

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Měření teplotních charakteristik fotovoltaických panelů

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na měření a zkoumání chování fotovoltaického panelu za různých provozních podmínek. Práce je rozdělena do čtyř hlavních bodů. První část je zaměřena na teorii, ve které jsou uvedeny základní principy a funkce fotovoltaického panelu. Dále jsou popsány vlivy jednotlivých fyzikálních parametrů na jejich činnost. Ve druhé části je ukryta hlavní podstata práce. Jedná se o praktické měření fotovoltaického panelu, jeho analýze a chování z hlediska ohřevu a chladnutí, při působením rozdílných provozních podmínek. Výstupem praktického měření jsou teplotní koeficienty. Poslední část navazuje na výstupní koeficienty z praktického měření fotovoltaického panelu a vyhodnocuje je za pomoci matematických simulačních modelů pro výrobu elektrické energie.

Klíčová slova

fotovoltaický panel, fotovoltaický jev, fotoelektrický jev, parametry fotovoltaických panelů, koeficienty ohřevu a chladnutí, PVGIS, PVsyst, Topview, teplotní charakteristiky, meteorologie, obnovitelné zdroje energie, simulace

Abstract

The presented final thesis is focusing on measuring and research of photovoltaic panel reactions during various working conditions. The thesis is divided into four main points. The first is focused on theory, where the basic principles and functions of photovoltaic panel are featured. In addition, the influences of individual physical parameters on the panels' functionality are described. The main thesis of this work is listed in the second part. This is the practical measurement of photovoltaic panel, its analysis and reactions with respect to heating and cooling during functioning at different working conditions. The results of these practical measurements are temperature coefficients. The last part follows the resulting coefficients from practical measurements of photovoltaic panel and evaluates these with help of mathematical simulation models for electricity production.

Key words

photovoltaic panel, photovoltaic effec, photoelectric effect, parameters of photovoltaic panels, heating and cooling coefficients, PVGIS, PVsyst, Topview, temperature characteristics, meteostation, renewable energy sources

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
Podpis

V Plzni dne 23.5.2018

Nikolas Kalina

Poděkování

Tímto bych velice rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanovi Bělíkovi, Ph.D. za cenné a užitečné rady, poznatky, připomínky a konzultace pro vypracování této diplomové práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	1
ÚVOD.....	2
1 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK	3
1.1 FOTOELEKTRICKÝ JEV	3
1.1.1 Fotoemise.....	3
1.1.2 Fotovodivost.....	5
1.1.3 Fotovoltaický jev.....	5
1.2 PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	7
1.2.1 Voltampérová charakteristika.....	7
1.2.2 Proud nakrátko	8
1.2.3 Napětí naprázdno.....	8
1.2.4 Pracovní bod.....	8
1.2.5 Bod maximálního výkonu.....	9
1.2.6 Proud I450.....	9
1.2.7 Fill Factor.....	9
1.2.8 Účinnost FVP.....	10
1.2.9 Sériový odpor.....	10
1.2.10 Paralelní odpor.....	11
2 ANALÝZA CHOVÁNÍ FV PANELU.....	12
2.1 POPIS MÍSTA MĚŘENÍ	12
2.2 MĚŘENÍ.....	14
2.3 URČENÍ TEPLTNÍHO KOEFICIENTU	18
2.3.1 Praktické měření na panelu Calyxo CX60.....	22
2.3.2 Výsledné hodnoty koeficientu ohřevu pro měření bez horního krytu konstrukce ...	23
2.3.3 Výsledné hodnoty koeficientu chladnutí pro měření bez horního krytu konstrukce	28
2.3.4 Výsledné hodnoty koeficientu ohřevu pro měření s horním krytem konstrukce .	30
2.3.5 Výsledné hodnoty koeficientu chladnutí pro měření s horním krytem konstrukce .	35
2.4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	38
3 SIMULACE FVP V KONKRÉTNÍ LOKALITĚ	39
3.1 SIMULACE V PROGRAMU PVGIS.....	39
3.1.1 Výpočty z programu PVGIS.....	42
3.1.2 Vyhodnocení výsledků z programu PVGIS	44
3.2 SIMULACE V PROGRAMU PVSYSY.....	44
3.2.1 Výpočty v programu PVsyst.....	47
3.2.2 Vyhodnocení výsledků z programu PVsyst	48
3.3 SIMULACE Z DAT METEOSTANICE.....	48

3.3.1	<i>Výpočty z dat meteostanice</i>	52
3.3.2	<i>Vyhodnocení výsledků dat z meteostanice</i>	53
3.4	SIMULACE Z DAT METEOSTANICE S POUŽITÍM TEPLOTNÍCH KOEFICIENTŮ	53
3.4.1	<i>Výpočty z dat meteostanice s použitím teplotních koeficientů</i>	57
3.4.2	<i>Vyhodnocení dat z meteostanice s použitím teplotních koeficientů</i>	60
3.5	ZÁVĚREČNÉ VYHODNOCENÍ VŠECH POUŽITÝCH METOD	60
4	ZÁVĚR	63
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	64

Seznam symbolů a zkratk

OZE	Obnovitelné zdroje energie
STP	Standartní testovací podmínky
VA	Voltampérová charakteristika
PB	Pracovní bod
Q_{FVPM}	Výpočet energetické bilance FVP
Q_S	Množství dopadající energie
FVP	Fotovoltaický panel
K_{TEP}	Teplotní koeficient
Q_{ROK}	Průměrné množství vyrobené energie za rok

Úvod

Fotovoltaika patří do skupiny OZE. V České republice je možné spatřit fotovoltaické panely téměř na každém kroku. Jejich hlavní funkcí je získání elektrické energie z přímé přeměny slunečního záření. Výhoda fotovoltaiky je v nevyčerpatelném množství sluneční energie. Důraz na vývoj fotovoltaiky je dnes obrovský a snaha dnešních dní spočívá ve zvýšení účinnosti a přeměny sluneční energie na elektrickou.

Toto téma jsem si vybral z důvodu zajímavosti odvětví obnovitelných zdrojů energie. Cílem předložené diplomové práce je prozkoumat vlastnosti a chování fotovoltaických panelů v různých provozních podmínkách prostředí a jejich teplotních charakteristik. Hlavní náplní je vyhodnocení chování fotovoltaického panelu za různých provozních podmínek a uvést je ve výpočetních simulacích, jenž jsou založeny na datech z místní meteostanice, simulačních programech a na skutečných změřených hodnotách. Výsledkem by měli být mnoho odlišných charakteristik pro různé metody, a také přehled o množství vyrobené energie fotovoltaickým panelem.

Práce je dělena na tři kapitoly. První kapitola je zaměřena na teoretickou část. Pojednává o vysvětlení principu, funkci fotovoltaických panelů a vlivu jednotlivých fyzikálních parametrů na jejich činnost. Ve druhé kapitole je vyhodnocení teplotních koeficientů získaných z praktického měření. Poslední kapitola obsahuje vyhodnocení dosažených výsledků ze simulačních metod.

1 Fotovoltaický článek

Fotovoltaický článek můžeme přirovnat k polovodičové diodě. Je tvořen dvěma polovodiči, a to polovodiči typu P a N. Polovodičem typu N rozumíme katodu a polovodičem typu P anodu. Obě vrstvy jsou odděleny P-N přechodem.

Dojde-li k dopadu fotonů slunečního záření na fotočlánek, vzniká vnitřní fotoelektrický jev. Při něm dochází k uvolňování elektronů a na přechodu mezi vrstvami vzniká elektrické napětí. Můžeme tedy říci, že fotovoltaický článek přímo přeměňuje energii dopadajícího světla na energii elektrickou pomocí fotoelektrického jevu.

V praxi se především setkáváme s fotovoltaickými panely, které jsou sério-paralelní kombinací fotovoltaických článků. [1] [4] [5] [6]

1.1 Fotoelektrický jev

Podstata jevu byla popsána až roku 1905 Albertem Einsteinem, avšak za objevitele je považován Heinrich Rudolf Hertz, díky experimentům, které prováděl v roce 1887.

Fotoelektrický jev neboli fotoefekt je jednou ze tří možných interakcí γ záření s elektronovým obalem atomu. Foton má v těchto tří interakcích nejslabší energii. Elektrony, které jsou emitované z jaderného obalu, jsou poté označovány jako fotoelektrony. Jejich uvolňování se říká fotoelektrická emise neboli fotoemise. Podle způsobu vzniku elektronů vlivem dopadajícího elektromagnetického záření můžeme fotoefekt rozlišit na vnější a vnitřní. Vnější fotoelektrický jev probíhá na povrchu látky, při němž se elektrony uvolňují do okolí, a u vnitřního fotoelektrického jevu zůstávají uvolněné elektrony v látce jako vodivostní elektrony. [1] [4] [5] [6] [7]

1.1.1 Fotoemise

Jedná se o vnější fotoelektrický jev, který je nazýván fotoemise. Princip je založen na pohlcování elektromagnetického záření z povrchu ozářeného materiálu. Tento proces nastane ihned po dopadu elektromagnetického záření, nehledě na to, jak silná je jeho intenzita. Následně dojde k pohlcování světla materiálem, a to má za následek započetí procesu emise elektronů ve valenční vrstvě.

Fotoemise má jednak charakter částicový, jednak charakter vlnění. Záření je složeno z fotonů, které za určitých podmínek mají vlastnosti vlnové energie. Ta je pak tedy nositelem částic.

Ke spuštění reakce je zapotřebí určitého množství energie, které je závislé na vlnové délce záření a také na materiálu. Pokud je tedy dostatečná energie dodána na povrch materiálu, mohou se valenční elektrony nacházející se v krystalové mřížce odtrhnout. Energie částic roste s vyšší frekvencí, přesněji s kratší vlnovou délkou. Je dokázáno, že každý materiál dosahuje jiné mezní frekvence f_0 , které odpovídá vlnová frekvence λ_0 , ta určuje hranici průběhu jevu. Energie potřebná k tomu, aby došlo k odtržení elektronu z krystalové mřížky, musí mít minimálně frekvenci dopadajícího záření rovnající se nebo vyšší než f_0 , respektive při vlnové délce nižší než λ_0 . Tato energie platí jako výstupní práce látky a je značena E_a . Z toho vyplývá podmínka, kdy je možné, aby fotoefekt nastal. Je-li tedy vlnová délka záření λ menší než je mezní hodnota λ_0 , dochází k vnějšímu fotoefektu neboli fotoemisi. V opačném případě při nesplnění podmínky k fotoemisi nedojde.

Příkladem materiálů, které dosahují nejmenší výstupní práce látky E_a , jsou například alkalické kovy. Jejich hodnota výstupní práce látky se nachází přibližně okolo 2eV. Pro srovnání: jiné materiály dosahují výsledků výstupní práce minimálně dvakrát vyšších hodnot. Fotoemise má velký fyzikální význam, avšak v praxi k výrobě elektrické energie nikoliv. Je to z důvodu účinnosti přeměny zářivé energie na energii elektronů, která se pohybuje v hodnotách velice nízkých, až téměř nulových (setiny procent). V praxi je tedy fotoemisi možné využít pouze ke zjišťování světelných toků pomocí fotonek a fotonásobičů. [1] [4] [5] [6] [7]

$$E = h * f = \frac{h * c}{\lambda} \text{ [J]} \quad (1.1)$$

Kde:

E – energie [J]

f – frekvence [Hz]

h – Planckova konstanta ($6,625 \cdot 10^{-34}$ J·s)

c – rychlost světla ve vakuu ($3 \cdot 10^8$ m/s)

λ – vlnová délka [m]

1.1.2 Fotovodivost

Tento jev spadá do kategorie vnitřního fotoelektrického jevu. Dochází při něm k pohlcení elektromagnetického záření uvnitř pevné látky. Pomocí absorpce kvant záření materiálem může docházet u některého z elektronů, jenž se nachází v krystalové mřížce pevné látky, k uvolnění, tzn., stává se volným elektronem. Volný elektron pak tedy může způsobit zvýšení vodivosti materiálu. Zvýšení vodivosti jak u polovodičů, tak i u izolantů je závislé na velikosti absorbovaného elektromagnetického záření. Tento jev je možné realizovat pomocí fotovoltaických článků. Nejvhodnějším materiálem pro využití fotovodivosti je křemík. Použití křemíku je převážně z důvodu toho, že čistý křemík neobsahuje skoro žádné příměsi, a tudíž při výrobě je možné dosáhnout čistoty téměř sta procent. Jelikož křemík při nižších teplotách obsahuje velice málo volných elektronů, je rovněž i dobrým izolantem. Naopak při zvýšení teploty dochází k uvolňování volných elektronů (klesá odpor), protože vyšší teplota má za následek zvýšení kmitání atomů v jeho krystalové mřížce. Tím se křemík stává vodivým. Po uvolnění vazeb v krystalové mřížce a uvolnění elektronů dochází ke vzniku kladných děr. Vzniklé díry reprezentují kladné nosiče náboje, které se mohou v krystalu pohybovat. Jestliže je vodivost křemíku způsobena pouze svými vlastními volnými nosiči náboje, aniž by došlo k působení nosičů náboje od příměsí, nazývá se tato vodivost vlastní.

Princip fotovodivosti náleží přímé přeměně světelné energie na energii elektrickou. Energie dopadající ze slunečního záření vybudí elektrony do vyšší energetické hladiny. Nicméně i přesto, že k tomu všemu dochází uvnitř materiálu, je zapotřebí usměrnit pohyb materiálem. K tomu je nutné použít externí zdroj energie v podobě baterie. Ke vzniku volných nábojů pouze za pomoci vlivu působení záření musí být použita světelná energie takové velikosti, aby došlo k překonání energetických rozdílů mezi vodivostním a valenčním pásem polovodiče. [1] [4] [5]

1.1.3 Fotovoltaický jev

K fotovoltaickému jevu dochází v solárních člancích, jde o přímou přeměnu slunečního záření na elektrickou energii. Solární články se převážně skládají z polovodičů. Ty je možné charakterizovat jako látky, které se díky svým vlastnostem nachází mezi kovy a izolanty. Polovodiče neobsahují mnoho volných elektronů, avšak ty mohou vzniknout při dopadu záření. Nejpoužívanějším polovodičovým materiálem pro solární články je křemík. Použití je z důvodu méně pevných kovalentních vazeb, jimž k uvolnění částic je zapotřebí energie o minimální

velikosti 1,12 eV. Dotace křemíku cizími atomy se provádí za pomoci troj nebo pěti mocných prvků. Dotovaný křemík nese označení jako znečištěný.

V křemíku se nacházejí čtyři valenční elektrony tvořící vazby elektronových párů se sousedními atomy. Článek je tvořen ze dvou spolu hraničními polovodičovými oblastmi, které jsou odlišně dotované. Mezi záporně (n) a kladně (p) dotovanou oblastí vzniká elektrické pole. Elektrické pole je způsobeno difuzí nadbytečných elektronů v oblasti PN. To dále vede ke vzniku oblasti s malým počtem volných nosičů náboje, k takzvané vrstvě prostorového náboje. V oblasti, která je kladně dotována, zůstávají záporně nabitě atomy a naopak v záporně dotované oblasti zůstávají kladně nabitě atomy.

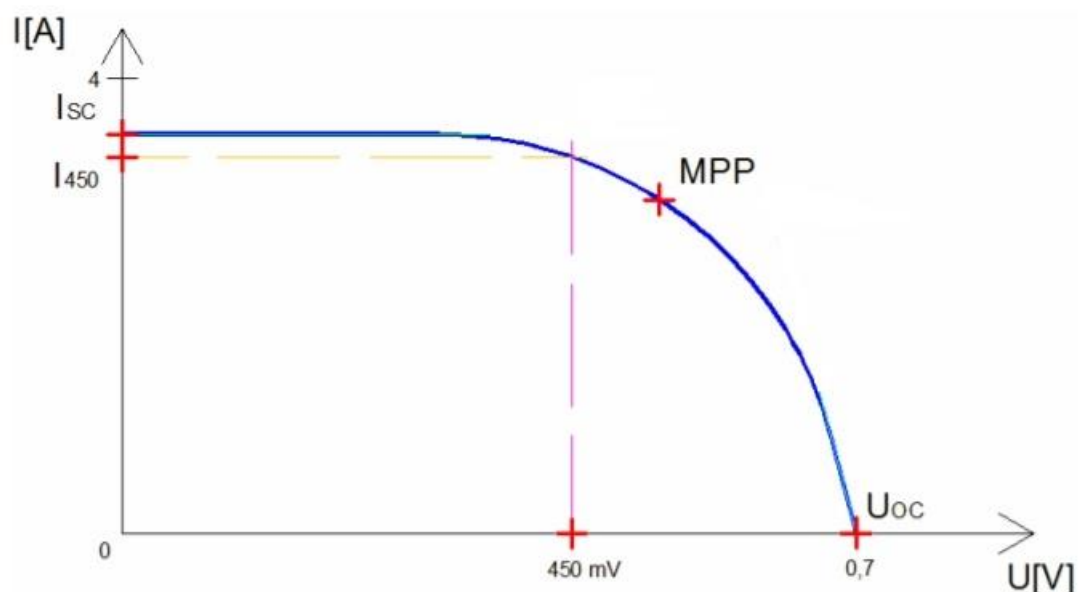
Při vzniku vnitřního fotoelektrického jevu dochází k dopadu fotonů na fotovoltaický článek. Dojde k uvolnění záporných elektronů a na přechodu PN vznikne elektrické napětí. Hodnota elektrického napětí se pohybuje okolo 0,5 V, které je odpovídající právě křemíkovým článkům. Dochází k absorpci fotonů a uvolněné elektrony se mohou volně pohybovat, což má za následek vznik děr. Vzhledem k faktu, že díry mají kladný náboj, jsou díry a elektrony vlivem elektrického pole přitahovány do opačných směrů. Díry se posléze dostávají na přední stranu článku a naopak kladné ke stěně zadní. Dojde k získání opačných polarit, což má za následek vznik elektrického potenciálu neboli elektrického napětí. Uzavřeme-li obvod připojením spotřebiče, začne protékat stejnosměrný elektrický proud. Ke zvýšení jednak elektrického proudu, jednak napětí se používá sérioparalelní spojení. Také tohle spojení vede ke vzniku fotovoltaického panelu. [1] [4] [5] [7] [8]

1.2 Parametry fotovoltaických článků

Pro určení parametrů fotovoltaických článků je potřeba zhodnotit jeho parametry jednotlivě. K tomu je zapotřebí solární článek či panel rozložit na soubor jednotlivých prvků, které můžeme snadno popsat a snadno mezi sebou porovnat za stejných podmínek, jež jsou označovány jako standard zkratkou STP (standardní testovací podmínky). Tyto podmínky definují testování fotovoltaických článků či panelů, které jsou vztaženy ke slunečnímu záření při intenzitě osvětlení 1000 W/m^2 , spektrálnímu složení světla AM 1,5 G a teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Veškeré výsledné hodnoty jsou pak obsaženy v katalogových listech přikládaných výrobcem. Dále pro popis některých parametrů je možné použít VA charakteristiku, o které se zmíním v následující kapitole. [8] [9] [11]

1.2.1 Voltampérová charakteristika

Základní popis některých veličin fotovoltaických panelů provádíme pomocí VA charakteristiky. Tato charakteristika udává závislost proudu na napětí. Dále se v ní vyznačují určité důležité body, které je možné využít při návrzích fotovoltaických systémů nebo při posuzování kvality. Nicméně musíme brát v potaz, že VA charakteristika neumožňuje získat veškeré potřebné parametry a je tedy zapotřebí je vyhledat v katalogových listech nebo dopočítat. Níže je přiložen obrázek VA charakteristiky s vyznačenými základními parametry. [9] [11]



Obr. 1.1: Voltampérová charakteristika fotovoltaického panelu [11]

1.2.2 Proud nakrátko

Tento parametr se rovněž nazývá fotoelektrický proud nebo zkratový proud a je jeden ze základních parametrů fotovoltaického článku. Velikost neboli jeho hodnotu nalezneme jak v katalogových listech, tak ji můžeme rovněž odečíst z VA charakteristiky. Proudem nakrátko rozumíme maximální proud, který může fotovoltaický článek při daných slunečních podmínkách osvětlení dodávat. Tento proud je však závislý na mnoha faktorech. Jedná se o intenzitu osvětlení, teplotu, spektrální citlivost fotovoltaického čidla a plochu článku. Velikosti hodnoty, které může proud nakrátko dosahovat, jsou v řádech desítek mA až jednotek A. U největších a nejmodernějších fotovoltaických článků je hodnota proudu nakrátko lehce nad hranicí 6 A. [9] [11]

1.2.3 Napětí naprázdno

Jedná se o maximální napětí, které můžeme nalézt na svorkách fotovoltaického článku bez připojené zátěže, při dané teplotě a intenzitě osvětlení. Monokrystalické články dosahují napětí naprázdno okolo 0,6 V. [9] [11]

1.2.4 Pracovní bod

Pracovní bod je definován jako bod, který leží na VA charakteristice fotovoltaického článku. Tento bod nám udává aktuální stav toho, v jakém bodě fotovoltaický článek právě pracuje. Polohu pracovního bodu sdělují vlastnosti spotřebiče a měla by se shodovat s pozicí bodu maximálního výkonu M_{pp} . Pakliže je PB shodný s bodem U_{oc} a I_{sc} , je výkon, který dodává článek, roven nule. Vliv teploty na pracovní bod není rozhodně zanedbatelný z důvodu promítnutí vlivu do jeho výsledné polohy. Kupříkladu při velmi vysoké intenzitě dopadajícího záření může teplota okolního vzduchu vyšplhat až k 40 °C, když k tomu připočteme bezvětří, které omezuje přírodní chlazení, dojde ke zvýšení teploty článku až k hodnotám kolem 80 °C. Tento vliv se projeví zhoršením elektrických vlastností článku, což vede ke snížení svorkového napětí. Tohle má za následek zmenšení velikosti výkonu, který je dodáván do zátěže, a následně dojde ke zvětšení ztrát. Ty se pak mohou vyšplhat až na 75 % z dosažitelné denní výroby energie daného článku. Kompenzace tohoto jevu je řešena pomocí optimalizačních členů, které pracují na principu řízení optimálního odporu zátěže anebo popřípadě použití DC/DC měniče. [9] [11]

1.2.5 Bod maximálního výkonu

Tento údaj informuje o maximálním výkonu fotovoltaického článku, který je schopen dodat. Jeho vyobrazení je pomocí napěťové a proudové souřadnice VA charakteristiky, což je zhruba uprostřed ohybu a je označen indexem m . [9] [11]

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} [\Omega] \quad (1.2)$$

Kde:

U_m – napětí, při kterém FVČ maximální výkon (P_m) [V]

I_m – proud, při kterém FVČ maximální výkon (P_m) [A]

R_m – vnitřní odpor FVČ, při kterém FVČ dodává maximální výkon (P_m) [Ω]

P_m – maximální výkon [W]

1.2.6 Proud I450

Jedná se o proud protékající FVČ při napětí 450 mV. Zjištění tohoto proudu se provádí pouze kvůli tomu, že můžeme pak mnohem lépe určit polohu M_{pp} . [9] [11]

1.2.7 Fill Factor

Fill factor udává poměr mezi maximálním výkonem P_m a výkonem daným napětím naprázdno U_{oc} a proudem nakrátko I_{sc} . Velikostně je závislý na morfologii materiálu, odporu aktivní polovodičové vrstvy a na kvalitě kontaktů. Tento parametr bývá často označován jako činitel naplnění. V ideálním případě by hodnota dosahovala jedné, bohužel v praxi dosahujeme nižších hodnot a k této ideální se pouze přibližujeme. Podle jeho velikosti je možné usoudit, jak kvalitní je příslušný článek. Čím větší bude jeho hodnota, tím větší je výkon, který je schopen do zátěže dodat. [9] [11]

$$FF = \frac{U_m * I_m}{U_{oc} * I_{sc}} [-] \quad (1.3)$$

Kde:

