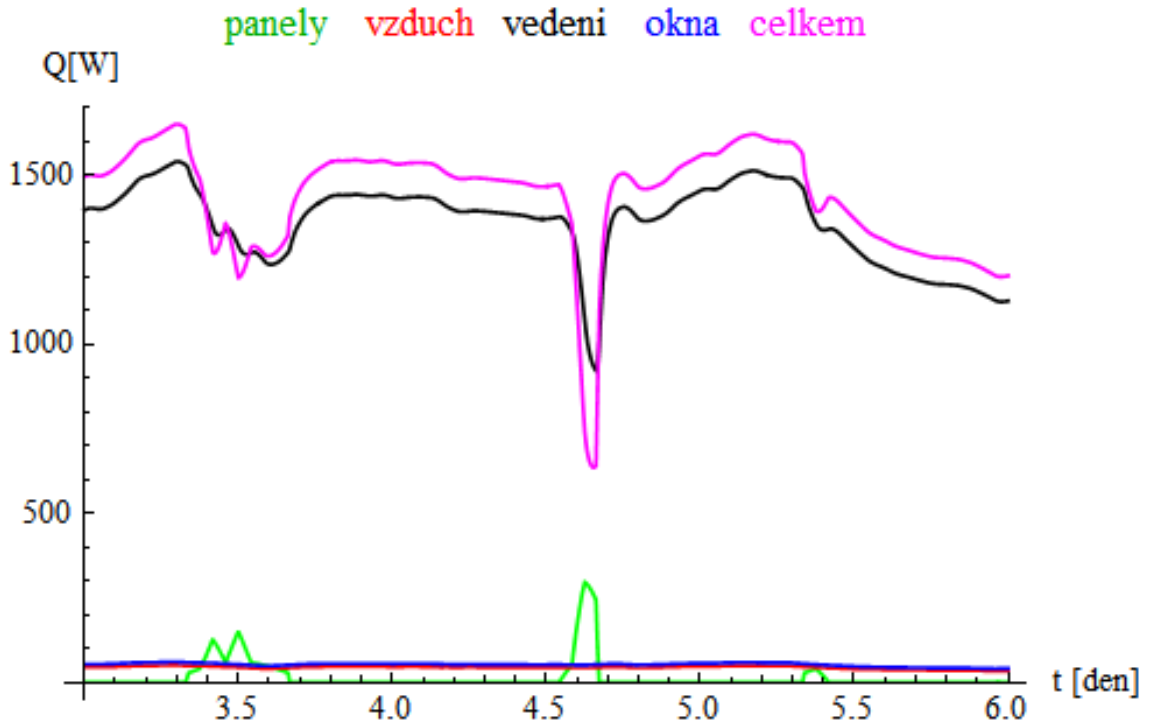
Celková potřebná energie k vytopení buňky na požadovanou teplotu – fialová

Celková energie získaná z fotovoltaických panelů – zelená

Účinnost panelů – 15 %      Plocha panelů – 5m<sup>2</sup>      Požadovaná vnitřní teplota – 22°C



#### 4.7.3 Graf potřebné energie a energie z panelů - 1. – 6. ledna



## 5. Závěr

V poslední části této bakalářské práce bych rád zhodnotil průběh vypracování a poukázal na to, co se během práce podařilo.

První věc, která se během práce podařila, byl výběr vhodné stavební buňky, která je popsána hned v první kapitole. Vybraná stavební buňka je od firmy KOMA a byla vybrána zvláště díky velmi dobře zpracované technické dokumentaci. Vybraná stavební buňka byla pro výpočty použita tak, jak ji dodává výrobce a byla vylepšena pouze o fotovoltaické panely umístěné na střeše.

Druhá kapitola byla věnována technologii fotovoltaických panelů, typům panelů a také jejich použití. Dále zde byl probrán rozdíl v citlivosti na difuzní záření u jednotlivých typů panelů a také možná budoucnost, kterou se pravděpodobně bude ubírat technologie fotovoltaiky v následujících letech.

Ve třetí kapitole byly probrány faktory ovlivňující jak výtěžnost panelů, tak i podmínky uvnitř budovy. Mezi tyto faktory patří hlavně počasí, intenzita záření nebo materiál, ze kterého je stavební buňka vyrobena.