U_m – napětí, při kterém FVČ maximální výkon [V]

I_m – proud, při kterém FVČ maximální výkon [A]

U_{oc} – napětí naprázdno [V]

I_{sc} – proud nakrátko [A]

1.2.8 Účinnost FVP

Účinnost fotovoltaického panelu udává, s jakou efektivitou dojde k přeměně slunečního záření na elektrickou energii. Dále je dána vlastnostmi materiálů, ze kterých je článek vyroben. Použitý materiál má velice podstatný vliv na spektrální citlivost na dopadající záření, což znamená, že pomocí materiálu lze definovat, jaká vlnová délka bude v článku využívána s největší účinností. [9] [11]

$$\eta = \frac{P_m}{P_{rad}} = \frac{P_m}{E \cdot A_C} [\%] \quad (1.4)$$

Kde:

P_m – maximální výkon, který může FVČ dodávat [W]

P_{rad} – výkon dopadajícího záření [W]

E – intenzita osvětlení, při standardizovaných zkušebních podmínkách [W/m^2]

A_C – celková plocha FVČ [m^2]

1.2.9 Sériový odpor

Jedná se o odpor, který je k nalezení v kontaktech a v přívodech. Celkově je to odpor polovodičového materiálu, který tvoří hlavní část fotovoltaického článku. V ideálním případě by se jeho hodnota rovnala nule, bohužel ve skutečnosti je to nemožné. Čím vyšší je hodnota sériového odporu, tím více na něm bude vznikat úbytek napětí, což v důsledku způsobí snižování svorkového napětí právě o velikost tohoto úbytku. [9] [11]

$$R_{SO} = \frac{\Delta U_{SO}}{\Delta I_{SO}} [\Omega] \quad (1.5)$$

Kde:

ΔU_{SO} – rozdíl dvou naměřených hodnot napětí, které jsou co nejvzdáleněji od sebe v lineární oblasti VA charakteristiky a to za ohybem [V]

ΔI_{SO} – rozdíl dvou naměřených hodnot proudu, které jsou co nejvzdáleněji od sebe v lineární oblasti VA charakteristiky a to za ohybem [A]

1.2.10 Paralelní odpor

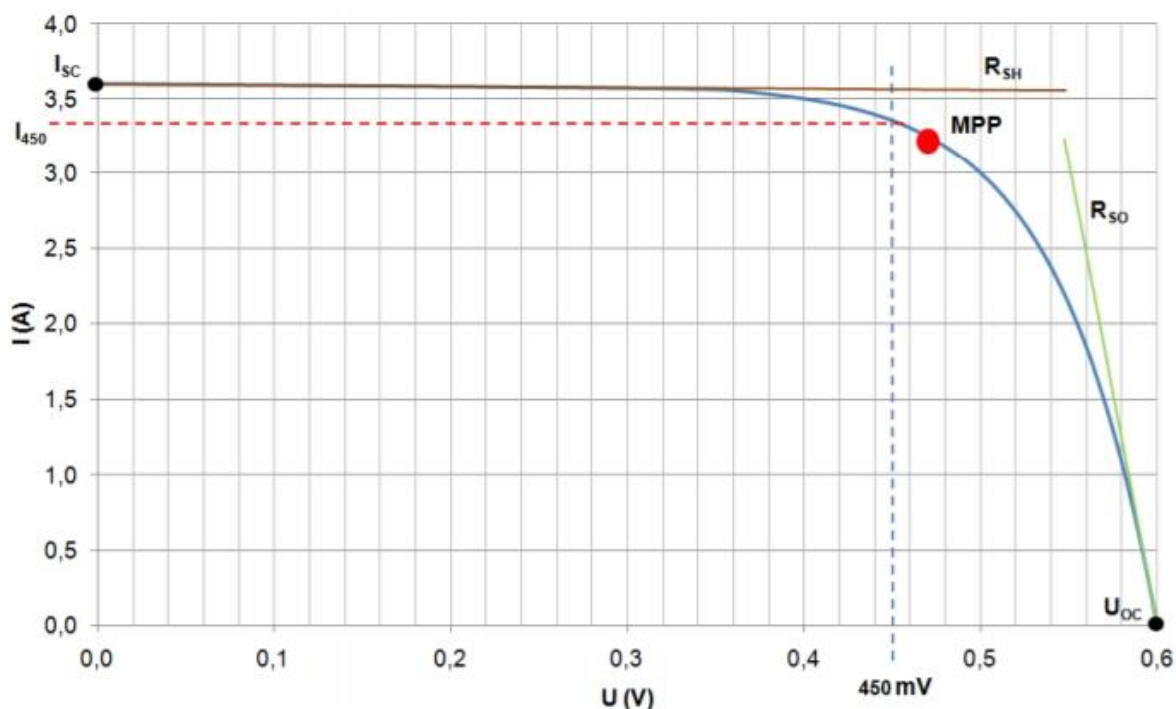
Paralelní či svodový odpor dosahuje v ideálním případě hodnotu blížíci se nekonečnu, ale ve skutečnosti se není možné k takovým hodnotám dostat. Naopak vykazuje-li článek výrazně nízké hodnoty paralelního odporu, může se jednat o vadný fotovoltaický článek. Tyto nízké hodnoty mohou signalizovat defekty na krystalové mřížce nebo svodový proud na okrajích článku. Chování fotovoltaického článku se projeví jako vnitřní zkrat. Z grafického vyobrazení na VA charakteristice lze tento vliv poznat tak, že dojde k mírnému sklonu v oblasti před ohybem. [9] [11]

$$R_{SH} = \frac{\Delta U_{SH}}{\Delta I_{SH}} [\Omega] \quad (1.6)$$

Kde:

ΔU_{SH} – rozdíl dvou naměřených hodnot napětí, které jsou co nejvzdáleněji od sebe v lineární oblasti VA charakteristiky a to před ohybem [V]

ΔI_{SH} – rozdíl dvou naměřených hodnot proudu, které jsou co nejvzdáleněji od sebe v lineární oblasti VA charakteristiky a to před ohybem [A]



Obr. 1.1: Voltampérová charakteristika fotovoltaického panelu s vyznačením odporu R_{SH} a R_{SO} [11]

2 Analýza chování FV panelu

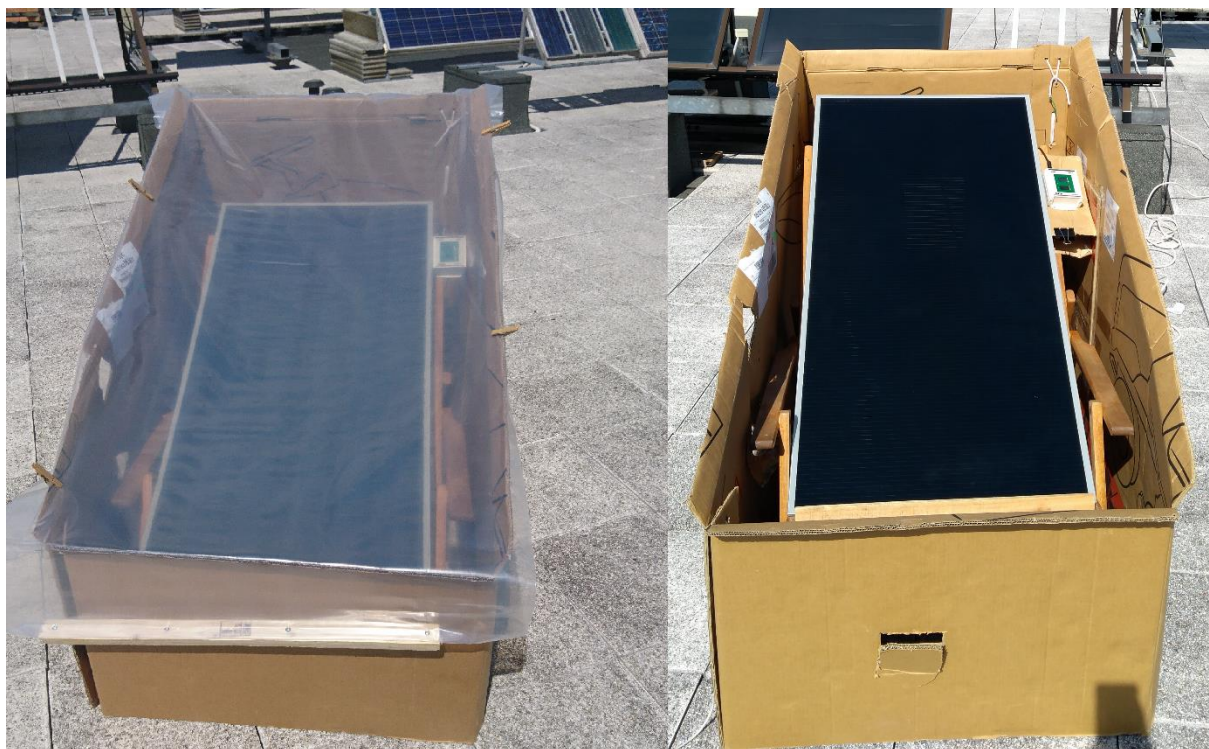
2.1 Popis místa měření

Všechna měření byla uskutečněna na akademické půdě v objektu fakult ZČU. Vybrané místo pro měření se nacházelo v osmém poschodí Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni.

Pro měření jsem využil volné plochy střechy, na které jsem při měření pokaždé umístil vlastnoručně vyrobenou konstrukci. Tu jsem navrhl a posléze i vyrobil. Konstrukce je složena ze dvou hlavních částí. První část je staré dřevěné lehátko, které bylo zvoleno pro možnost regulace sklonu fotovoltaického panelu za účelem docílení co nejlepší účinnosti ohřevu. Lehátko muselo být upraveno kvůli velikosti panelu. Druhou částí konstrukce je kartonový zátaras, který obklopuje dřevěné lehátko a brání změnám teploty panelu proti větru. Také slouží k udržování konstantní teploty uvnitř panelu, která je dále regulována dvěma elektrickými větráky. Na kartonový zátaras byla použita krabice od zahradního traktůrku značky Mountfield. Doplňující část měřicí je průhledný igelitový kryt, který je možné umístit na svrchní část konstrukce, a tím měřicí panel uvnitř odizolovat od nepříznivých vlivů počasí. Pro měření jsem dále použil plastový podstavec, který se nacházel ve vnitřních prostorách budovy, a probíhalo na něm měření chlazení fotovoltaického panelu.



Obr. 2.1: Měřicí konstrukce pro měření fotovoltaického panelu



Obr. 2.2: Měřicí konstrukce pro měření fotovoltaického panelu s a bez horního krytu konstrukce



Obr. 2.3: Měření chlazení fotovoltaického panelu uvnitř budovy

2.2 Měření

Pro měření charakteristik jsem používal tři hlavní měřicí přístroje. Ke snímání povrchové teploty panelu jsem použil pyrometru RaytekRaynger ST (číslo označení: 104175). Dalším měřicím zařízením byl přístroj k ověřování teploty prostředí. Jedná se o anemometr od výrobce Kane-May KM4003 (číslo označení: 10436). Anemometr je možné použít jak k měření rychlosti proudění vzduchu, tak i k měření teploty. Používal jsem ho jako snímač teploty prostředí. Hlavním měřicím přístrojem byl analyzátor I-V400 od firmy HT Instruments (číslo označení: 501843). S tímto přístrojem jsem zjišťoval veškeré hodnoty pro konkrétní měření.

Pyrometr značky RaytekRaynger ST je bezdotykový měřicí přístroj pro snímání povrchové teploty různých druhů těles. Jeho výhoda spočívá v měření na určitou vzdálenost, a to pouhým zaměřením na objekt, aniž bychom se měřeného objektu dotýkali. Při měření musíme dbát na správnou vzdálenost a na vhodně zvolený bod měření. Přesnost přístroje je stanovena $\pm 1\%$ z hodnoty nebo $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, podle toho, co je větší, dále $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ při teplotě $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ při teplotě $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ při teplotě $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Spektrální citlivost je určena jmenovitou hodnotou $7 - 18\text{ }\mu\text{m}$ (termočlankový detektor). Citlivost tohoto přístroje je $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a dokáže měřit v rozmezí teplot $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Emisivita přístroje je přednastavena výrobcem, a to na hodnotu $0,95$, a můžeme s ním pracovat v rozsahu okolních teplot $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 2.4: Přístroj pro měření teploty bezdotykově RaytekRaynger ST [18]

Dalším měřicím přístrojem je teplotní anemometr od výrobce Kane-May KM4003. Jak jsem zmínil výše, zařízení lze použít jak pro měření rychlosti proudění vzduchu, tak i pro měření odečtu teploty. Pro měření proudění vzduchu přístroj zobrazuje jednotky v metrech za sekundu, jež jsou cejchovány výrobcem. Měření hodnot teploty vzduchu je udáváno na přístroji ve stupních Celsia. Přesnost přístroje pro měření proudění vzduchu je stanovena v souvislosti s velikostí rychlosti proudění na $\pm 5 \% \pm 0,1$ (od 1 do 30 m/s) a $\pm 5 \% \pm 0,1$ (od 0 do 1 m/s). V případě měření teploty je výrobcem stanovena na $\pm 0,7 \% \pm 1^\circ$ (teplota $> -10^\circ\text{C}$). Přístroj lze použít pro měření teplot 0°C až 40°C a jeho citlivost je definována $0,1^\circ\text{C}$ pro teploty a $0,1$ m/s pro rychlost proudění.

Voltampérové charakteristiky jsem měřil pomocí analyzátoru HT I-V400, který dále umožňuje zobrazování naměřených hodnot a průběhů charakteristik na displeji přístroje. Ten rovněž disponuje možností proměření proudových, napěťových a výkonových parametrů panelu. Do zařízení je možné připojit externí moduly, jako například modul na zaznamenávání teploty povrchu a modul na zaznamenávání intenzity dopadajícího záření. Naměřená data se ukládají do interní paměti přístroje, které lze posléze načíst do počítače pomocí USB kabelu a jednoduchého softwaru (Topview). Analyzátor HT I-V400 je možné použít pro měření samostatných panelů anebo pro měření sériově zapojených panelů. Podmínka pro měření je v podobě napěťového a proudového rozsahu, který nesmí být překročen. Napěťové rozpětí je v rozsahu hodnot $0,5 - 1000$ V a proudový rozsah v intervalu $0,1 - 10$ A. Po překročení těchto udaných rozsahů může dojít k destrukci přístroje.



Obr. 2.5: Přístroj pro měření voltampérových charakteristik analyzátor HT I-V400 [15]

Postup zapojení měřicích přístrojů není složitý, proto ho uvedu jen stručně. K měřicímu analyzátoru byl připojován panel pomocí čtyř vodičů s odlišnými barvami. Vodiče byly rozděleny na dva páry a každý byl připojen do zdířek analyzátoru. Ty nesou označení písmeny C a P. Pro měření napěťových hodnot zapojíme pár do zdířek označené písmenem P. Naopak pro měření proudových hodnot pak připojíme pár do zdířek, které nesou označení písmenem C. Krom zdířek s označením písmeny C a P obsahuje analyzátor ještě další dvě. Ty nesou označení AUX a IRR. Do těchto zdířek byl zapojen jak snímač dopadající intenzity slunečního záření, tak snímač teploty. Snímač teploty byl jedním koncem zapojen do AUX a druhý konec byl nalepen pomocí oboustranně lepicí pásky na zadní stranu panelu. Při lepení snímače jsem dbal na to, aby byl jednak uchycen pevně, jednak aby byl umístěn ve středu zadní části panelu. Snímač dopadající intenzity byl pro správné měření umístěn těsně vedle proměřovaného panelu a také ve stejném sklonu, ve kterém se nacházel měřený panel.



Obr. 2.6: Detail na správně umístěný snímač dopadající intenzity slunečního záření

Samotné měření probíhalo následovně. V prvním kroku jsem připravil opěrnou konstrukci a kolem ní rozložil protivětrný zátaras. Dále připravil vodiče k měřicímu analyzátoru a také zapojil ventilátory do sítě. Po dokončení příprav kolem konstrukce jsem se snažil v co nejkratším intervalu přenést měřený panel z vnitřní části budovy, jež zajistila ustálenou počáteční teplotu fotovoltaického panelu do již předem připravené konstrukce. Po umístění a upevnění jsem připojil analyzátor k panelu a také snímač teploty pomocí oboustranné izolační

pásky Pro měření se zákrytem shora jsem celou konstrukci přikryl průhlednou plastovou folií. Při každém měření jsem kladl důraz na rychlost a efektivitu. Snažil jsem se vyvarovat všem možným negativním faktorům, které by se mohly projevit ve výsledcích a celé měření tak ovlivnit. To by se mohlo projevit třeba při pomalém přenášení nebo zapojování, což by vedlo k pozvolnému ohřevu měřeného panelu.

Po důkladné přípravě a zapojení jsem byl s to získávat data z přístrojů. Odečet dat z měřicích přístrojů probíhal v rozestupu jedné minuty. Při každém odečtu jsem si poznamenal teplotu z pyrometru a z analyzátoru I-V 400 jsem po uložení dat do vnitřní paměti přístroje zaznamenal do předem připravené tabulky hodnoty intenzity. Při odečtech jsem musel dávat pozor na několik věcí. V první řadě šlo o odečet po stejném čase. Dále jsem při snímání teploty pyrometrem dbal na to, aby nedocházelo ke zkreslení hodnot. Bylo nutné dodržovat stejné vzdálenosti a také stejného bodu pro snímání teploty. Takto jsem pokračoval až do bodu, kdy teplota na měřeném panelu dosáhla maxima, tohoto jsem docílil tak, že se při měření několikrát po sobě teplota opakovala a dále nerostla. Můžeme tedy tvrdit, že došlo k ustálení teploty při působení daných klimatických podmínek. Dosažení maxima teploty znamenal důvod, k ukončení daného měření pro ohřev a zahájit měření pro chladnutí.

Po ukončení venkovního měření pro ohřev jsem se snažil co nejrychleji přenést měřený panel do vnitřních prostor budovy, kde jsem měl předem připravenou plastovou konstrukci, na kterou jsem panel umístil, a zahájil měření pro chladnutí. Měření probíhalo velice podobně jako pro ohřev. K měřenému panelu jsem připojil analyzátor I-V 400, přesněji jeho modul pro snímání teploty. Toto zapojení sloužilo pouze pro záznam teploty, jelikož ve vnitřních prostorech budovy nebyla žádná dopadající intenzita na plochu měřeného panelu, a tak nebylo možné proměřovat VA charakteristiky. Druhým snímačem teploty byl pyrometr a jako v případě měření ohřevu jsem odečítal čas v minutovém intervalu a zapisoval hodnoty do připravené tabulky.

Všechna měření probíhala na jednom fotovoltaickém panelu. Konkrétně se jednalo o panel Calyxo CX60. Měření jsem se snažil dělat za různých podmínek a také při různých ročních obdobích. I přes pomoc různých vymožeností proti nepříznivým vlivům počasí došlo několikrát k předčasnému ukončení měření. Jednou z nepříjemností, se kterou jsem potýkal, a to nejen v letních měsících, bylo udržování konstantní teploty uvnitř měřicí konstrukce.

Ze všech měření, které jsem provedl, jsem pro všechny získané hodnoty určoval koeficient přírůstku teploty při ohřevu fotovoltaického panelu. Dále jsem zkoumal průběhy naměřených hodnot na různých závislostech z důvodu snahy o získání informací o chování panelu.

2.3 Určení teplotního koeficientu

Tento koeficient jsem získával tak, že jsem sledoval průběh teplotní závislosti ohřívajícího se panelu. Postupoval jsem tak, že jsem odečetl minimální a maximální dosažené teploty za čas proběhlého měření a aplikoval ho do vzorce, který se nachází níže. Pro ochlazování panelu jsem zvolil stejný postup.

$$K_{tep} = \frac{t_{max} - t_{min}}{t_{tmax} - t_{tmin}} \text{ [}^\circ\text{C/min]} \quad (2.1)$$

Kde:

K_{tep} – koeficient pro teplotní přírůstek / úbytek [$^\circ\text{C/min}$]

t_{max} – maximální dosažená teplota panelu [$^\circ\text{C}$]

t_{min} – minimální teplota na panelu [$^\circ\text{C}$]

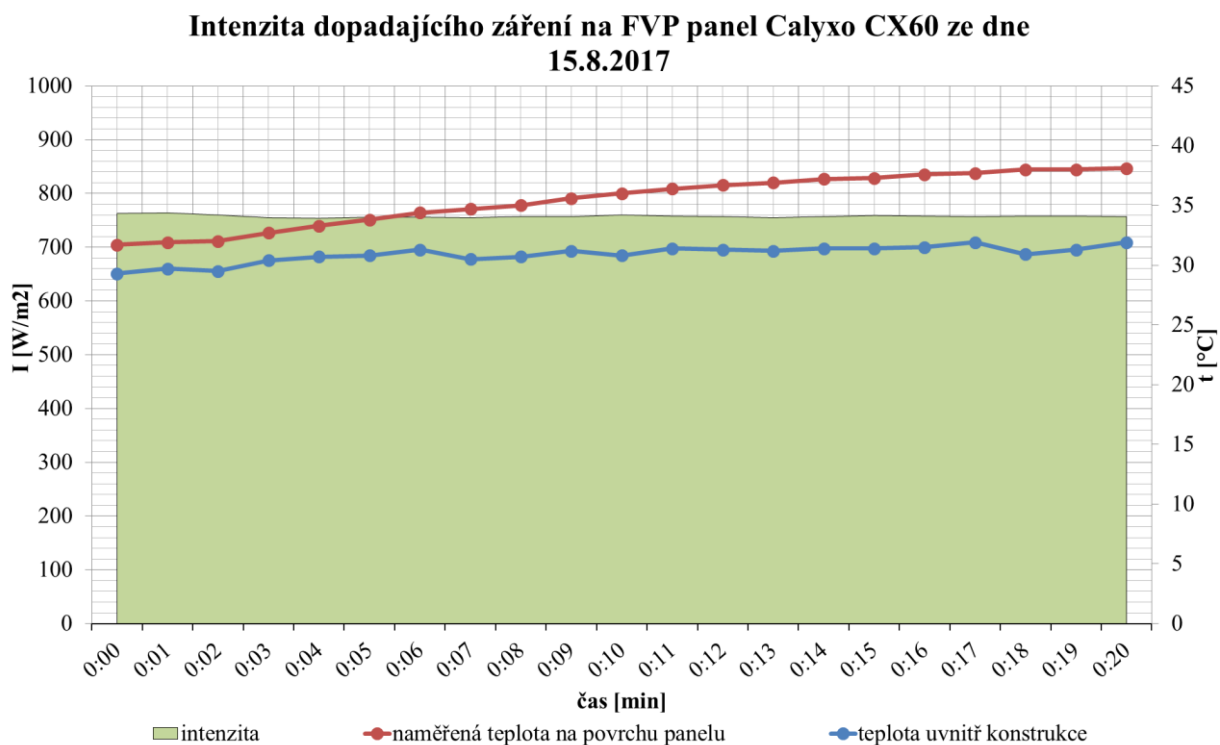
t_{tmax} – časový interval, za který se panel ohřál na maximální teplotu (t_{max}) [min]

t_{tmin} – časový údaj na začátku měření ohřevu panelu [min]

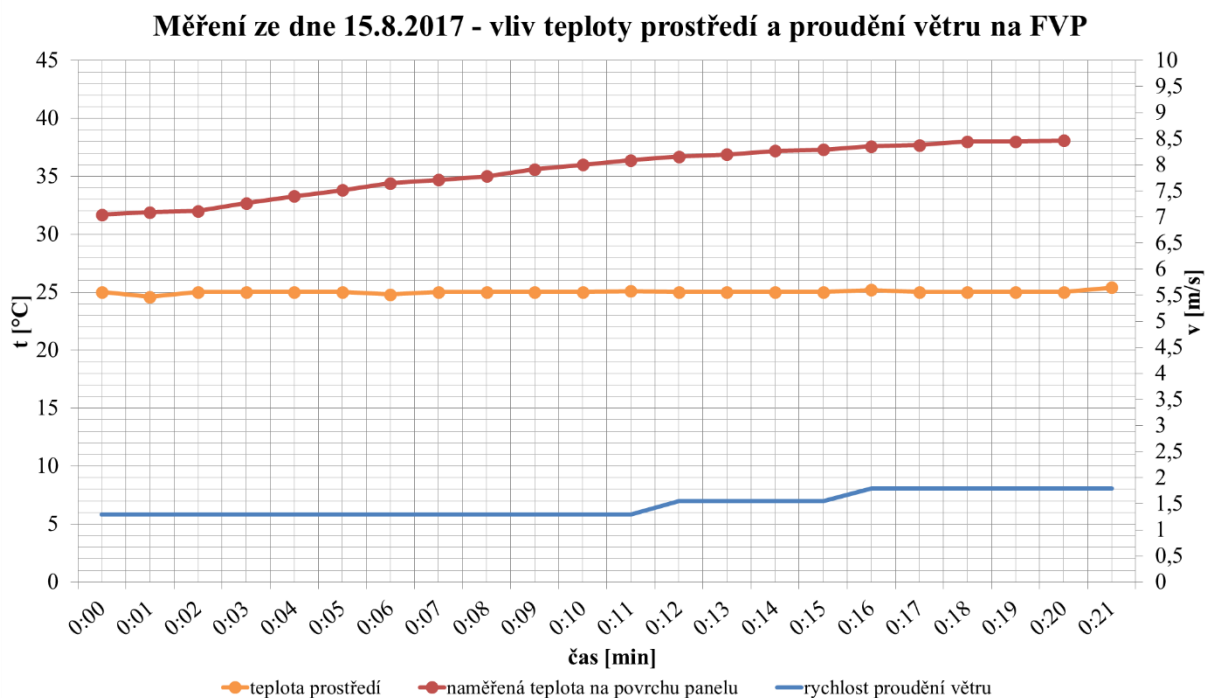
Použitím tohoto vztahu na všechna měření, které jsem provedl, a to za působení různých intenzit dopadajícího slunečního záření, jsem získal koeficienty, které jsem shrnul do tabulek. Takto bych měl dosáhnout přehledu o závislosti úměrně vzrůstajícího koeficientu s rostoucí intenzitou dopadajícího slunečního záření. Předpokládám, že s narůstající intenzitou záření bude docházet k rychlejšímu ohřevu panelu za určitou dobu, samozřejmě v rámci mezí, které limitují působící provozní podmínky.

V dalším kroku jsem takto získané hodnoty znázornil do grafů, ze kterých jsem následně zjistil výsledné průběhy závislostí koeficientů. Vzhledem k tomu, že měření probíhalo za různých provozních podmínek, přesněji ne vždy probíhalo za stejných provozních podmínek, bylo zapotřebí každé důkladně prozkoumat a zaměřit se na působící vlivy prostředí. Různé provozní podmínky znamenaly to, že docházelo k působení nízké nebo vysoké teploty prostředí a také působení vlivu proudícího větru oproti ostatním měřením. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí vytvořit vícero grafických závislostí pro porovnání působících činitelů. Jako zdroj čerpání pro určení a porovnávání vlivů jsem použil data získaná z meteorostanice a z naměřených hodnot intenzit dopadajícího slunečního záření na plochu fotovoltaického panelu. Kvůli velice rozdílným výsledkům, které mohly být ovlivněné působením provozních podmínek nebo četnými ovlivňujícími faktory, jsem provedl korekci hodnot koeficientu. Ideálním příkladem pro použití korekce je například silné působení větru nebo ještě hůře proměnlivá intenzita slunečního záření. Tato oprava dat posloužila k vyloučení odlišných a různě zavádějících hodnot z naměřených charakteristik. Do upravených hodnot jsem dále vložil polynom, který je založen na matematické metodě nejmenších čtverců. Díky tomu jsem byl nadále schopen dopočítat hodnoty koeficientů pro interval působící intenzity slunečního záření od 0 až do 1000 W/m².

Níže uvádím měření teplotní závislosti fotovoltaického panelu při ideálním působení podmínek. Z grafické závislosti je možné vidět téměř nekolísající hodnoty intenzity slunečního záření, teploty prostředí, teploty uvnitř v konstrukci a působení větru po dobu celého měření ohřevu. Konkrétně se jedná o měření ze dne 15. 8. 2017 probíhající od 11:54 do 12:15 při průměrné intenzitě $I = 758 \text{ W/m}^2$.

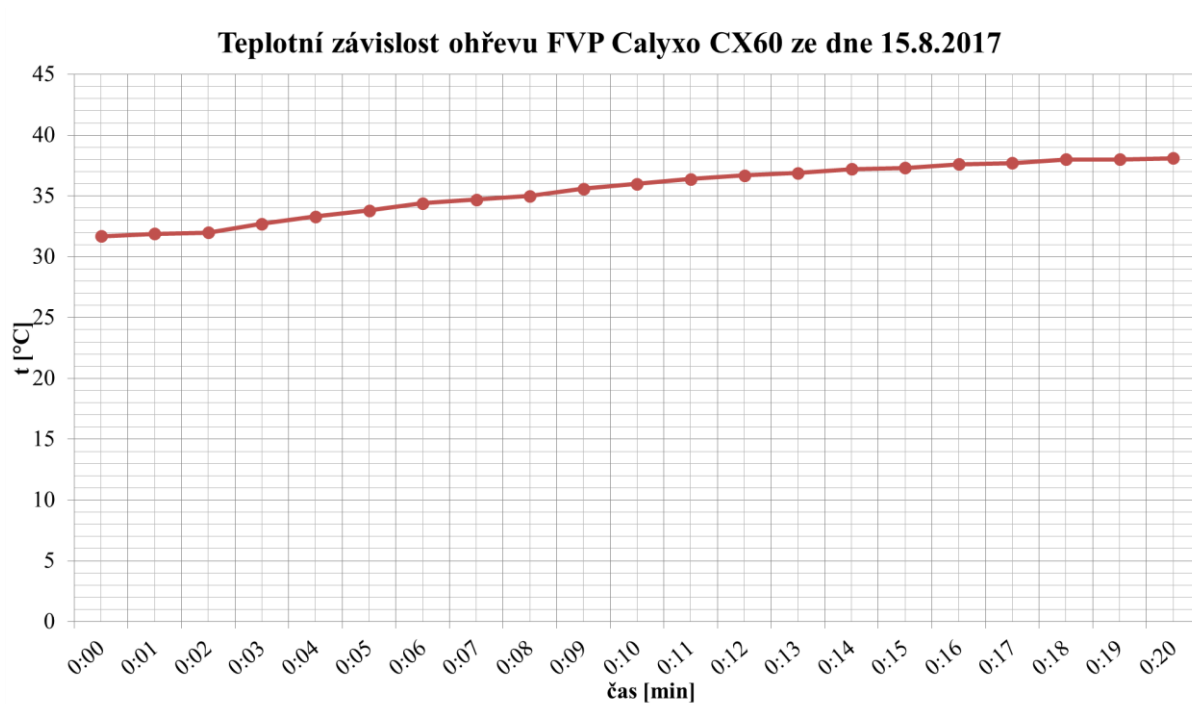


Graf č. 2.1: Měření teplotní charakteristiky ohřevu fotovoltaického panelu Calyxo CX60 za ideální působení intenzity slunečního záření

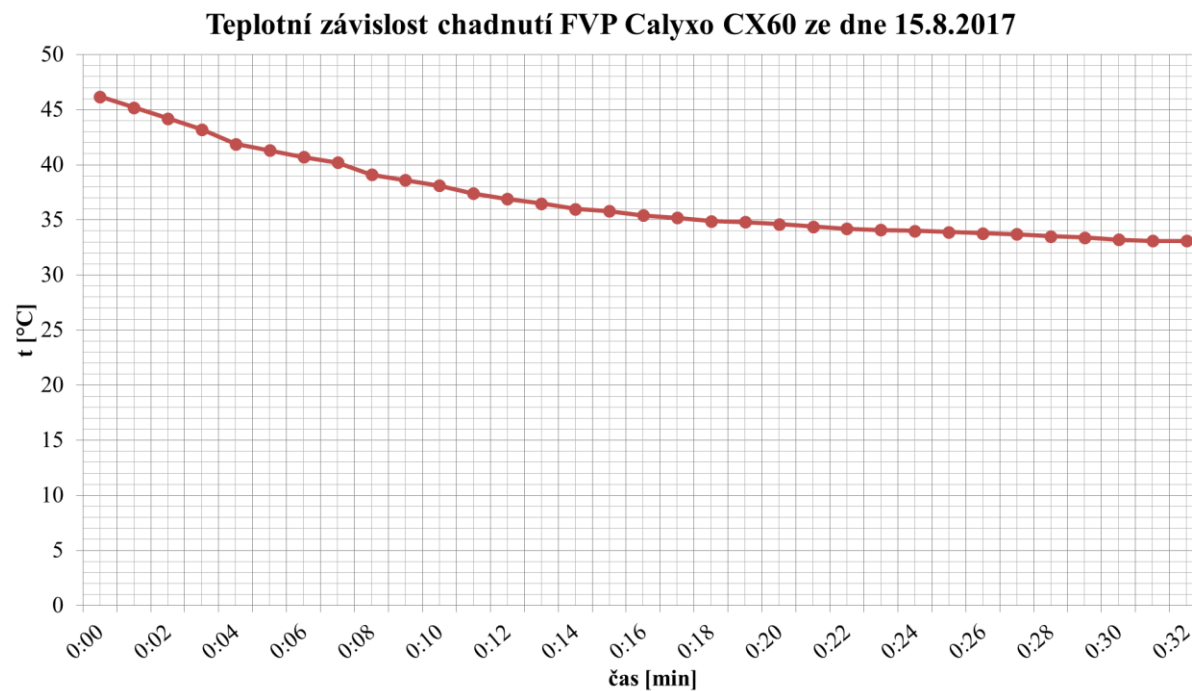


Graf č. 2.2: Měření teplotní charakteristiky ohřevu fotovoltaického panelu Calyxo CX60 za ideální působení teploty prostředí a větru

Na následujících grafických charakteristikách jsou vyobrazeny závislosti teploty a času, jednak pro ohřev, jednak pro chladnutí panelu. Vyobrazená teplotní závislost ohřevu a chladnutí je ze dne 15. 8. 2017 probíhající od 11:54 do 12:15.



Graf č. 2.3: Měření teplotní závislosti ohřevu fotovoltaického panelu Calyxo CX60



Graf č. 2.4: Měření teplotní chladnutí fotovoltaického panelu Calyxo CX60

2.3.1 Praktické měření na panelu Calyxo CX60

Jak jsem se už dříve zmínil, pro veškerá měření byl použit fotovoltaický panel německé značky Calyxo série CX60. Tento fotovoltaický panel používá technologii CdTe. Jedná se o celoskleněný panel. Celkově bylo provedeno 39 měření, z toho 26 bylo měření bez horního krytu konstrukce a 13 s horním krytem konstrukce. Z celkového počtu 39 měření musela být tři měření vyselektována už po dokončení, a to z důvodu technických problémů nebo nepříznivých vlivů prostředí. V tabulkách níže jsou uvedeny veškeré naměřené hodnoty po této první selekci.

Tabulky jsou dále rozděleny na dva druhy měření, a to na měření bez horního krytu konstrukce a s horním krytem konstrukce. Veškeré výsledky budou tedy rozděleny do dvou oddělených kapitol a na závěr zhodnoceny.

Tabulka č. 2.1: Podmínky pro měření FVP bez horního krytu konstrukce

číslo měření	I [W/m ²]	teplota prostředí [°C]	windchill [°C]	rychlost větru [m/s]	tlak [hPa]
1	84	0,25	-2,5	2,2	1014
2	187	10,7	9,9	2,0	1022,3
3	271	17,1	17,0	2,6	1011,7
4	330	17,1	13,1	4,2	1011,5
5	420	8,4	7,28	2,1	1023,5
6	578	23,3	23,3	1,5	1015,8
7	619	25,8	25,8	1,2	1014,5
8	628	20,8	20,5	3,1	1017,1
9	654	15,5	15,5	1,7	1027,4
10	660	27,6	27,6	1,4	1010,8
11	663	21,0	20,3	3,7	1010,1
12	690	21,2	21,2	0,8	1016,4
13	714	19,6	19,4	3,2	1018,7
14	716	22,0	22,0	0,2	1012,2
15	720	21,5	21,2	3,4	1018,5
16	722	9,4	11,2	2,4	1021,6
17	725	21,2	21,2	1,4	1018,9
18	732	20,2	20,2	2,1	1017,6
19	753	25,9	25,9	1,1	1011,6
20	758	25,0	25,0	1,3	1017,1
21	759	22,1	22,1	2,0	1018,4
22	760	27,1	27,1	1,5	1016,8
23	766	29,6	29,6	1,2	1010,1
24	785	24,7	24,7	1,4	1015,2

Tabulka č. 2.2: Podmínky pro měření FVP s horním krytem konstrukce

číslo měření	I [W/m ²]	teplota prostředí [°C]	windchill [°C]	rychlost větru [m/s]	tlak [hPa]
1	276	21,9	21,9	1,3	1020,4
2	358	25,2	25,1	3,1	1008,9
3	472	19,1	19,0	2,6	1017,9
4	545	18,7	18,1	3,9	1018,7
5	556	18,1	18,1	1,8	1018,3
6	556	20,8	17,2	1,5	1020,5
7	564	19,4	19,0	3,7	1018,7
8	598	18,9	17,5	4,9	1010,9
9	599	20,3	20,3	1,8	1019,6
10	601	22,7	21,7	4,5	1009,2
11	602	22,8	22,8	1,1	1017,3
12	605	23,3	23,3	2,2	1017,5

2.3.2 Výsledné hodnoty koeficientu ohřevu pro měření bez horního krytu konstrukce

V této podkapitole se chci věnovat koeficientu ohřevu pro měření bez horního krytu konstrukce. Při tomto typu měření je horní kryt konstrukce odebrán, a proto musí být brán větší ohled na rychlost proudění větru.

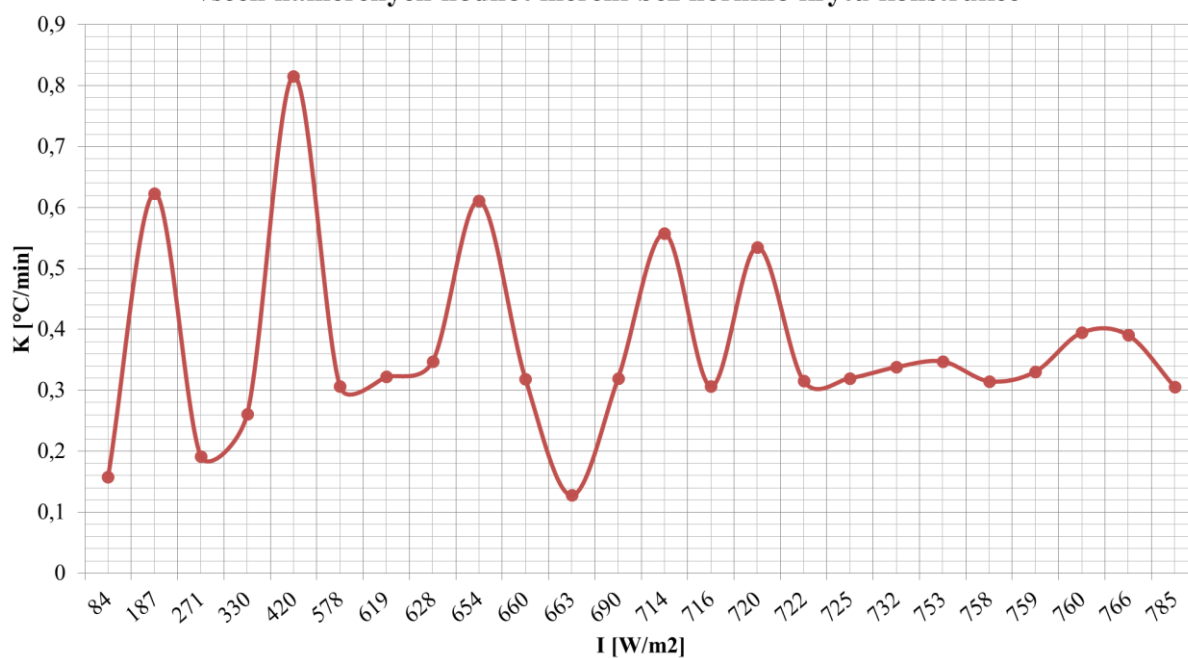
V následující tabulce jsou uvedeny koeficienty ohřevu pro jednotlivá měření, která probíhala při měřicích podmínkách bez horního krytu konstrukce. V tabulce jsou mimo koeficientů uvedeny také průměrné intenzity dopadajícího slunečního záření, maximální a minimální dosažená naměřená teplota na panelu a také doba, při které došlo k ohřevu FVP z počáteční teploty na maximální ustálenou teplotu.

Z tabulky č. 3 můžeme vyčíst nejvyšší naměřenou hodnotu teploty 44,7 °C, která byla dosažena při intenzitě slunečního záření $I = 714 \text{ W/m}^2$ za čas ohřevu 21 minut. Naopak nejnižší naměřená hodnota teploty 21,2 °C odpovídá intenzitě dopadu slunečního záření $I = 420 \text{ W/m}^2$. Veškeré hodnoty budou dále důkladně přezkoumány a vyselektovány na základě konkrétních podmínek měření a nepříznivých vlivů.

Tabulka č. 2.3: Přehled všech vypočtených koeficientu ohřevu ze všech měření bez horního krytu konstrukce

číslo měření	K [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$]	I [W/m^2]	t_{max} [$^{\circ}\text{C}$]	t_{min} [$^{\circ}\text{C}$]	t [min]
1	0,16	84	26,0	23,0	19
2	0,62	187	37,8	21,6	26
3	0,19	271	29,3	24,5	25
4	0,26	330	30,3	25,6	18
5	0,82	420	36,7	21,2	19
6	0,31	578	33,4	28,8	15
7	0,32	619	38,9	33,1	18
8	0,35	628	36,9	30,3	19
9	0,61	654	41,0	30,0	18
10	0,32	660	41,1	34,4	21
11	0,13	663	32,5	30,2	18
12	0,32	690	32,0	28,8	10
13	0,56	714	44,7	33,0	21
14	0,31	716	34,1	29,2	16
15	0,54	720	44,0	33,2	20
16	0,32	722	29,0	24,9	13
17	0,32	725	36,9	30,5	20
18	0,34	732	36,0	28,9	21
19	0,35	753	38,7	32,1	19
20	0,32	758	38,1	32,1	20
21	0,33	759	36,2	31,9	13
22	0,39	760	40,5	33,0	19
23	0,39	766	42,7	34,5	21
24	0,31	785	38,7	33,5	17

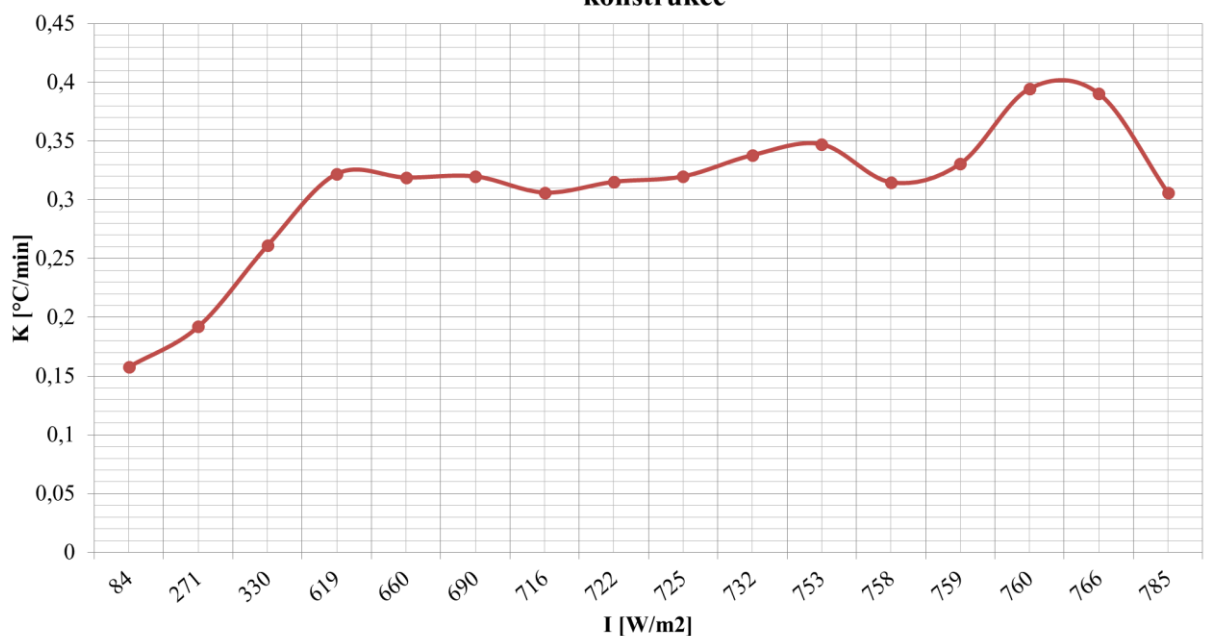
Závislost koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření ze všech naměřených hodnot měření bez horního krytu konstrukce



Graf č. 2.5: Závislost koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření ze všech naměřených hodnot měření bez horního krytu konstrukce

Z grafu č. 2.5 výše je velice zřejmé, že křivka v mnoha bodech klesá a zase stoupá. Z těchto důvodů jsem se zaměřil na detailnější prozkoumání jednotlivých měření a pokusil se eliminovat ta, která by mohla být z mnoha příčin nevhodná. Po přezkoumání jsem eliminoval osm ze 24 měření. Některá byla vyloučena na základě prudké změny provozních podmínek, které nastaly v průběhu měření. Konkrétně se jedná o měření číslo 2, 5, 6 a 8. Další měření (čísla 9, 11, 13, 15) jsem vyloučil kvůli velice rozdílným podmínkám, jednalo se o rychlost proudění větru a nízkou teplotu prostředí. Zbývající hodnoty jsem vynesl do grafu č. 2.6.