Hlavním tématem čtvrté kapitoly jsou rovnice, vzorce a fyzikální zákonitosti, ze kterých vychází algoritmus simulačního programu. Tato kapitola byla rozdělena do několika částí, které se zabývají výtěžností fotovoltaických panelů, zářením dopadajícím na povrch budovy a v neposlední řadě také přenosy tepla. V závěru této kapitoly se nachází výstupy simulačního programu v podobě několika grafů. Jako první zde najdeme grafy toků sluneční energie dopadající na jednotlivé stěny stavební buňky. Zajímavější pak budou grafy potřebné energie pro vytopení buňky na požadovanou teplotu a energie vyrobené fotovoltaickými panely.

Hlavní otázkou této bakalářské práce bylo zejména to, zda bude stavební buňka energeticky soběstačná díky dodávce energie z fotovoltaických panelů. Jak můžeme vidět z grafů na konci čtvrté kapitoly, odpověď na tuto otázku zní – ne za každých podmínek. Z grafů je patrné, že v zimních měsících jako je například leden, je spotřeba energie na vytopení stavební buňky několikrát vyšší než dostupná energie z fotovoltaických panelů. V letních měsících, jako je například červenec, by byla energie z panelů dostačující pouze při dostatečné venkovní teplotě a hlavně při čisté obloze bez mraků.

Závěrem tedy můžeme říci, že tato budova kompletně soběstačná nebude a bude třeba použít nějaký další systém vytápění, aby byla obyvatelná po celý rok.

Tato práce pro mě byla jednoznačně velkým přínosem informací a praktických dovedností, které se pokusím zúročit v navazujícím magisterském studiu.

## **Použité zdroje (obrázky a tabulky)**

[1] Unimo buňky, stavební buňky [online] [cit. 2015-04-07]. Dostupné z:

<http://www.koma-modular.cz/vyrobkove-rady/economic-line>

[2] Izolační PUR panely [online] [cit. 2015-04-07]. Dostupné z:

<http://www.stojcev.cz/izolacni-pur-panely.html>

[3] Princip fotovoltaického článku. [online] [cit. 2015-04-07]. Dostupné z:

<http://elektrika.cz/data/clanky/princip-fotovoltaickeho-clanku>

[4] Vliv překlenovacích diod - 3. přednáška předmětu A1B13SVS

[online] [cit. 2015-4-07]. Dostupné z:

[http://pasan.feld.cvut.cz/a1b13svs/2015\\_svs3ab.pdf](http://pasan.feld.cvut.cz/a1b13svs/2015_svs3ab.pdf)

[5] Fotovoltaický panel a jeho struktura. [online] [cit. 2015-04-08]. Dostupné z:

<http://www.rdsolar.cz/cenik/solarni-panely>

[6] Nové tenkovrstvé panely druhé generace s technologií Thin-film CIGS.

[online] [cit. 2015-04-09]. Dostupné z:

<http://www.solarninovinky.cz/index.php?rs=4&rl=2010032102&rm=29#.VT6dHvmsV8F>

[7] Teorie fotovoltaiky. [online] [cit. 2015-04-09]. Dostupné z:

<http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaika.aspx>



[8] Solární panel. [online] [cit. 2015-04-15]. Dostupné z:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Sol%C3%A1rn%C3%AD\\_panel](http://cs.wikipedia.org/wiki/Sol%C3%A1rn%C3%AD_panel)

[9] New solar energy efficiency world record [online] [cit. 2015-05-15]. Dostupné z:  
<http://www.engineering.unsw.edu.au/emag/news/new-solar-energy-efficiency-world-record>

[10] Příprava teplé vody. [online] [cit. 2015-04-09]. Dostupné z:  
<http://voda.tzb-info.cz/priprava-teple-vody/10453-priprava-teple-vody-fotovoltaika-nebo-solarni-tepelne-kolektory>

[11] Provozní podmínky fotovoltaických systémů - 7. přednáška předmětu A1B13SVS  
[online] [cit. 2015-05-07]. Dostupné z:  
[http://pasan.feld.cvut.cz/a1b13svs/2014\\_svs7b.pdf](http://pasan.feld.cvut.cz/a1b13svs/2014_svs7b.pdf)

[12] Ekonomické aspekty fotovoltaiky – 9. přednáška předmětu A1B13SVS  
[online] [cit. 2015-05-07]. Dostupné z:  
[http://pasan.feld.cvut.cz/a1b13svs/2014\\_svs9ab.pdf](http://pasan.feld.cvut.cz/a1b13svs/2014_svs9ab.pdf)