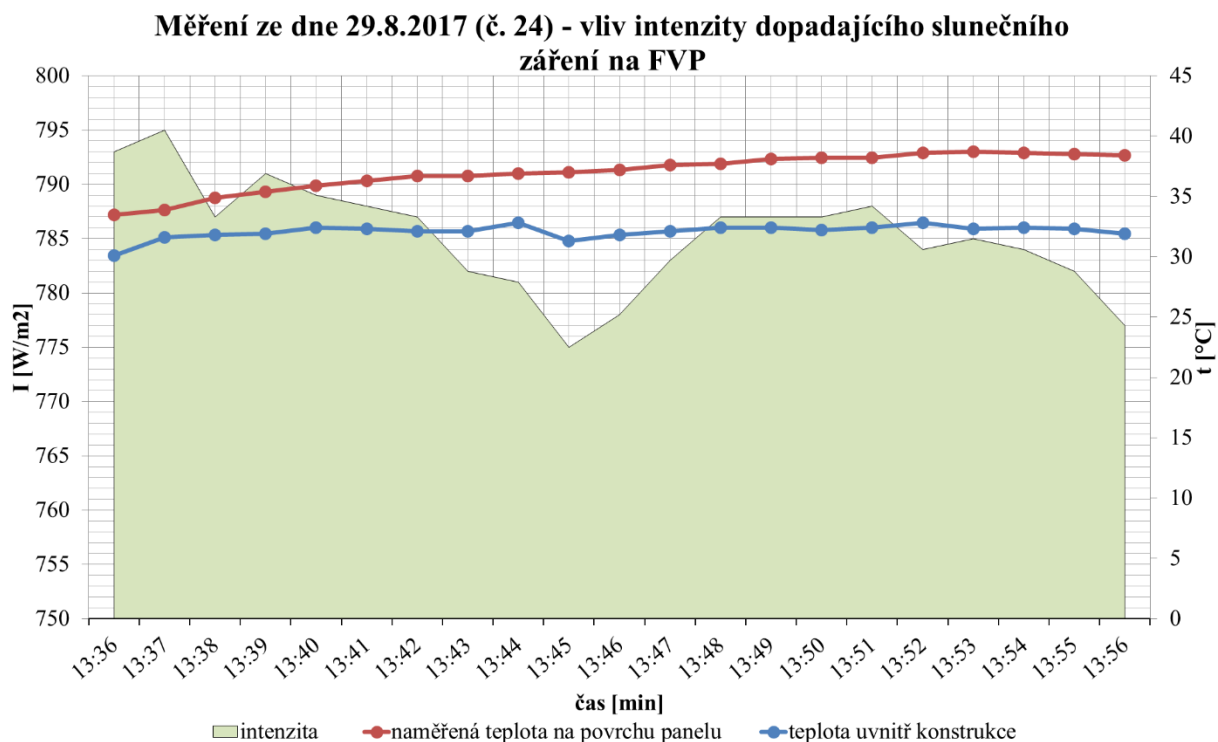
Po separaci (korekci) závislost koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření ze všech naměřených hodnot měření bez horního krytu konstrukce



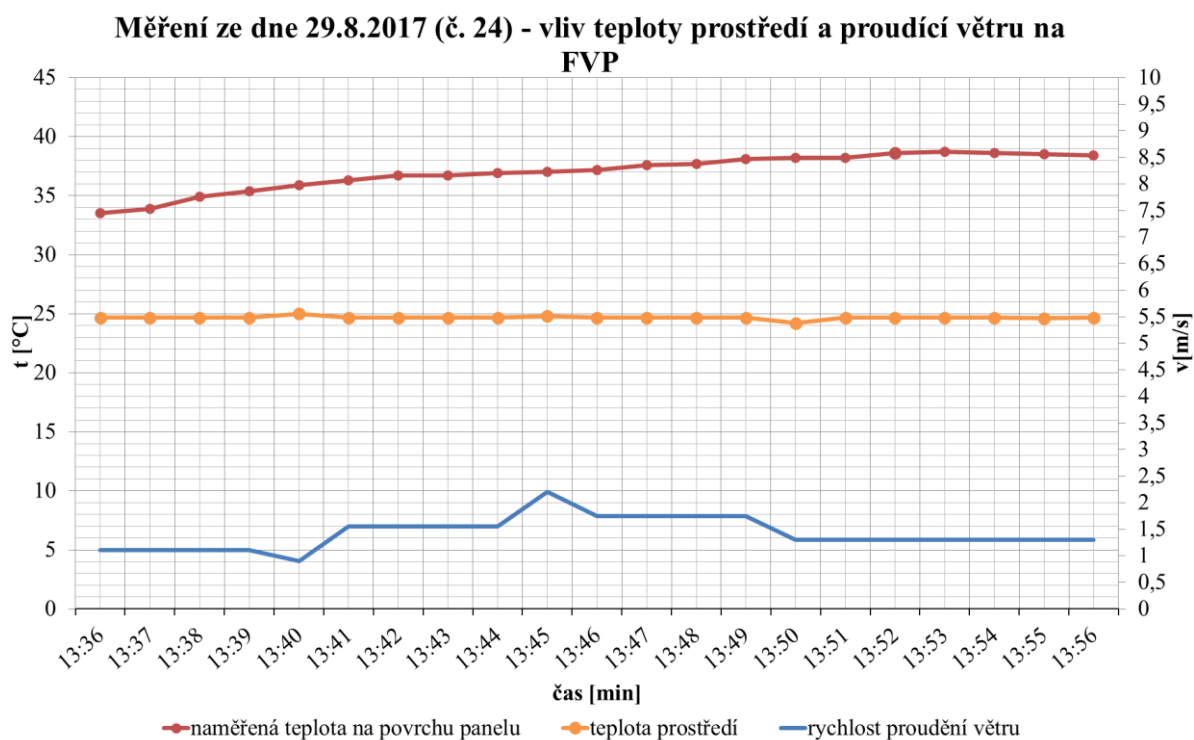
Graf č. 2.6: Po provedené korekci závislost koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření ze všech naměřených hodnot měření bez horního krytu konstrukce

Po provedení korekce stále závislost koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření vykazovala drobné odchylky. I nadále se na křivce nacházely určité body jak poklesu, tak převyšujícího stoupání. Z toho jsem usoudil, že by bylo dobré se zaměřit na tyto vyčnívající body, rozebrat si je a následně provést vyhodnocení. Takto jsem učinil v následujících grafických znázorněních.

Po detailním prozkoumání každého nesouměrně vyčnívajícího bodu jsem se nakonec rozhodl odstranit jen jedno měření, které je uvedeno v tabulce č. 2.3, označeno číslem 24. V grafické závislosti uvedené na následující stránce je možné vidět odstraněné měření.



Graf č. 2.7: Vliv intenzity dopadajícího slunečního záření na FVP – měření ze dne 29. 8. 2017 (č. 24)

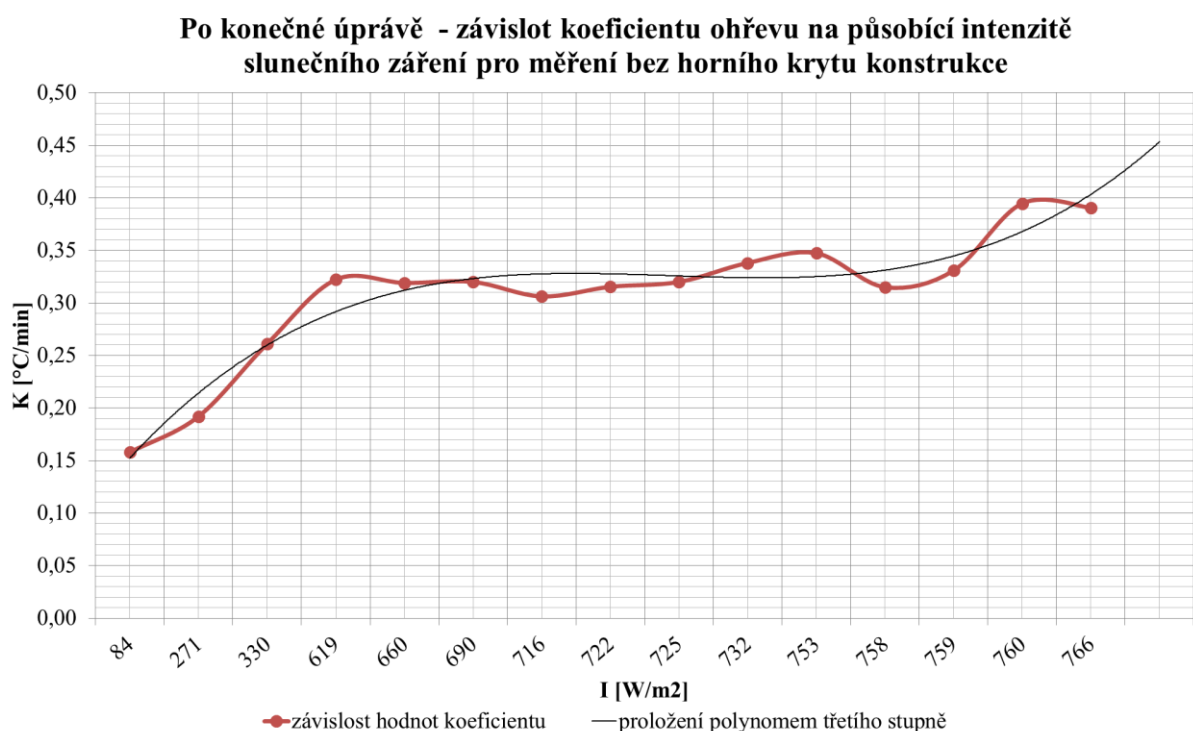


Graf č. 2.8: Vliv teploty a proudění větru na FVP – měření ze dne 29. 8. 2017 (č. 24)

Měření probíhalo 29. 8. 2017 při průměrných hodnotách slunečního záření 785 W/m^2 , teplotě prostředí $24,66 \text{ }^\circ\text{C}$, rychlosti větru $1,4 \text{ m/s}$ a tlaku vzduchu $1015,2 \text{ hPa}$. Z grafických závislostech je patrné, že intenzita dopadu slunečního záření na fotovoltaický panel kolísá jen

velice málo. Teplota prostředí je také konstantní. Rychlost proudění vzduchu je na začátku a na konci měření téměř identické, zato uprostřed měření dochází k výchylce hodnot. Právě proudění vzduchu může mít původ v nelichotivém výsledku toho měření. Vezmeme-li v úvahu také rozpětí teplot na desce fotovoltaického panelu a porovnáme ji s ostatními měřeními s podobnými dosaženými hodnotami dopadu intenzity slunečního záření, je doba a velikost hodnot ohřevu mnohem menší. Vzhledem tedy k ostatním provedeným měřením na konstrukci bez horního krytu a jejich dosažených výsledků, jsem vyhodnotil měření číslo 24 za nevyhovující.

Výslednou grafickou závislost koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření bez horního krytu konstrukce po separaci všech nevyhovujících měření uvádím v následujícím grafu.



Graf č. 2.9: Po konečné korekci závislost koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření ze všech naměřených hodnot měření bez horního krytu konstrukce

Z grafické závislosti koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření bez horního krytu konstrukce vyplývá vzrůstající trend. Vzhledem k většině hodnot dosahující průměrnou intenzitu slunečního záření nad 700 W/m^2 je patrné, že hodnoty přírůstku na teplotě kolísají kolem podobných hodnot, nicméně pořád s tendencí růstu. Všechny grafické závislosti po

měření typu bez horního krytu konstrukce jsem proložil polynomem třetího stupně. Záměrem bylo získat hodnoty koeficientu po krocích 100 W/m^2 a dosadit do pásma od 0 až do 1000 W/m^2 , z důvodu nevhodnější regrese jsem zvolil polynom třetího stupně. Výsledné výpočty uvádím v tabulce 2.4.

Rovnice pro propočet hodnot koeficientu polynomem třetího stupně, ze které jsem následně dopočetl hodnoty koeficientu, se rovná $y=0,000000002*x^3 - 0,000003*x^2 + 0,0015*x$.

Tabulka č. 2.4: Výpočet koeficientu po krocích 100 W/m^2 z rovnice třetího polynomu pro měření bez horního krytu konstrukce

I [W/m^2]	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
K [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$]	0	0,122	0,196	0,234	0,248	0,25	0,252	0,266	0,304	0,378	0,5

2.3.3 Výsledné hodnoty koeficientu chladnutí pro měření bez horního krytu konstrukce

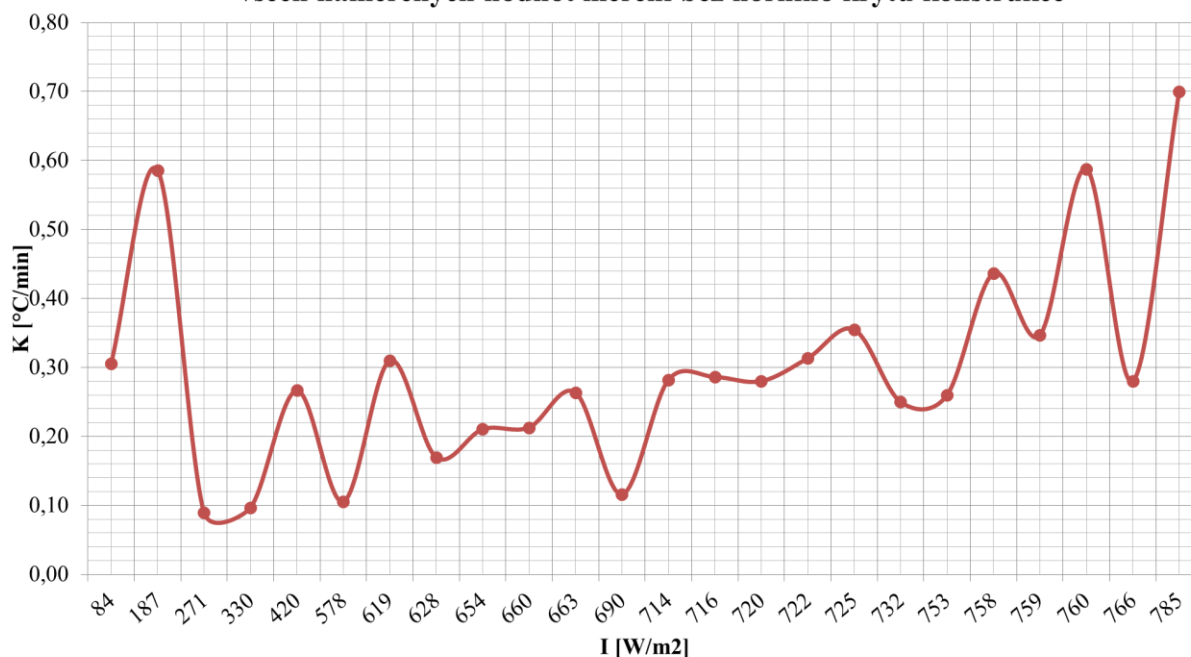
K vyhodnocení koeficientu chladnutí jsem přistupoval stejným způsobem jako u vyhodnocení koeficientu ohřevu. Níže uvádím tabulku s výpočtem koeficientů chladnutí pro všechna měření bez horního krytu konstrukce.

Tabulka č. 2.5: Přehled všech vypočtených koeficientu chladnutí ze všech měření bez horního krytu konstrukce

číslo měření	K [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$]	I [W/m^2]	t_{max} [$^{\circ}\text{C}$]	t_{min} [$^{\circ}\text{C}$]	t [min]
1	0,31	84	31,9	26,4	18
2	0,59	187	35,7	27,5	14
3	0,09	271	29,8	27,1	30
4	0,10	330	31,4	28,6	29
5	0,27	420	35,6	29,2	24
6	0,11	578	37,6	33,7	37
7	0,31	619	40,5	32,3	39
8	0,17	628	37,5	31,9	33
9	0,21	654	41,8	33,8	38
10	0,21	660	42,6	32,8	46
11	0,26	663	37,7	31,9	22
12	0,12	690	36,6	33	31
13	0,28	714	45,6	33,2	44
14	0,29	716	40,4	32,1	29
15	0,28	720	44,1	32,9	40
16	0,31	722	32,6	27,9	15
17	0,36	725	39,9	32,8	20
18	0,25	732	40,4	33,8	22

19	0,26	753	43,7	33	30
20	0,44	758	46,2	33,1	30
21	0,35	759	43,6	32,5	32
22	0,59	760	47,3	32,6	25
23	0,28	766	46,2	32,7	30
24	0,70	785	43,7	32,5	16

Závislost koeficientu chladnutí na působící intenzitě slunečního záření ze všech naměřených hodnot měření bez horního krytu konstrukce



Graf č. 2.10: Závislost koeficientu chladnutí na působící intenzitě slunečního záření ze všech měření bez horního krytu konstrukce

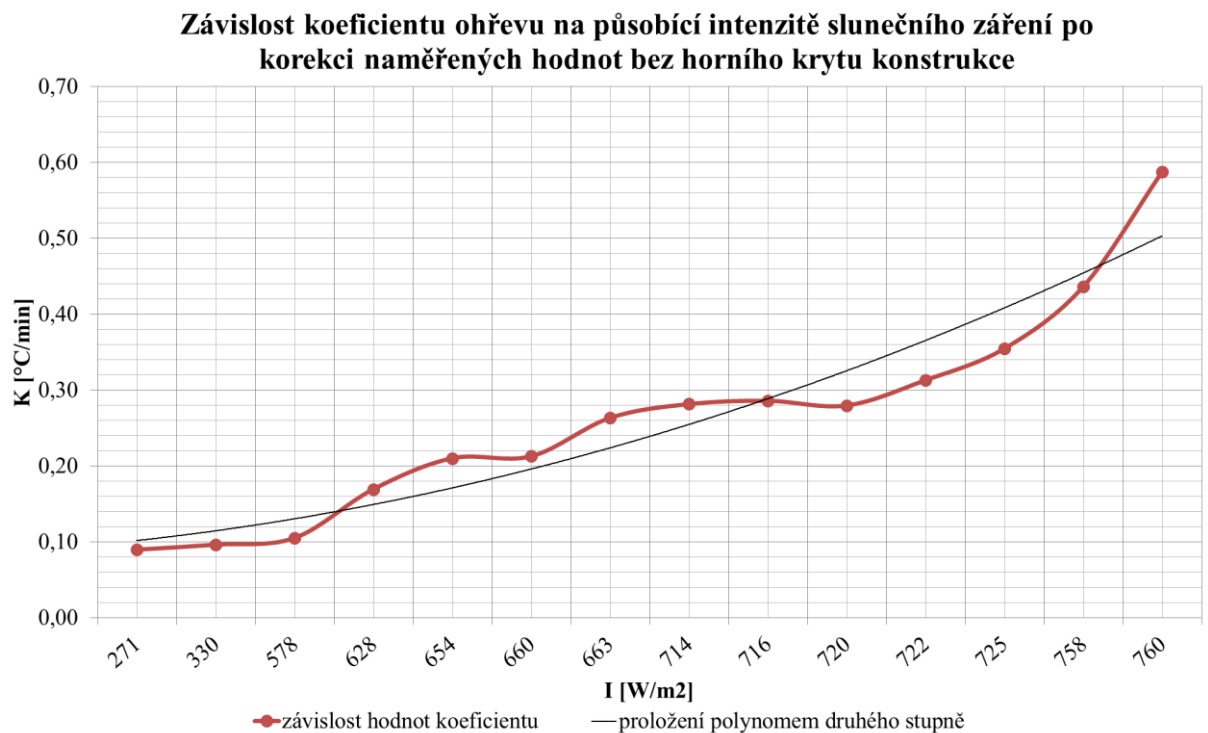
Grafická závislost nám ukazuje závislost koeficientu chladnutí na působící intenzitě slunečního záření pro všechna provedená měření bez horního krytu konstrukce. Stejně tak jako u předchozího typu měření musím provést separaci nežádoucích hodnot. Vzhledem k tomu, že měření chlazení bylo vždy provedeno ve vnitřních prostorách Fakulty elektrotechnické ZČU, nemusím brát v potaz rychlost proudění větru nebo proměnlivost intenzity dopadajícího slunečního záření na plochu fotovoltaického panelu.

Po vhodné korekci jsem vyseparoval celkem 10 hodnot, které nelichotivě vyčnívaly. Zbývající hodnoty jsem vložil do grafické závislosti, kterou uvádím níže. Dále jsem stejně tak jako u měření ohřevu proložil grafickou závislost polynomem druhého stupně a ze získané rovnice jsem dopočetl koeficient chladnutí po krocích 100 W/m^2 a dosadil do pásma od 0 až do 1000 W/m^2 . Výsledné hodnoty koeficientu se nachází v tabulce číslo 2.6.

Proložením polynomem druhého stupně jsem získal rovnici $y=0,000001*x^2 - 0,0003*x$.

Tabulka č. 2.6: Výpočet koeficientu po krocích 100 W/m^2 z rovnice druhého polynomu pro měření bez horního krytu konstrukce

I [W/m^2]	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
K [$^{\circ}\text{C/min}$]	0	-0,02	-0,02	0	0,04	0,1	0,18	0,28	0,4	0,54	0,7



Graf č. 2.11: Závislost koeficientu chlazení na působící intenzitě slunečního záření ze všech měření bez horního krytu konstrukce – po provedení korekce

2.3.4 Výsledné hodnoty koeficientu ohřevu pro měření s horním krytem konstrukce

Tato podkapitola se zabývá koeficientem ohřevu pro měření s horním krytem konstrukce. Při tomto typu měření je horní kryt konstrukce umístěn a pevně uchycen. Výhodou tohoto měření je, že FVP je celý umístěn v konstrukci, což by mělo dostatečně odstínit panel od veškerých nepříznivých vlivů počasí. Značnou nevýhodou je pak tedy fakt, že horní kryt konstrukce ubírá dopadající intenzitě slunečního záření přibližně 100 W/m^2 . Další nevýhodou je problém s chlazením uvnitř konstrukce, kdy po uzavření panelu uvnitř dochází k vysokému nárůstu teploty.

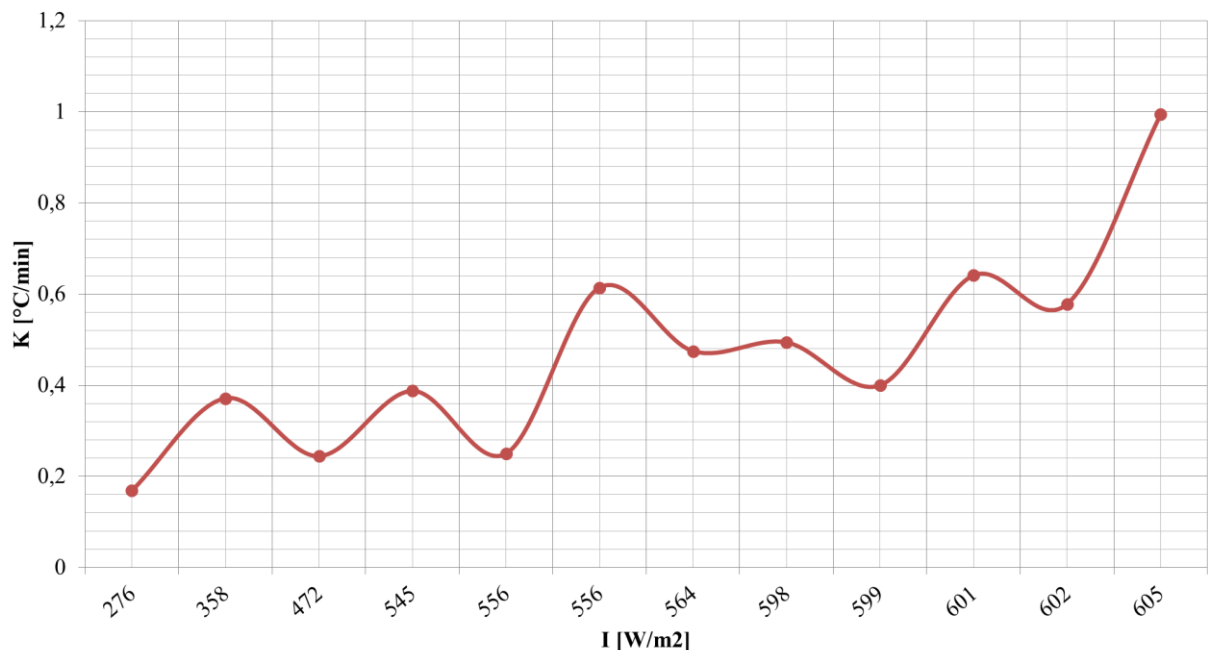
V následující tabulce uvádím koeficienty ohřevu pro jednotlivá měření, která probíhala při měřicích podmínkách s horním krytem konstrukce. V tabulce vyjma koeficientů jsou také uvedeny průměrné intenzity dopadajícího slunečního záření, maximální a minimální dosažená naměřená teplota na panelu a v neposlední řadě čas, za který došlo k ohřevu FVP z počáteční teploty na maximální ustálenou.

Z tabulky č. 4 můžeme zjistit nejvyšší naměřenou hodnotu teploty, a to 47,2 °C, která byla dosažena při intenzitě slunečního záření $I = 605 \text{ W/m}^2$ za čas ohřevu 17 minut. Naopak nejnižší naměřená hodnota teploty, která vyšla hned dvakrát 28,3 °C odpovídá intenzitě dopadu slunečního záření $I = 472$ a 601 W/m^2 . Všechny uvedené hodnoty budou dále důkladně přezkoumány a vyselektovány na základě konkrétních podmínek měření a nepříznivých vlivů.

Tabulka č. 2.7: Přehled všech vypočtených koeficientu ohřevu ze všech měření s horním krytem konstrukce

číslo měření	K [°C/min]	I [W/m ²]	t _{max} [°C]	t _{min} [°C]	t [min]
1	0,17	276	36,2	33,5	16
2	0,37	358	38,2	33	14
3	0,24	472	32,7	28,3	18
4	0,39	545	39,7	30,3	24
5	0,25	556	35,4	29,3	24
6	0,61	556	42,1	29,2	21
7	0,48	564	41,3	31,8	20
8	0,49	598	36,7	28,3	17
9	0,40	599	39,7	30,9	22
10	0,64	601	41,8	30,9	17
11	0,58	602	43,1	29,8	23
12	0,99	605	47,2	30,3	17

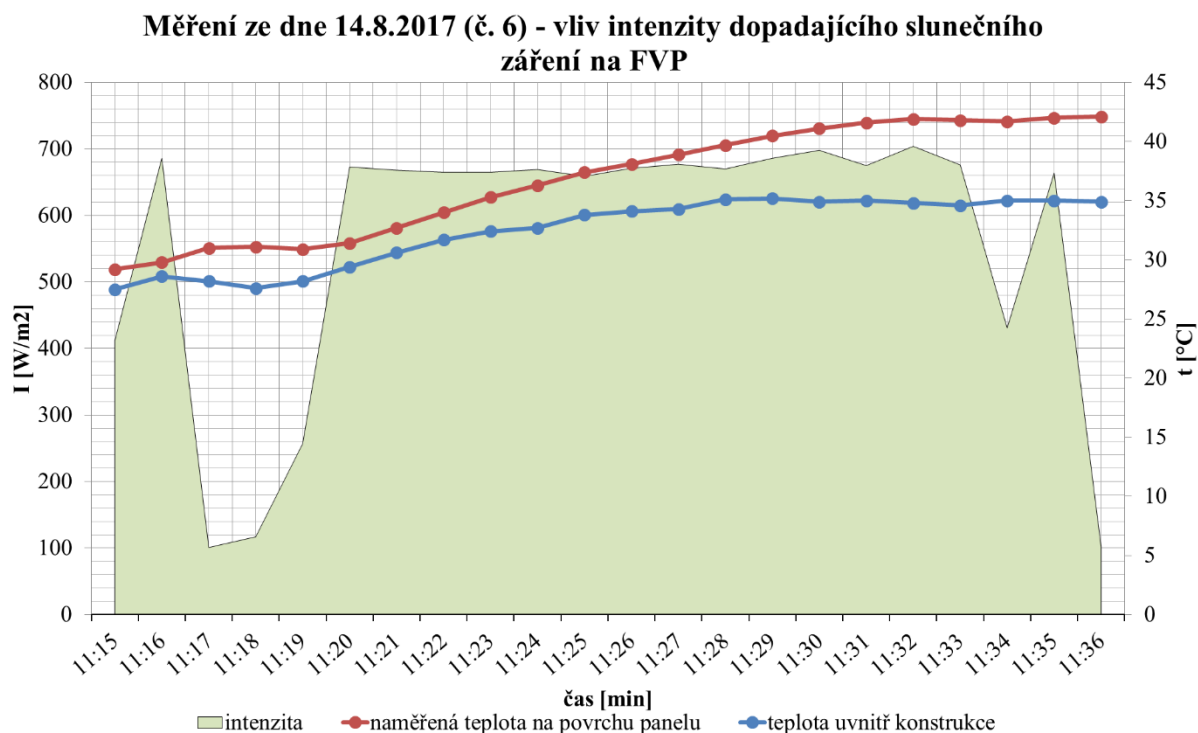
Závislost koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření ze všech naměřených hodnot měření s horním krytem konstrukce



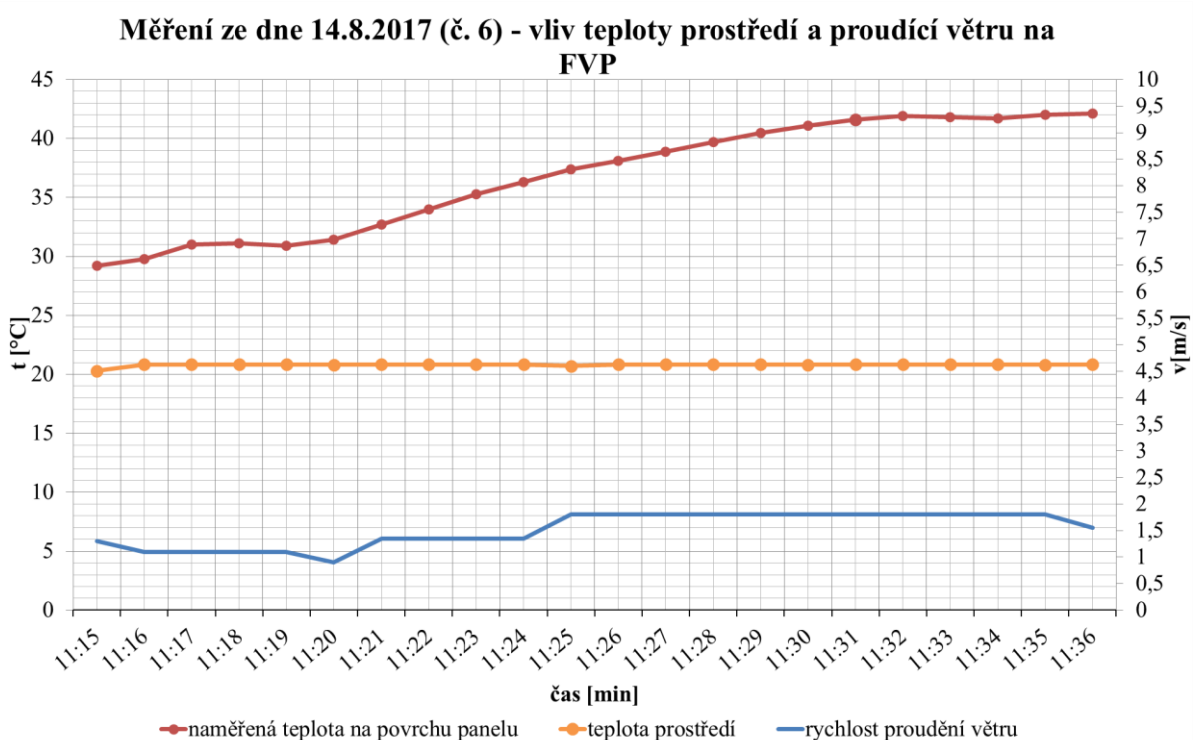
Graf č. 2.12: Závislost koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření ze všech naměřených hodnot měření s horním krytem konstrukce

Z grafu výše je patrné, že je potřeba jako v předchozí kapitole detailně prozkoumat jednotlivá měření a eliminovat ta, která by mohla být nějakým způsobem nevhodná. Z těchto dvanácti měření jsem vyseletoval pouze jedno jediné měření. Jedná se o měření číslo 6 ze dne 14. 8. 2017. Selektce tohoto měření byla z důvodu proměnlivé intenzity slunečního záření. Graficky je znázorněno níže (graf č. 2.13). Z grafické závislosti je na první pohled patrné kolísání dopadu sluneční intenzity na FVP krátce po započetí měření. Další rapidní pokles je vidět těsně před koncem měření a posléze poslední naměřená hodnota měření ukázala veliký pokles hodnot, a to z 664 W/m^2 na 102 W/m^2 .

Dalších pět měření jsem vyseparoval a vložil do grafu zvlášť z důvodu toho, že všechna měření přesahovala průměrnou rychlost větru proti ostatním. Rychlost proudění vzduchu byla u těchto měření nad 3 m/s . Jedná se o měření číslo 2, 4, 7, 8 a 10. Tyto hodnoty jsem vynesl do grafu č. 14. Měření označené čísly 1, 3, 5, 9, 11 a 12 jsem vynesl do grafu č. 2.13. Jsou to měření, při kterých dosahovala rychlost proudění vzduchu do 3 m/s .

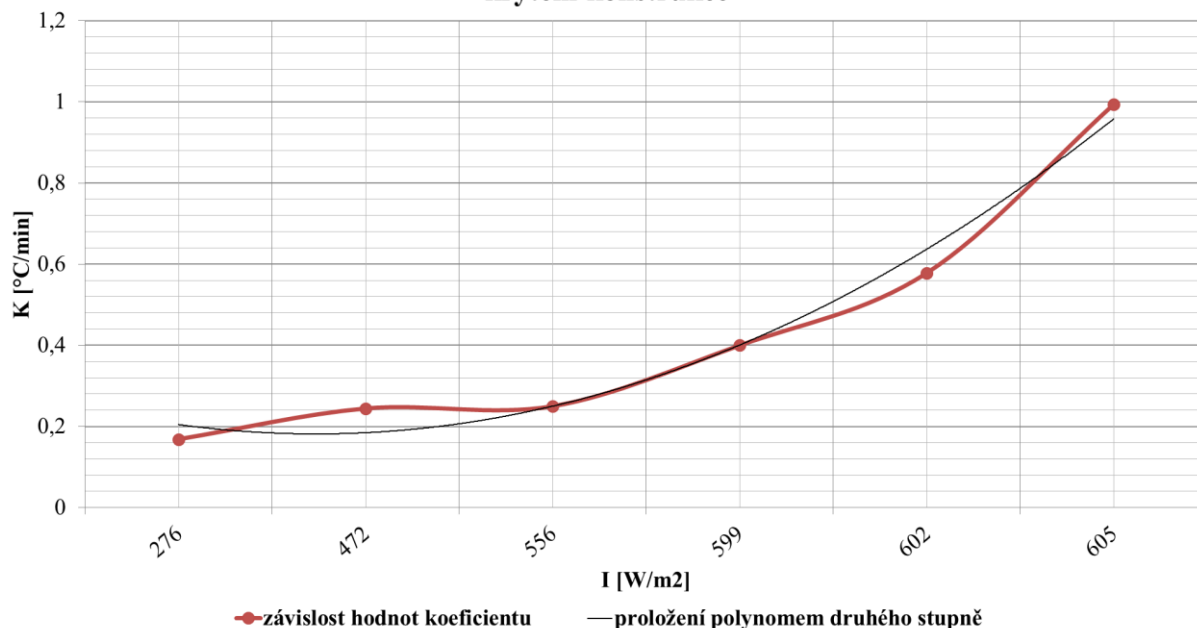


Graf č. 2.13: Vliv intenzity dopadajícího slunečního záření na FVP – měření ze dne 14. 8. 2018 (č. 6) – problém s příliš proměnlivou intenzitou (vyloučeno z měření)



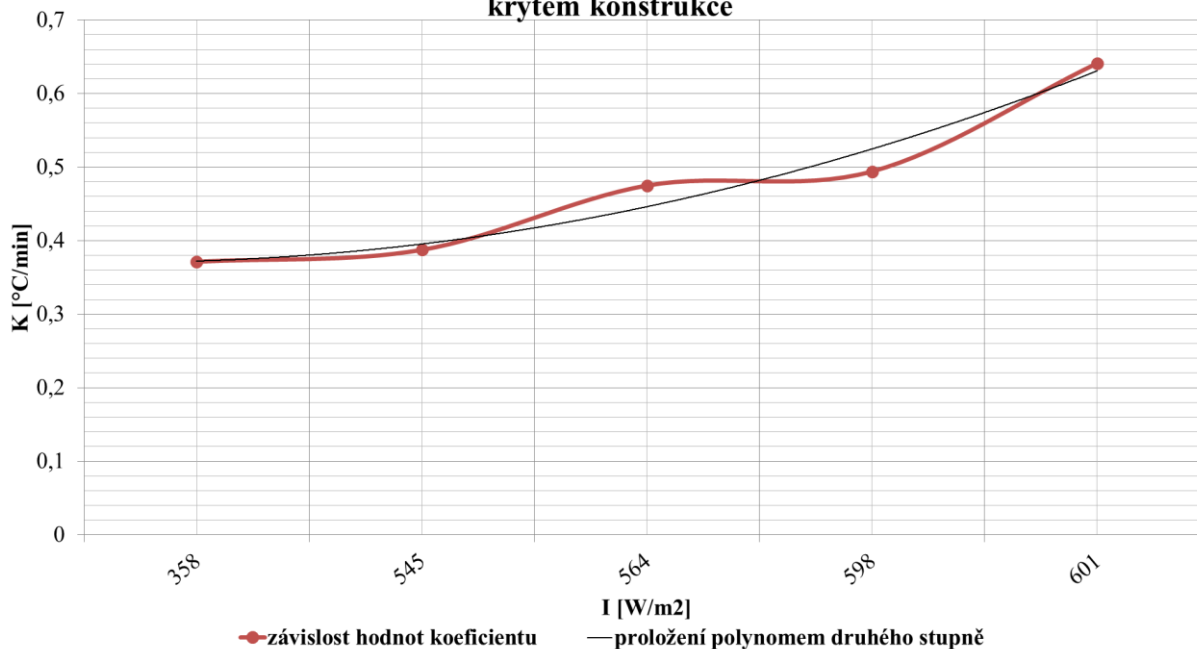
Graf č. 2.14: Vliv teploty a proudění větru na FVP – měření ze dne 14. 8. 2017 (č. 6)

Po separaci (korekci) závislost koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření z měření o rychlosti proudění větru do 3 m/s s horním krytem konstrukce



Graf č. 2.15: Po provedené korekci závislost koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření z měření o rychlosti proudění větru do 3 m/s s horním krytem konstrukce

Po separaci (korekci) závislost koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření z měření o rychlosti proudění větru nad 3 m/s s horním krytem konstrukce



Graf č. 2.16: Po provedené korekci závislost koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření z měření o rychlosti proudění větru nad 3 m/s s horním krytem konstrukce

Z grafických závislostech koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření s horním krytem konstrukce vyplívá rostoucí trend. Na těchto dvou uvedených grafech si můžeme povšimnout jistého markantního rozdílu oproti měřením bez krytu konstrukce. Díky kompletnímu uzavření panelu uvnitř konstrukce a rozdělení měření na dvě části s ohledem na rychlost proudění větru tyto měření vychází podle očekávání, odpovídá tedy závislost koeficientu ohřevu v závislosti na působící intenzitě slunečního záření.

Všechny grafické závislosti jsem stejně tak jako u předchozího typu měření proložil polynomem druhého stupně. Z proložení polynomem druhého stupně jsem následně dopočítal hodnoty koeficientu po krocích 100 W/m^2 a dosadil do pásma od 0 až do 1000 W/m^2 . Výsledné výpočty se nachází v tabulce znázorněné níže.

V tabulce číslo 2.8 se nachází výpočet koeficientu druhého polynomu z měření o rychlosti proudění větru do 3 m/s s horním krytem konstrukce. Výpočet byl proveden z rovnice $y=0,000003*x^2 - 0,0007*x + 0,0308$. V následné tabulce číslo 2.9 je pak výpočet koeficientu druhého polynomu z měření o rychlosti proudění větru nad 3 m/s s horním krytem konstrukce. Dopočet z rovnice $y=-0,0000002*x^2 + 0,001*x$.

Tabulka č. 2.8: Výpočet koeficientu po krocích 100 W/m^2 z rovnice druhého polynomu pro měření o rychlosti proudění větru do 3 m/s s horním krytem konstrukce

I [W/m^2]	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
K [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$]	0,03	-0,01	0,01	0,09	0,23	0,43	0,69	1,01	1,39	1,83	2,33

Tabulka č. 2.9: Výpočet koeficientu po krocích 100 W/m^2 z rovnice druhého polynomu pro měření o rychlosti proudění větru nad 3 m/s s horním krytem konstrukce

I [W/m^2]	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
K [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$]	0,00	0,10	0,19	0,28	0,37	0,45	0,53	0,60	0,67	0,74	0,80

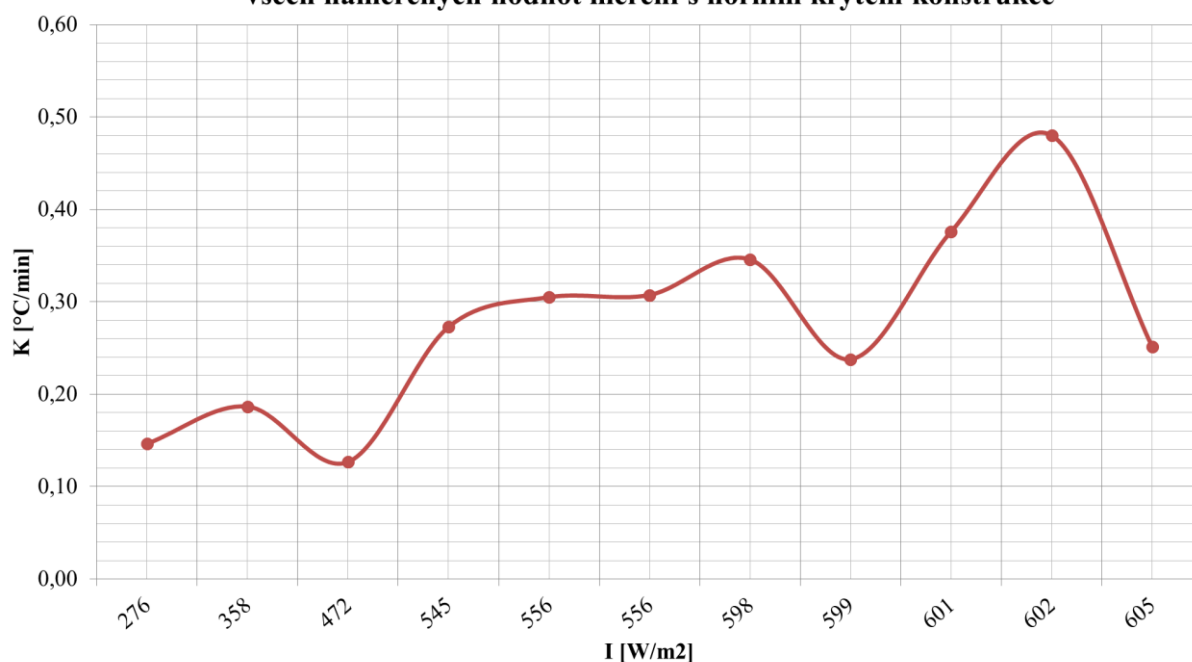
2.3.5 Výsledné hodnoty koeficientu chladnutí pro měření s horním krytem konstrukce

Stejně tak jako u předchozího měření s vyhodnocení koeficientu chladnutí jsem postupoval zde. Níže uvádím tabulku s výpočtem koeficientů chladnutí pro všechna měření s horním krytem konstrukce. Dále veškeré hodnoty byly zaznamenány do grafu nacházející se pod tabulkou přehledu.

Tabulka č. 2.10: Přehled všech vypočtených koeficientu chlazení ze všech měření s horním krytem konstrukce

číslo měření	K [°C/min]	I [W/m ²]	t _{max} [°C]	t _{min} [°C]	t [min]
1	0,15	276	36,8	32,7	28
2	0,19	358	38,2	32,6	30
3	0,13	472	34,1	32,2	15
4	0,27	545	40,8	31,8	33
5	0,31	556	38	31,9	20
6	0,31	556	40,2	31,9	27
7	0,33	564	41,9	31,9	30
8	0,35	598	40	31,7	24
9	0,24	599	41,4	32,6	37
10	0,38	601	42,4	33	25
11	0,48	602	46,7	32,3	30
12	0,25	605	40,4	32,1	33

Závislost koeficientu chladnutí na působící intenzitě slunečního záření ze všech naměřených hodnot měření s horním krytem konstrukce



Graf č. 2.17: Závislost koeficientu chladnutí na působící intenzitě slunečního záření ze všech měření s horním krytem konstrukce

Z grafu jsou patrné výchyly v podobě prudkých poklesů. Stejně tak jako u předchozího typu měření jsem musel provést separaci nežádoucích hodnot. Též všechna měření chlazení byla provedena ve vnitřních prostorách Fakulty elektrotechnické ZČU, a tedy jsem nemusel brát v potaz rychlost proudění větru nebo proměnlivost intenzity dopadajícího slunečního záření na plochu fotovoltaického panelu.

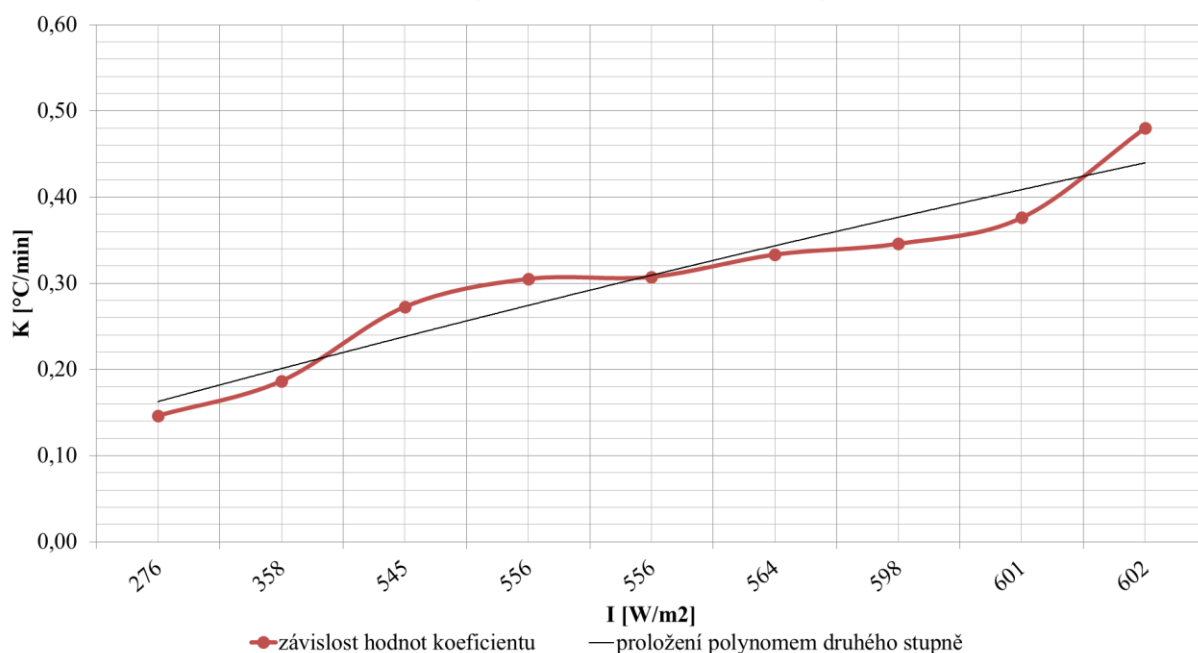
Po dokončení korekce jsem odebral pouze 3 měření a zbylé jsem vložil do grafu číslo 2.17. Dále jsem, stejně tak jako u předchozích měření ohřevu a chlazení, proložil grafickou závislost polynomem druhého stupně a ze získané rovnice jsem dopočetl koeficient chlazení po krocích 100 W/m² a dosadil do pásma od 0 až do 1000 W/m². Výsledné hodnoty koeficientu můžeme zhlédnout v tabulce číslo 2.11.