[13] Intenzita záření. [online] [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:  
[http://www.crr.vutbr.cz/system/files/prezentace\\_04\\_1104\\_1.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/prezentace_04_1104_1.pdf)

[14] Oblačnost. [online] [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:  
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Obla%C4%8Dnost>

[15] Systémy pro využití sluneční energie - 1. přednáška předmětu A1B13SVS

[online] [cit. 2015-5-01]. Dostupné z:

[http://pasan.feld.cvut.cz/a1b13svs/2015\\_svs1a.pdf](http://pasan.feld.cvut.cz/a1b13svs/2015_svs1a.pdf)

[16] Základní údaje pro výpočet slunečních kolektorů a absorpčních ploch.

[online] [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.ekodum.cz/energy/sun/info.php>

### **Použitá literatura**

[17] Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů.

[online] [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu>

[18] Unimo buňky, stavební buňky. [online] [cit. 2015-05-03]. Dostupné z:

<http://www.koma-modular.cz/vyrobkove-rady/economic-line>

[19] Absolutně černé těleso. [online] [cit. 2015-05-03]. Dostupné z:

[http://cs.wikipedia.org/wiki/Absolutn%C4%9B\\_%C4%8Dern%C3%A9\\_t%C4%9Bleso](http://cs.wikipedia.org/wiki/Absolutn%C4%9B_%C4%8Dern%C3%A9_t%C4%9Bleso)

[20] Emisivita. [online] [cit. 2015-05-03]. Dostupné z:

<http://cs.wikipedia.org/wiki/Emisivita>

[21] Absorpce světla. [online] [cit. 2015-05-03]. Dostupné z:

[http://cs.wikipedia.org/wiki/Absorpce\\_sv%C4%9Btla](http://cs.wikipedia.org/wiki/Absorpce_sv%C4%9Btla)

[22] Stěnové a fasádní izolační panely. [online] [cit. 2015-05-07]. Dostupné z:  
<http://panely.kingspan.cz/stenove-panely-izolacni-panely-zatepleni-fasad-a-budov-1738.html>

[23] Surface Properties. [online] [cit. 2015-05-08]. Dostupné z:  
<http://www.designbuilder.co.uk/helpv2/Content/SurfaceProperties.htm>

[24] Součinitelé sálání a poměrné tepelné pohltivosti. [online] [cit. 2015-05-08].  
Dostupné z:  
<http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/56-soucinitele-salani-a-pomerne-tepelne-pohltivosti>

[25] Emissivity. [online] [cit. 2015-05-06]. Dostupné z:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Emissivity>

[26] Absorptivity & Emissivity table. [online] [cit. 2015-05-04]. Dostupné z:  
<http://www.solarmirror.com/fom/fom-serve/cache/43.html>

[27] Absorbce světla a generace tepla – 10. přednáška předmětu A1B13SVS  
[online] [cit. 2015-05-05]. Dostupné z:  
[http://pasan.feld.cvut.cz/a1b13svs/2014\\_svs10b.pdf](http://pasan.feld.cvut.cz/a1b13svs/2014_svs10b.pdf)

[28] Katalog stavebních materiálů. [online] [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:  
[http://www.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000068\\_katalog.html](http://www.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000068_katalog.html)

[29] Základní přehled izolačních materiálů. [online] [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:  
[http://istavitel.cz/clanek/izolace/tepelne-izolace/zakladni-prehled-tepelne-izolacnich-materialu\\_80](http://istavitel.cz/clanek/izolace/tepelne-izolace/zakladni-prehled-tepelne-izolacnich-materialu_80)

[30] STANĚK, Kamil. Fotovoltaika pro budovy. 1. vyd. Praha: Grada pro Katedru konstrukcí pozemních staveb Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze, 2012, 223 s. ISBN 978-80-247-4278-6.

[31] Ing. Richard Najman: Energetický management chytrého domu, disertační práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2015

[32] Počasí. [online] [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:  
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Po%C4%8Das%C3%AD>

[32] Nové fotovoltaické panely z Anglie. [online] [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:  
[http://www.aldebaran.cz/bulletin/2013\\_33\\_rul.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2013_33_rul.php)