Proložení polynomem druhého stupně jsem získal rovnici $y=0,000001*x^2 - 0,0002*x$.

Tabulka č. 2.11: Výpočet koeficientu po krocích 100 W/m² z rovnice druhého polynomu pro měření chlazení s horním krytem konstrukce

I [W/m ²]	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
K [°C/min]	0	-0,01	0	0,03	0,08	0,15	0,24	0,35	0,48	0,63	0,8

Závislost koeficientu ohřevu na působící intenzitě slunečního záření po korekci naměřených hodnot bez horního krytu konstrukce



Graf č. 2.18: Závislost koeficientu chlazení na působící intenzitě slunečního záření ze všech měření s horním krytem konstrukce – po provedení korekce

2.4 Vyhodnocení výsledků

Závěrem této kapitoly bych rád zhodnotil dosažené výsledky. Ze všech měření, která jsem absolvoval, jsem dosáhl nejlepších výsledků pouze u měření typu s horním krytem konstrukce. Jak jsem se již zmínil výše, u tohoto typu měření byl celý panel uložen v konstrukci. Vzhledem k výsledkům, které jsem získal, byla tato metoda podle mého názoru celkem efektivní. Problém u této metody spočíval ve vyšší teplotě uvnitř konstrukce a nadále v síle proudění větru, který se opíral do konstrukce a mohl způsobit rozhození snímačů.

Druhá použitá metoda je měření bez horního krytu konstrukce. Výsledky této metody se neprojevily příliš uspokojivě. Tato metoda měla mnoho skrytých problémů, které se mohly projevit na výsledcích měření. Jedním z nich je udržení konstantní teploty v konstrukci, které jsem řešil za pomoci dvou ventilátorů, které jsem reguloval dle potřeby. Právě toto řešení chlazení mohlo způsobit výchytky na přírůstkové teplotě za čas, a tak se poté mohlo projevit do výpočtu koeficientu.

Nakonec se mi však podařilo vyseparovat měření o nekorespondujících hodnotách a následně je vynést do grafů, dále vypočítat koeficienty ohřevu a chladnutí, provést proložení polynomem druhého a v některých případech i třetího stupně. K docílení přesnějších hodnot by bylo možné dojít po provedení dalších měření. V ideálním případě by bylo vhodné dosáhnout měření v různých intenzitách slunečního záření a také v každém ročním období za působení různých podmínek. Ze zisku vícero dat by bylo možné je rozdělit pro různé podmínky mnohem podrobněji.

3 Simulace FVP v konkrétní lokalitě

Dalším zásadním bodem této diplomové práce je provést simulaci chování daného fotovoltaického panelu v konkrétní lokalitě. K výpočtu byly zapotřebí hodnoty získané z meteostanice umístěné na střeše fakulty, které byly dodány vedoucím mé práce. Konkrétní lokalitou se rozumí, místo na kterém byla prováděna veškerá měření, a tím je Fakulta elektrotechnická ZČU v Plzni. Více informací o lokaci jsem uvedl v kapitole 2.1 Popis místa měření.

Simulace fotovoltaického panelu v konkrétní lokalitě jsem provedl hned na čtyřech výpočetních modelech, všechny jsou vztaženy k měřenému panelu Calyxo CX60. První je výpočetní model využívající online dat ze satelitních měření a pozemních meteostanic. Jedná se o program PVGIS. Jako další výpočetní model jsem zvolil simulační software fotovoltaických systému PVsyst. Tyto dva programy pracují velice podobně, tudíž výsledné hodnoty by se neměly od sebe tolik lišit. Třetí výpočtový model vychází ze vstupních dat naměřených z meteostanice umístěné na střeše Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni, a to za rok 2017. V posledním výpočtovém modelu jsem využil získaných a vypočtených teplotních koeficientů s kombinací dat z meteostanice. Jednotlivé metody a jejich výsledky budou v probrány jednotlivě v následujících kapitolách. [16]

3.1 Simulace v programu PVGIS

Pro první simulační metodu jsem zvolil program PVGIS. Jak jsem se již zmínil, data jsou k dispozici online, a to přímo na oficiálních stránkách tohoto programu. Ten má mnoho co nabídnout, hlavně co se týče uživatelem zvolených kritérií pro co nejpřesnější simulaci. Jsou to kupříkladu informace o tom, o jaký FV panel se jedná, účinnost, sklon panelu, instalovaný výkon a mnoho dalších. Z programu lze získat data slunečního záření jednak za den, jednak i za celé měsíce. K tomu je však nutná podmínka zvolit přesnou lokalitu, pro kterou potřebujeme zjistit vstupní data. V mém případě se jedná o již zmíněnou lokalitu, a to Fakultu elektrotechnickou ZČU v Plzni na kartézské soustavě souřadnic 49.723969N zeměpisné šířky a 13.349634E zeměpisné délky.

Poté co jsem takto definoval v programu PVGIS oblast měření, jsem byl schopen získat potřebná data pro další výpočty. Všechna získaná data jsem poté zkontroloval a vyseparoval k dalšímu použití. Data, potřebná pro další kroky, obsahovala průměrnou hodnotu teplot okolí,

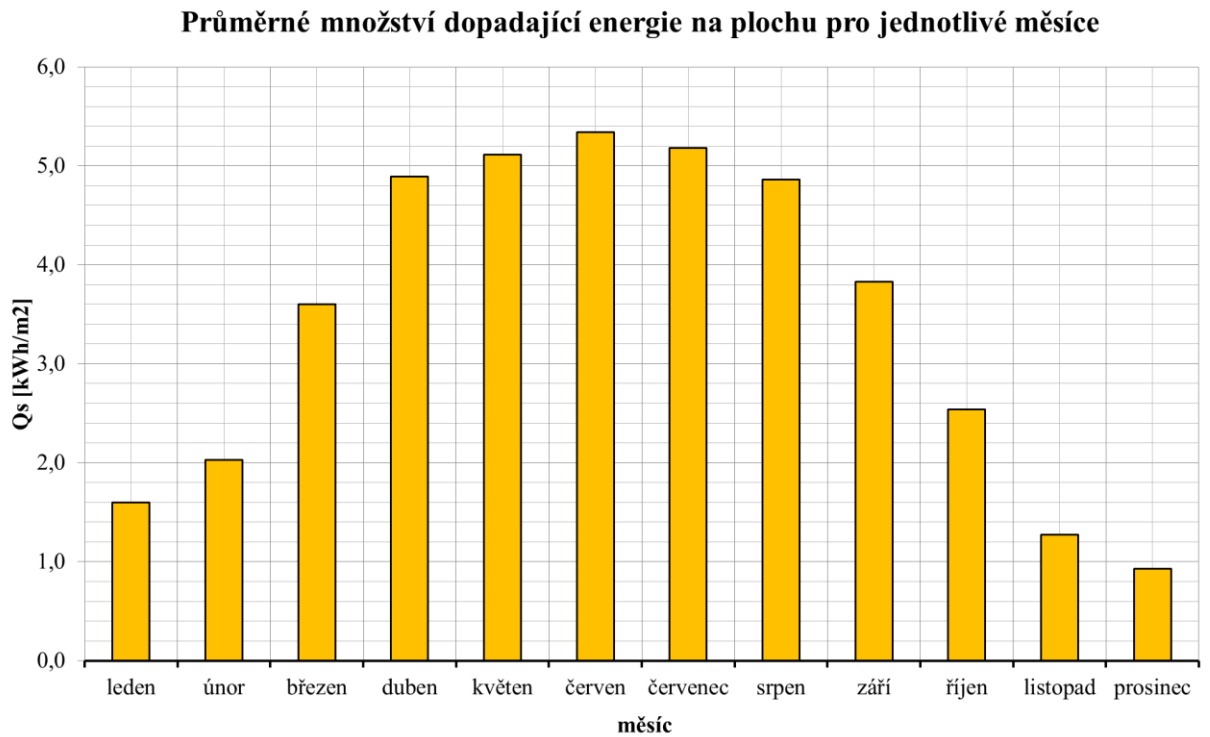
intenzitu solárního záření a množství dopadající energie na plochu za průměrný den v měsíci. Veškeré tyto hodnoty jsou v následující tabulce č. 3.1. Pod tabulkou se nachází několik grafů vytvořených na základě hodnot z tabulky č. 3.1. V prvním grafu č. 3.1 se nachází průměrné množství dopadající energie na plochu pro jednotlivé měsíce. V dalším grafu č. 3.2 jsou zobrazeny průměrné hodnoty dopadající energie na plochu při sklonu 35° pro jednotlivé měsíce. V posledním grafu č. 3.3 jsou průměrné teploty okolí vztažené ke každému měsíci.

The screenshot shows the PVGIS web application interface. At the top, there are logos for JRC and CM SAF, and the title 'Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps'. Below the logos, there are navigation links and a search bar. The main area is a map showing the location of the West Bohemian University in Plzeň. On the right side, there is a control panel for 'Average Daily Solar Irradiance'. The panel includes a dropdown for 'Radiation database' (Climate-SAF PVGIS), a 'Select month' dropdown (January), and input fields for 'Inclination' (35 deg.) and 'Orientation' (0 deg.). There are several checkboxes for irradiance types: 'Average global irradiance', 'Clear-sky global irradiance', 'Direct normal irradiance', 'Average global irradiance, 2-axis tracking', and 'Clear-sky global irradiance, 2-axis tracking'. There are also options for 'Daytime temperatures', 'Horizon file', and 'Output options' (Web page, Text file, PDF). A 'Calculate' button is at the bottom of the panel.

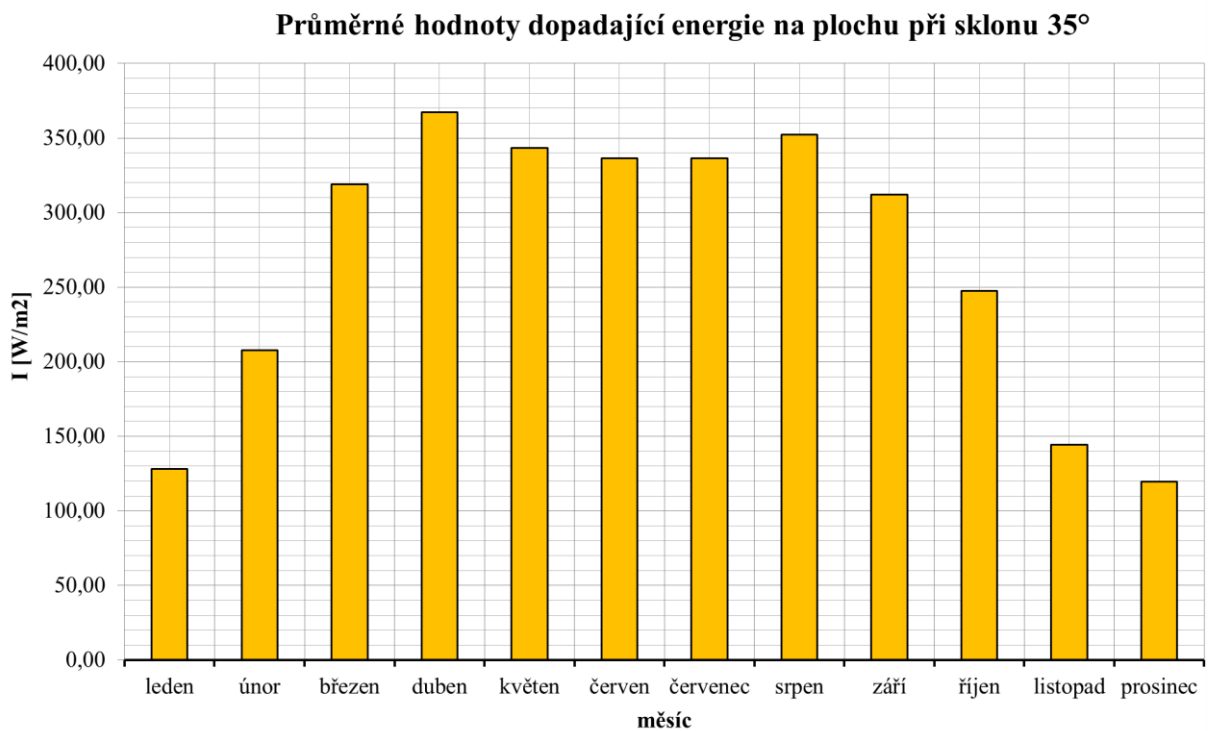
Obr. 3.1: Uživatelské prostředí programu PVGIS

Tabulka č. 3.1: Hodnoty získané z programu PVGIS

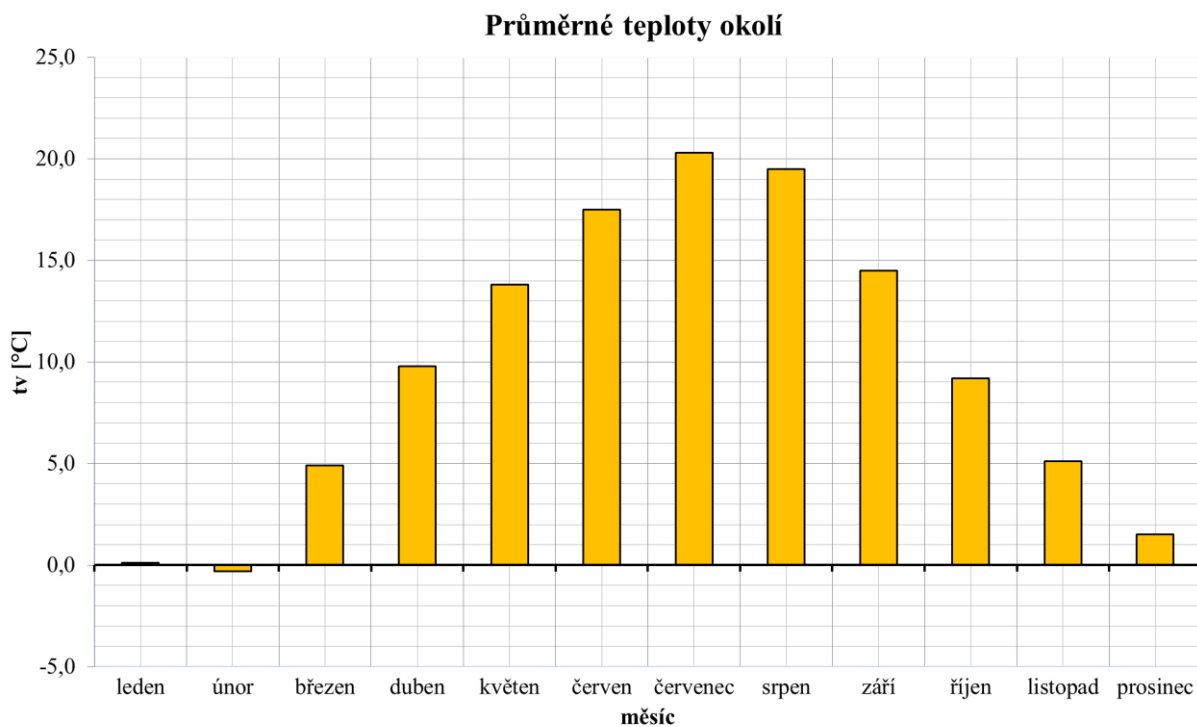
měsíc	teplota prostředí [°C]	množství dopadající energie [kWh/m ²]	intenzita sluneční energie [W/m ²]
leden	0,1	1,6	128
únor	-0,3	2,0	208
březen	4,9	3,6	319
duben	9,8	4,9	367
květen	13,8	5,1	343
červen	17,5	5,3	336
červenec	20,3	5,2	337
srpen	19,5	4,9	352
září	14,5	3,8	312
říjen	9,2	2,5	247
listopad	5,1	1,3	144
prosinec	1,5	0,9	120



Graf č. 3.1: Průměrné množství dopadající energie na plochu pro jednotlivé měsíce



Graf č. 3.2: Průměrné hodnoty dopadající energie na plochu při sklonu 35°



Graf č. 3.3: Průměrné teploty okolí vztahované ke každému měsíci

3.1.1 Výpočty z programu PVGIS

Z teoretického předpokladu vyplývá, že vliv teploty prostředí a dopadající intenzita působí na účinnost. Můžeme tedy tvrdit, že s klesající provozní teplotou se zvyšuje jeho účinnost. Ze získaných dat z programu PVGIS je možné provést několikero výpočtů. Výpočet pro průměrné denní provozní teploty fotovoltaického panelu je možné určit vztahem 3.1. Dále je možné vypočítat jednotlivé účinnosti fotovoltaického panelu za rok (3.2). V neposlední řadě je tu také výpočet energetické balance. Jedná se o to, kolik energie je FV panel schopen vygenerovat v každém měsíci. Vztah pro výpočet je označen 3.3. Veškeré získané výpočty uvádím v tabulce pod výpočtovými vzorci (3.1) a také grafickou závislost pro energetickou bilanci.

$$t_{FV} = t_V + \left(\frac{NOCT-20}{800} \right) * I = 0,1 + \left(\frac{50-20}{800} \right) * 128,27 = 4,9 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.1)$$

Kde:

t_V – průměrná teplota okolí přes den [°C]

I – průměrná intenzita slunečního záření přes den [W/m²]

$NOCT$ – teplota panelu za nominálních provozních podmínek

$$\eta = \eta_{STC} + \left(1 - \gamma * (t_{FV} - t_{STC}) + \lambda * \log \frac{I}{I_{STC}}\right) = \quad (3.2)$$

$$= 0,083 + \left(1 - 0,0025 * (4,9 - 25) + 0,12 * \log \frac{144,5}{1000}\right) = \mathbf{0,079} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Kde:

η_{STC} – účinnost panelu při standartních podmínkách [-]

γ – koeficient, který udává změnu výkonu na teplotě

t_{FV} – provozní teplota fotovoltaického panelu

t_{STC} – teplota při standartních podmínkách 25 [°C]

λ – koeficient, stanoven 0,12 [-]

I_{STC} – definovaná intenzita slunečního záření při standartních podmínkách 1000 [W/m²]

$$Q_{FVPM} = \eta * Q_S * S_{FVP} * n = 0,079 * 1,6 * 0,72 * 31 = \mathbf{2,81} \text{ [kWh]} \quad (3.3)$$

Kde:

η – účinnost panelu pro daný měsíc [-]

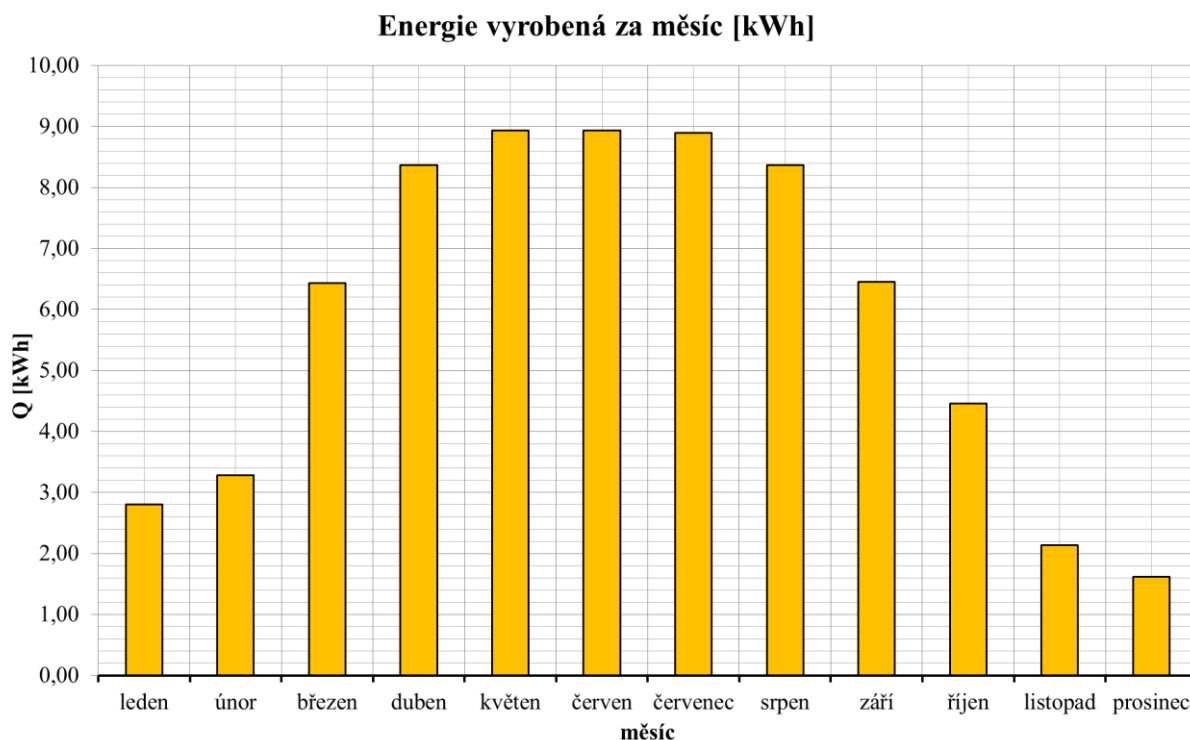
Q_S – dopadající energie na plochu [kWh/m²]

S_{FVP} – plocha FVP [m²]

t_{STC} – počet dní v měsíci

Tabulka č. 3.2: Výsledné vypočtené hodnoty z programu PVGIS

měsíc	průměrná teplota [°C]	účinnost [-]	energie vyrobená plochou 1m ² [kWh/m ²]	energie vyrobená za den [kWh]	energie vyrobená za měsíc [kWh]
leden	4,9	0,079	0,126	0,091	2,81
únor	7,5	0,080	0,163	0,117	3,28
březen	16,9	0,080	0,288	0,207	6,43
duben	23,6	0,079	0,388	0,279	8,37
květen	26,7	0,078	0,400	0,288	8,93
červen	30,1	0,078	0,414	0,298	8,94
červenec	32,9	0,077	0,398	0,287	8,89
srpen	32,7	0,077	0,375	0,270	8,37
září	26,2	0,078	0,299	0,215	6,45
říjen	18,5	0,079	0,200	0,144	4,46
listopad	10,5	0,078	0,099	0,071	2,14
prosinec	6,0	0,078	0,073	0,052	1,62



Graf č. 3.4: Grafické zobrazení vypočteného množství vyrobené energie za rok v programu PVGIS

3.1.2 Vyhodnocení výsledků z programu PVGIS

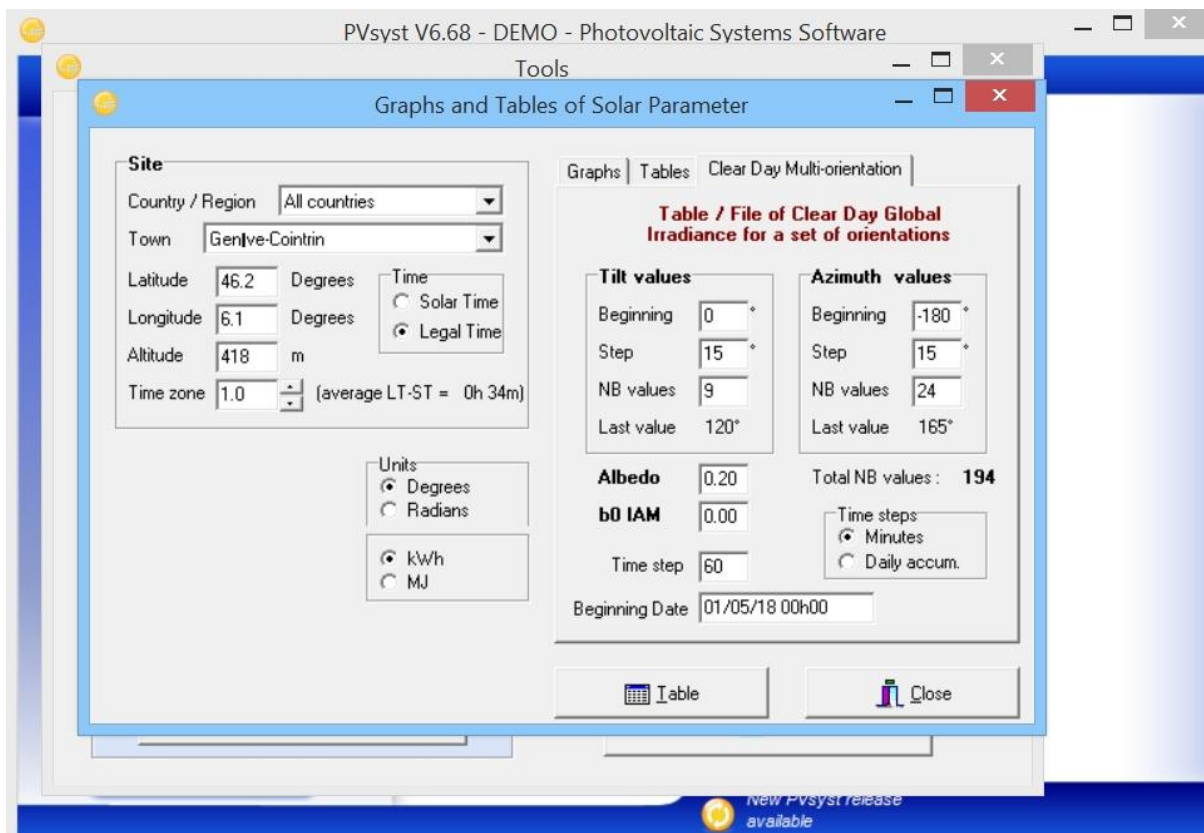
Z výsledné tabulky výpočtů a následného grafu můžeme vidět, že největší množství vyrobené energie dosahuje fotovoltaický panel v letních měsících, konkrétně se jedná o měsíc červen. Nejméně produktivní je pak měsíc prosinec.

3.2 Simulace v programu PVsyst

Druhou simulační metodou byl zvolen program PVsyst. Jak jsem se zmínil dříve, simulační program PVsyst a PVGIS jsou si v lecčems podobné, a tedy by se výsledné charakteristiky měli víceméně podobat. Pracuje se s online daty, které jsou k dispozici ze stránek programu. Rozdíl mezi uvedenými programy spočívá v možnostech, které PVsyst nabízí. Pro mé výpočty jsem použil průměrné hodnoty teplot okolí, intenzit solárního záření a množství dopadající energie na plochu za průměrný den v měsíci. Stejně jako u předchozího simulačního programu jsem nadefinoval lokalitu, pro kterou jsem chtěl získat hodnoty. Zadané souřadnice jsem uvedl v počátku této kapitoly.

Veškeré získané hodnoty jsem zpracoval a uvádím je v následující tabulce označené 3.3. Pod tabulkou jsou dále grafické závislosti. V grafu označeném číslem 3.5 se nachází průměrné množství dopadající energie na plochu pro jednotlivé měsíce. V následujících grafických

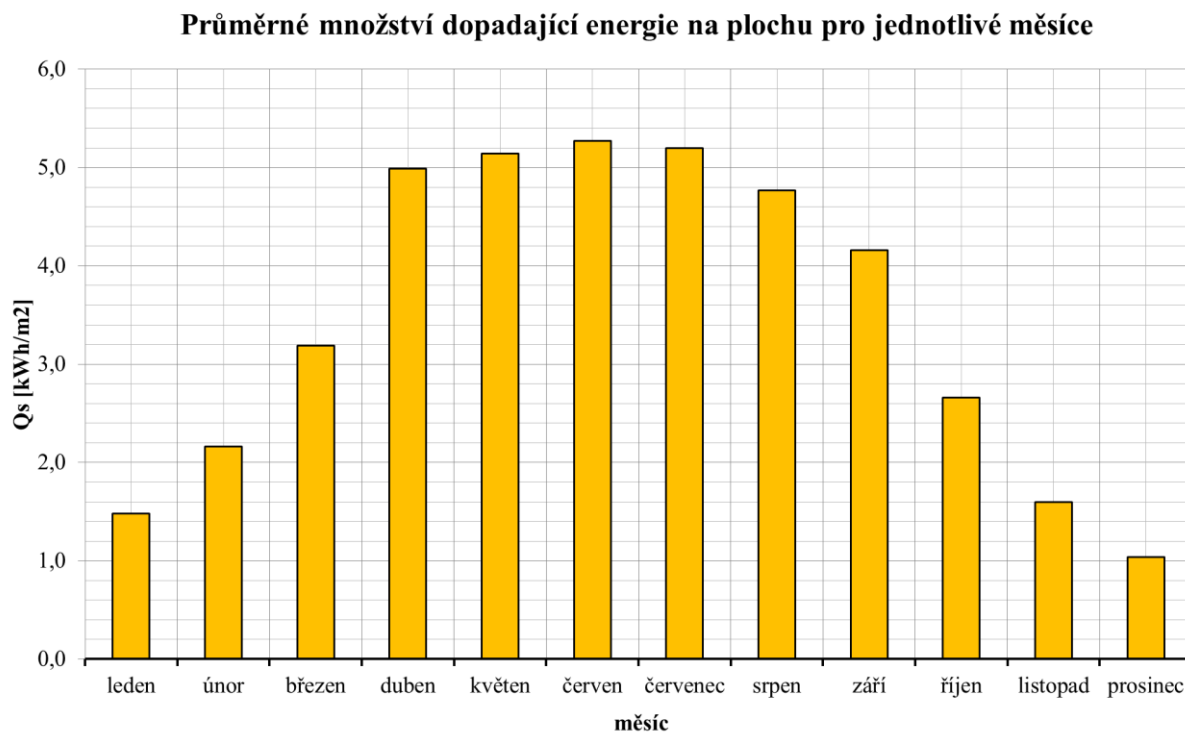
závislostech jsou pak vidět průměrné hodnoty dopadající energie na plochu při sklonu 35° a průměrné teploty okolí jsou vztaženy ke každému měsíci.



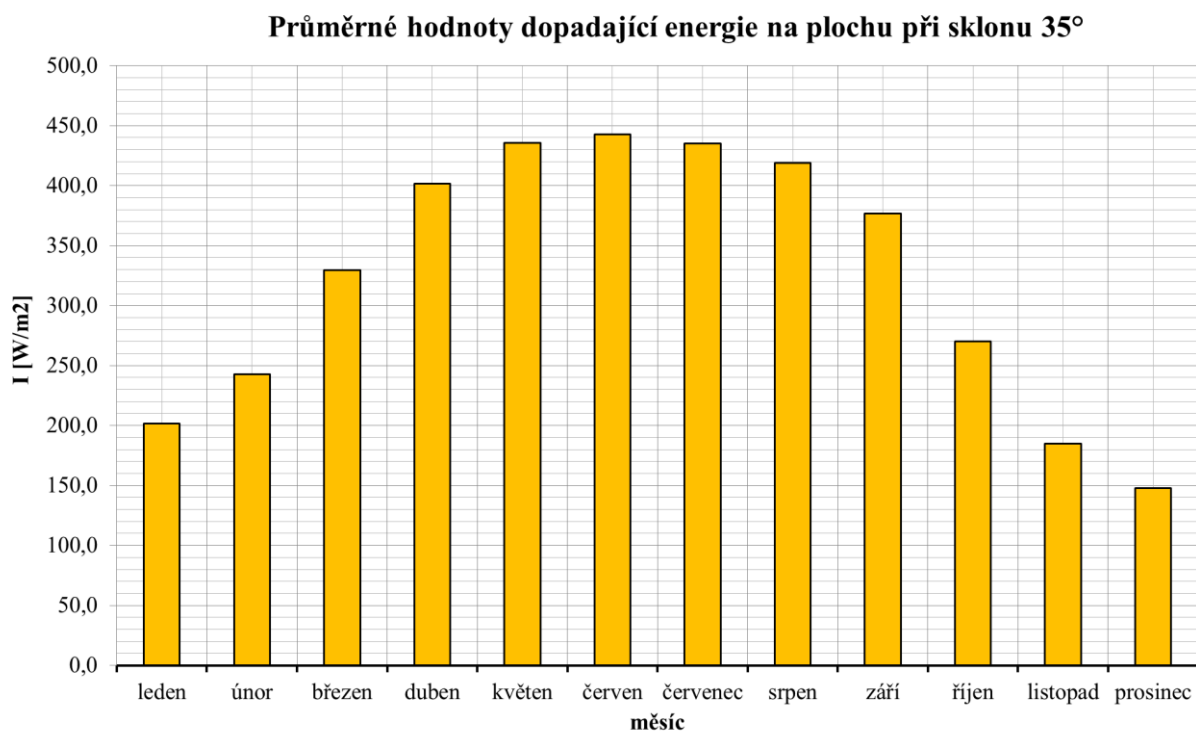
Obr. 3.2: Uživatelské prostředí programu PVsyst

Tabulka č. 3.3: Hodnoty získané z programu PVsyst

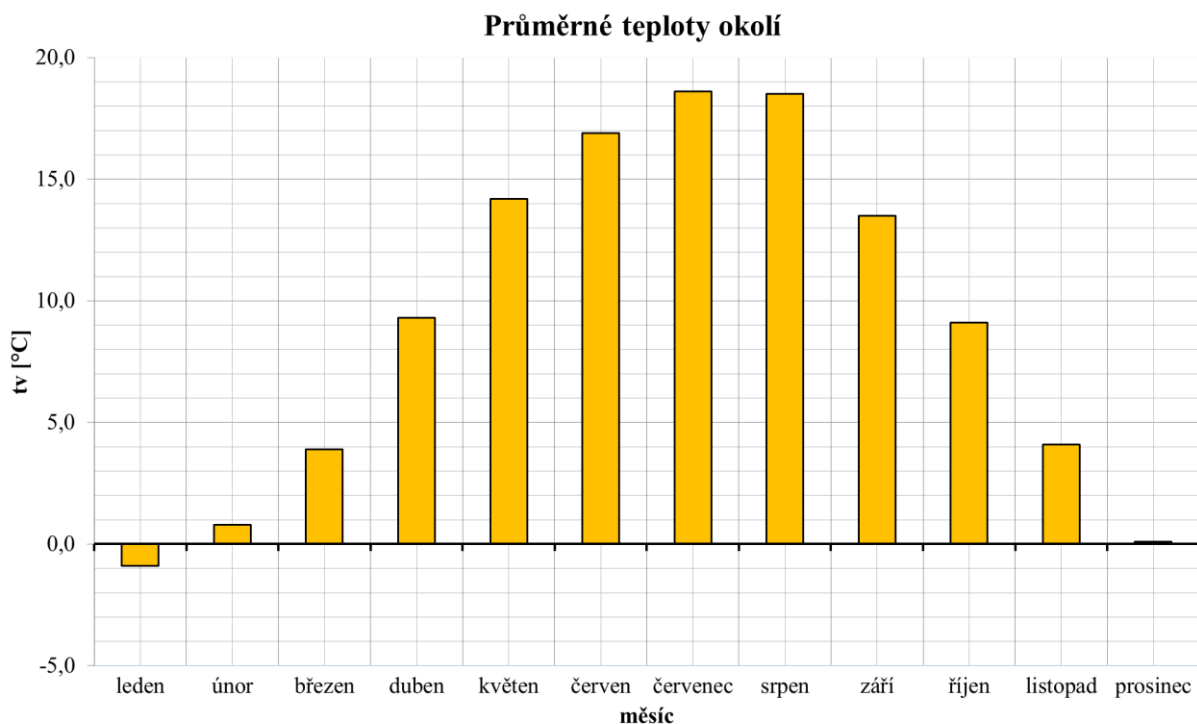
měsíc	teplota prostředí [°C]	množství dopadající energie [kWh/m ²]	intenzita sluneční energie [W/m ²]
leden	-0,9	1,5	202
únor	0,8	2,2	243
březen	3,9	3,2	330
duben	9,3	5,0	402
květen	14,2	5,1	435
červen	16,9	5,3	443
červenec	18,6	5,2	435
srpen	18,5	4,8	419
září	13,5	4,2	377
říjen	9,1	2,7	270
listopad	4,1	1,6	185
prosinec	0,1	1,0	148



Graf č. 3.5: Průměrné množství dopadající energie na plochu pro jednotlivé měsíce



Graf č. 3.6: Průměrné hodnoty dopadající energie na plochu při sklonu 35°



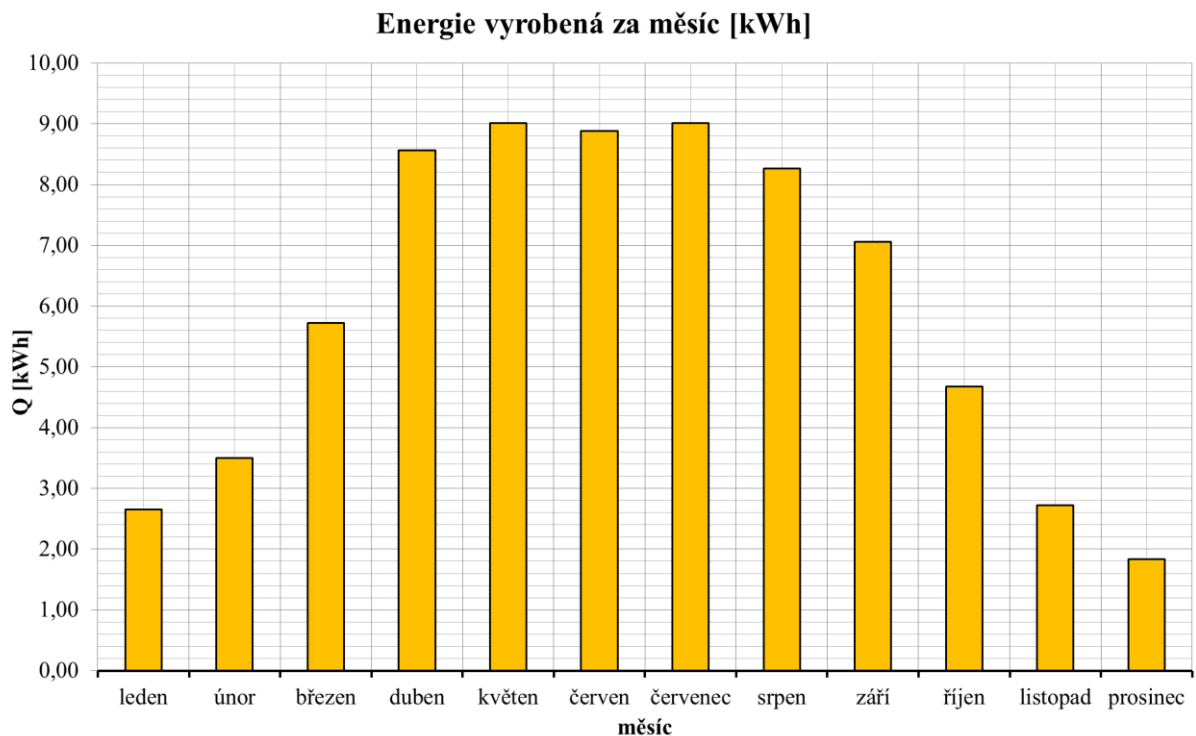
Graf č. 3.7: Průměrné teploty okolí vztahované ke každému měsíci

3.2.1 Výpočty v programu PVsyst

Vzhledem k již zmíněné podobnosti ve výpočetních programech přikládám pouze tabulku s vypočtenými hodnotami a následnou grafickou závislost. Všechny využití výpočtové vzorce a příklady jejich použití se nacházejí v předchozí kapitole 3.1.1 Výpočty v programu PVGIS.

Tabulka č. 3.4: Výsledné vypočtené hodnoty z programu PVsyst

měsíc	průměrná teplota [°C]	účinnost [-]	energie vyrobená plochou 1m ² [kWh/m ²]	energie vyrobená za den [kWh]	energie vyrobená za měsíc [kWh]
leden	6,7	0,080	0,119	0,085	2,65
únor	9,9	0,080	0,173	0,125	3,50
březen	16,3	0,080	0,256	0,184	5,72
duben	24,4	0,079	0,397	0,286	8,57
květen	30,5	0,079	0,404	0,291	9,01
červen	33,5	0,078	0,411	0,296	8,88
červenec	34,9	0,078	0,404	0,291	9,01
srpen	34,2	0,078	0,370	0,267	8,26
září	27,6	0,079	0,327	0,235	7,06
říjen	19,2	0,079	0,210	0,151	4,68
listopad	11,0	0,079	0,126	0,091	2,73
prosinec	5,6	0,079	0,082	0,059	1,83



Graf č. 3.8: Grafické zobrazení vypočteného množství vyrobené energie za rok v programu PVsyst

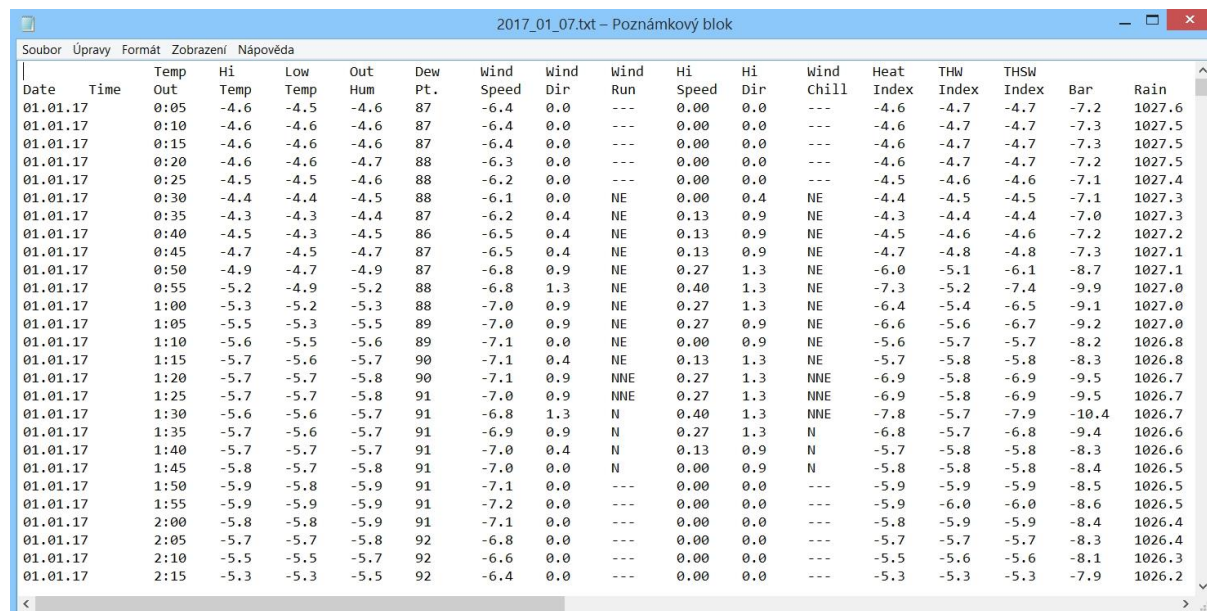
3.2.2 Vyhodnocení výsledků z programu PVsyst

Z výsledků získaných po dopočtu ze simulačního programu PVsyst je zřejmé, že nejvíce množství vyrobené energie FV panel dosahuje v letních měsících, a to konkrétně v květnu a v červenci. Měsícem nejméně produktivním byl pak prosinec.

3.3 Simulace z dat meteostanice

Simulační metoda se vstupními daty z meteostanice byla tvořena z dat získaných přímo z meteostanice nacházející se na střeše Fakulty elektrotechnické ZČU, a to za rok 2017. Výpočetní metody a postupy jsou obdobné jako v předchozích kapitolách o simulačních metodách programu PVGIS a PVsyst. Výsledné hodnoty intenzity dopadajícího záření a působící teploty okolí jsem získal ze vstupních dat z meteostanice a jejich průměrné měsíční hodnoty poté zjistil tak, že jsem zprůměroval každý den v měsíci a následně pomocí kontingenčních tabulek získal průměrné hodnoty za měsíc. K získání hodnot pro množství dopadající energie jsem použil výpočtovou metodu, jejíž vztah uvádím v rovnici 3.4. Výpočtová metoda je založena na součinu hodnot intenzity slunečního záření za konkrétní čas. Hodnoty za konkrétní čas jsem počítal jako dílčí hodnoty energie za celý den po pěti minutách.

Veškeré získané a vypočtené hodnoty uvádím v následující tabulce označené 3.5. Pod tabulkou se dále nacházejí grafické závislosti koncipované jako v předchozích kapitolách simulačních metod.



Date	Time	Temp Out	Hi Temp	Low Temp	Out Hum	Dew Pt.	Wind Speed	Wind Dir	Wind Run	Hi Speed	Hi Dir	Wind Chill	Heat Index	THW Index	THSW Index	Bar	Rain
01.01.17	0:05	-4.6	-4.5	-4.6	87	-6.4	0.0	---	0.00	0.0	---	-4.6	-4.7	-4.7	-7.2	1027.6	
01.01.17	0:10	-4.6	-4.6	-4.6	87	-6.4	0.0	---	0.00	0.0	---	-4.6	-4.7	-4.7	-7.3	1027.5	
01.01.17	0:15	-4.6	-4.6	-4.6	87	-6.4	0.0	---	0.00	0.0	---	-4.6	-4.7	-4.7	-7.3	1027.5	
01.01.17	0:20	-4.6	-4.6	-4.7	88	-6.3	0.0	---	0.00	0.0	---	-4.6	-4.7	-4.7	-7.2	1027.5	
01.01.17	0:25	-4.5	-4.5	-4.6	88	-6.2	0.0	---	0.00	0.0	---	-4.5	-4.6	-4.6	-7.1	1027.4	
01.01.17	0:30	-4.4	-4.4	-4.5	88	-6.1	0.0	NE	0.00	0.4	NE	-4.4	-4.5	-4.5	-7.1	1027.3	
01.01.17	0:35	-4.3	-4.3	-4.4	87	-6.2	0.4	NE	0.13	0.9	NE	-4.3	-4.4	-4.4	-7.0	1027.3	
01.01.17	0:40	-4.5	-4.3	-4.5	86	-6.5	0.4	NE	0.13	0.9	NE	-4.5	-4.6	-4.6	-7.2	1027.2	
01.01.17	0:45	-4.7	-4.5	-4.7	87	-6.5	0.4	NE	0.13	0.9	NE	-4.7	-4.8	-4.8	-7.3	1027.1	
01.01.17	0:50	-4.9	-4.7	-4.9	87	-6.8	0.9	NE	0.27	1.3	NE	-6.0	-5.1	-6.1	-8.7	1027.1	
01.01.17	0:55	-5.2	-4.9	-5.2	88	-6.8	1.3	NE	0.40	1.3	NE	-7.3	-5.2	-7.4	-9.9	1027.0	
01.01.17	1:00	-5.3	-5.2	-5.3	88	-7.0	0.9	NE	0.27	1.3	NE	-6.4	-5.4	-6.5	-9.1	1027.0	
01.01.17	1:05	-5.5	-5.3	-5.5	89	-7.0	0.9	NE	0.27	0.9	NE	-6.6	-5.6	-6.7	-9.2	1027.0	
01.01.17	1:10	-5.6	-5.5	-5.6	89	-7.1	0.0	NE	0.00	0.9	NE	-5.6	-5.7	-5.7	-8.2	1026.8	
01.01.17	1:15	-5.7	-5.6	-5.7	90	-7.1	0.4	NE	0.13	1.3	NE	-5.7	-5.8	-5.8	-8.3	1026.8	
01.01.17	1:20	-5.7	-5.7	-5.8	90	-7.1	0.9	NNE	0.27	1.3	NNE	-6.9	-5.8	-6.9	-9.5	1026.7	
01.01.17	1:25	-5.7	-5.7	-5.8	91	-7.0	0.9	NNE	0.27	1.3	NNE	-6.9	-5.8	-6.9	-9.5	1026.7	
01.01.17	1:30	-5.6	-5.6	-5.7	91	-6.8	1.3	N	0.40	1.3	NNE	-7.8	-5.7	-7.9	-10.4	1026.7	
01.01.17	1:35	-5.7	-5.6	-5.7	91	-6.9	0.9	N	0.27	1.3	N	-6.8	-5.7	-6.8	-9.4	1026.6	
01.01.17	1:40	-5.7	-5.7	-5.7	91	-7.0	0.4	N	0.13	0.9	N	-5.7	-5.8	-5.8	-8.3	1026.6	
01.01.17	1:45	-5.8	-5.7	-5.8	91	-7.0	0.0	N	0.00	0.9	N	-5.8	-5.8	-5.8	-8.4	1026.5	
01.01.17	1:50	-5.9	-5.8	-5.9	91	-7.1	0.0	---	0.00	0.0	---	-5.9	-5.9	-5.9	-8.5	1026.5	
01.01.17	1:55	-5.9	-5.9	-5.9	91	-7.2	0.0	---	0.00	0.0	---	-5.9	-6.0	-6.0	-8.6	1026.5	
01.01.17	2:00	-5.8	-5.8	-5.9	91	-7.1	0.0	---	0.00	0.0	---	-5.8	-5.9	-5.9	-8.4	1026.4	
01.01.17	2:05	-5.7	-5.7	-5.8	92	-6.8	0.0	---	0.00	0.0	---	-5.7	-5.7	-5.7	-8.3	1026.4	
01.01.17	2:10	-5.5	-5.5	-5.7	92	-6.6	0.0	---	0.00	0.0	---	-5.5	-5.6	-5.6	-8.1	1026.3	
01.01.17	2:15	-5.3	-5.3	-5.5	92	-6.4	0.0	---	0.00	0.0	---	-5.3	-5.3	-5.3	-7.9	1026.2	

Obr. 3.2: Uživatelské prostředí získaných dat z meteorologie

$$Q_S = \frac{(I \cdot t)}{1000} = \frac{(5 \cdot 8,166667)}{1000} = 0,041 \text{ [kWh]} \quad (3.4)$$

Kde:

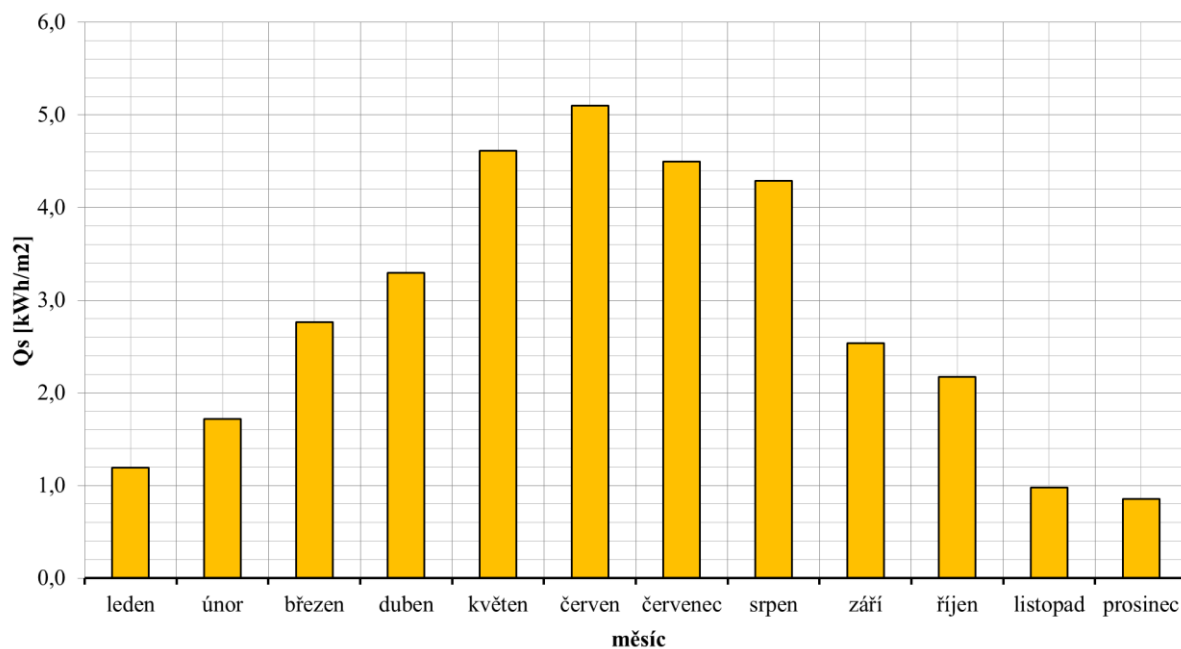
I – intenzita slunečního záření [W/m^2]

t – časový interval převedený na hodiny

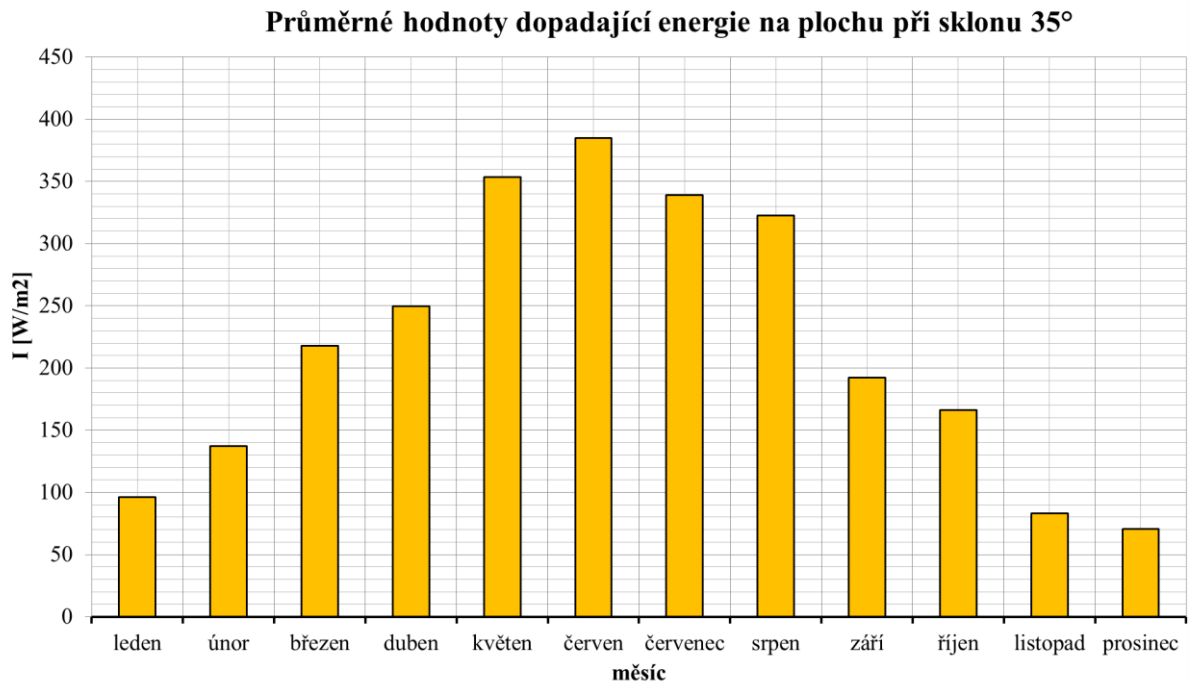
Tabulka č. 3.5: Hodnoty získané a dopočtené z meteostanice

měsíc	teplota prostředí [°C]	množství dopadající energie [kWh/m ²]	intenzita sluneční energie [W/m ²]
leden	-4,7	1,2	96
únor	2,3	1,7	137
březen	7,2	2,8	218
duben	7,9	3,3	250
květen	14,7	4,6	354
červen	19,2	5,1	385
červenec	19,3	4,5	339
srpen	19,7	4,3	322
září	12,3	2,5	192
říjen	11,4	2,2	166
listopad	4,2	1,0	83
prosinec	1,8	0,9	70

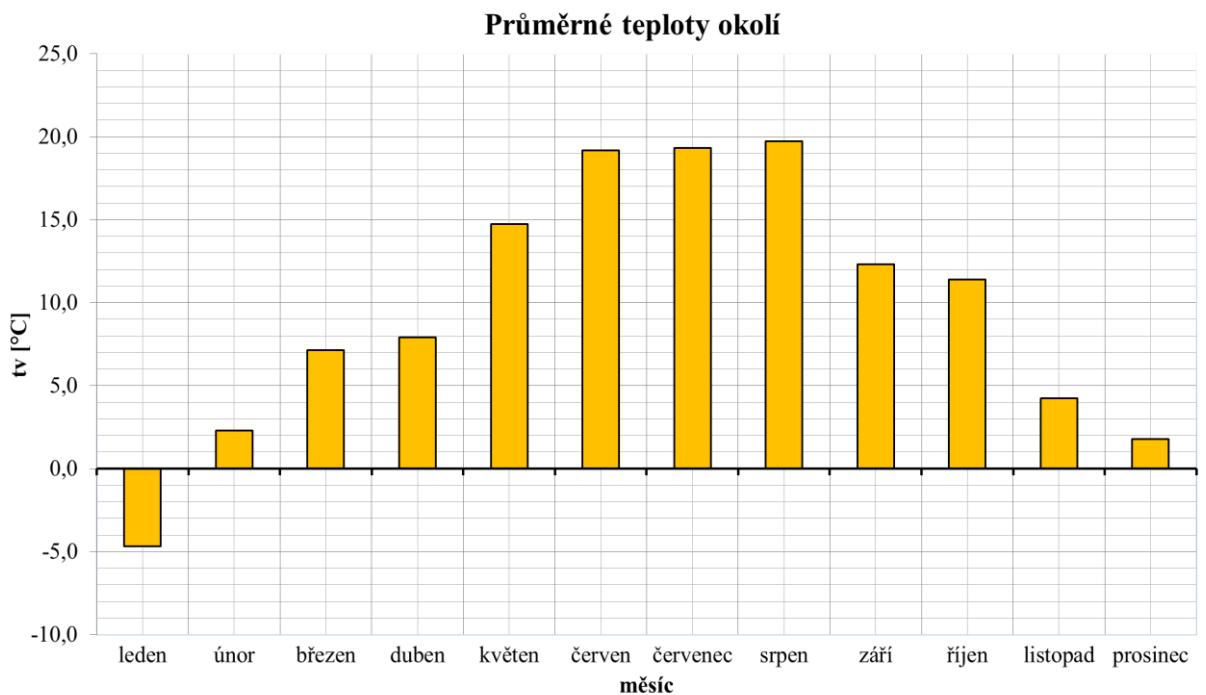
Průměrné množství dopadající energie na plochu pro jednotlivé měsíce



Graf č. 3.9: Průměrné množství dopadající energie na plochu pro jednotlivé měsíce - meteostanice



Graf č. 3.10: Průměrné hodnoty dopadající energie na plochu při sklonu 35° - meteostaice



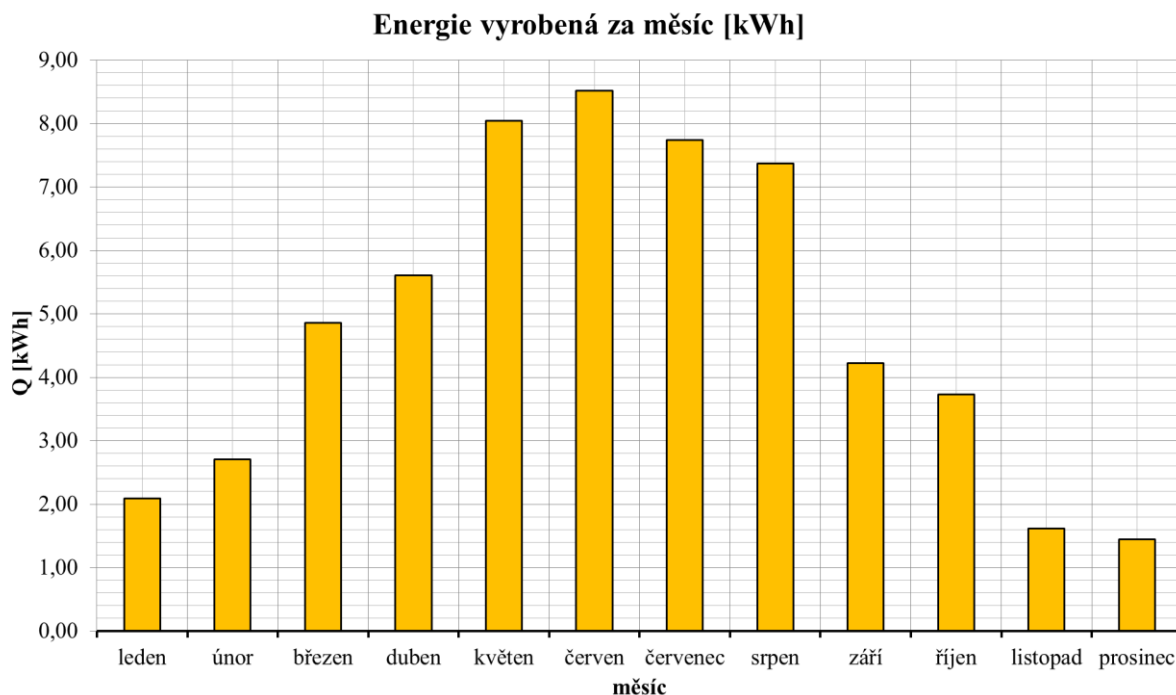
Graf č. 3.11: Průměrné teploty okolí vztažené ke každému měsíci - meteostaice

3.3.1 Výpočty z dat meteostanice

Postup výpočtů probíhal stejně jako u předchozích kapitol. V následující tabulce uvádím tedy jen vypočtené hodnoty. Pod tabulkou se nachází grafické zobrazení vypočteného množství vyrobené energie za rok.

Tabulka č. 3.6: Výsledné vypočtené hodnoty z meteostanice

měsíc	průměrná teplota [°C]	účinnost [-]	energie vyrobená plochou 1m ² [kWh/m ²]	energie vyrobená za den [kWh]	energie vyrobená za měsíc [kWh]
leden	-1,1	0,079	0,094	0,068	2,09
únor	7,5	0,078	0,134	0,097	2,71
březen	15,3	0,079	0,217	0,157	4,85
duben	17,3	0,079	0,260	0,187	5,61
květen	28,0	0,078	0,361	0,260	8,05
červen	33,6	0,077	0,394	0,284	8,52
červenec	32,0	0,077	0,347	0,250	7,74
srpen	31,8	0,077	0,330	0,238	7,37
září	19,5	0,077	0,196	0,141	4,23
říjen	17,6	0,077	0,167	0,120	3,73
listopad	7,4	0,076	0,075	0,054	1,61
prosinec	4,4	0,076	0,065	0,047	1,45



Graf č. 3.12: Grafické zobrazení vypočteného množství vyrobené energie za rok - meteostanice

3.3.2 Vyhodnocení výsledků dat z meteostanice

Ze získaných výsledků z meteostanice je patrné, že nejvíce množství vyrobené energie FV panel dosahuje v letních měsících, a to v červnu. Měsícem nejméně produktivním byl pak prosinec.

3.4 Simulace z dat meteostanice s použitím teplotních koeficientů

Poslední zvolenou metodou je simulace, ve které jsem použil teplotní koeficienty získané z výpočetních metod a data získané z meteostanice. Postup výpočtu se od předchozích v mnoha ohledech liší. Jedná se o dosažení intenzity slunečního záření, která byla získána ve formě mnoha matematických výpočtů. Všechny použité výpočty uvedu níže.

Prvním výpočtem jsem zjišťoval deklinaci Slunce. Jedná se o úhel(δ), jenž svírá spojnice středu Slunce se středem Země a rovinou zemského rovníku. Z toho je možné usoudit, že pro každý den v důsledku měnící se polohy Slunce a Země bude hodnota deklinace jiná. Vypočetl jsem tedy hodnotu deklinace pro každý den v roce dle vztahu níže (3.5). Vzhledem k rozsáhlé velikosti tabulky jsem ji zde neuvedl, avšak k nalezení je na přiloženém disku.

$$\delta = 23,45 * \sin(0,98 * D + 29,7 * M - 109) = \quad (3.5)$$

$$= 23,45 * \sin(0,98 * 2 + 29,7 * 1 - 109) = -22,8799^\circ$$

Kde:

D – číslo dne v měsíci

M – číslo měsíce v roce

Dalším nutným krokem k zjištění výšky slunce nad obzorem v konkrétní čas jsem použil výpočet časového úhlu slunce (τ). Výsledný vztah je stanoven pomocí časového úhlu slunce, hodnoty zeměpisné šířky a vypočtené deklinace slunce ze vztahu uvedeného výše. Výpočet jsem provedl v časovém intervalu pěti minut.

$$h = \sin^{-1}[\sin(\delta) * \sin(\varphi) + \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(\tau)] = \quad (3.6)$$

$$= \sin^{-1}[\sin(-22,879) * \sin(50) + \cos(-22,879) * \cos(50) * \cos(0)] = \mathbf{16,31^\circ}$$

Kde:

δ – deklinace Slunce [$^\circ$]

φ – zeměpisná šířka [$^\circ$]

τ – časový úhel slunce [$^\circ$]

Následujícím krokem jsem provedl výpočet azimutu Slunce (a), jenž je závislý na výšce slunce nad obzorem, deklinace a časového úhlu slunce.

$$a = \sin^{-1} \left[\frac{\cos(\delta)}{\cos(h)} \sin(\tau) \right] = \sin^{-1} \left[\frac{\cos(-22,879)}{\cos(16,31)} \sin(0) \right] = \mathbf{0^\circ} \quad (3.7)$$

Kde:

δ – deklinace Slunce [$^\circ$]

h – výška slunce nad obzorem [$^\circ$]

τ – časový úhel slunce [$^\circ$]

Další krok byl výpočet úhlu dopadu. Tento úhel se nachází mezi spojnicí středu Slunce, ozářenou plochou a vnější kolmicí vztyčenou nad ozářenou plochu.

$$\cos(\gamma) = \sin(h) * \cos(\alpha) + \cos(h) * \sin(\alpha) * \cos(a) = \quad (3.8)$$

$$= \sin(16,31) * \cos(35) + \cos(16,31) * \sin(35) * \cos(0) = \mathbf{0,779}$$

Kde:

α – úhel sklonu [$^\circ$]

h – výška slunce nad obzorem [$^\circ$]

a – azimut Slunce [$^\circ$]

Poslední krok je výpočet sluneční intenzity záření. Tu jsem získal z intenzity slunečního záření ze získaných dat z meteostanice a vynásobil ji úhlem dopadu. Tím jsem získal výstupní

hodnoty intenzity slunečního záření dopadající na plochu fotovoltaického panelu. Výsledný vztah je uveden níže (3.9).

$$I = I_n * \cos(\gamma) = 217 * 0,779 = \mathbf{169,3 \text{ W/m}^2} \quad (3.9)$$

Kde:

I_n – intenzita slunečního záření z meteostanice [W/m^2]

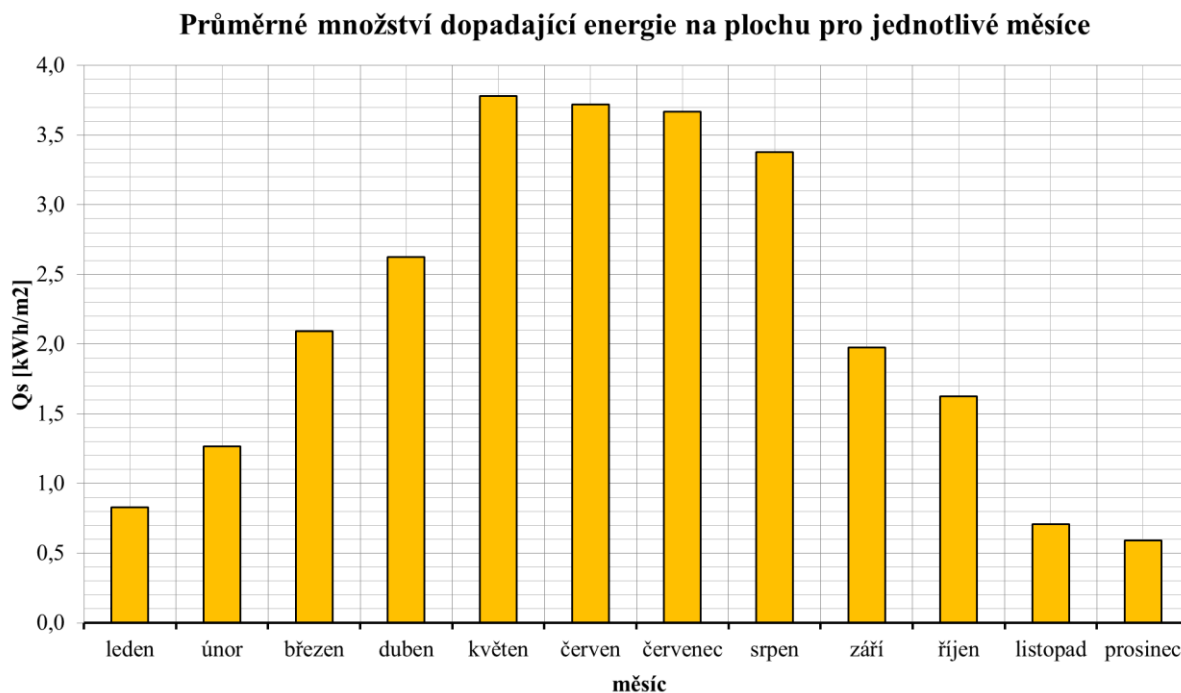
$\cos(\gamma)$ – úhel dopadu [rad]

Všechny výpočty byly provedeny v rozsahu pěti minut, a to pro každý den v roce. Kvůli obrovskému kvantu dat zde nepřikládám uskutečněné výpočty. Bude je však možné nalézt na přiloženém disku.

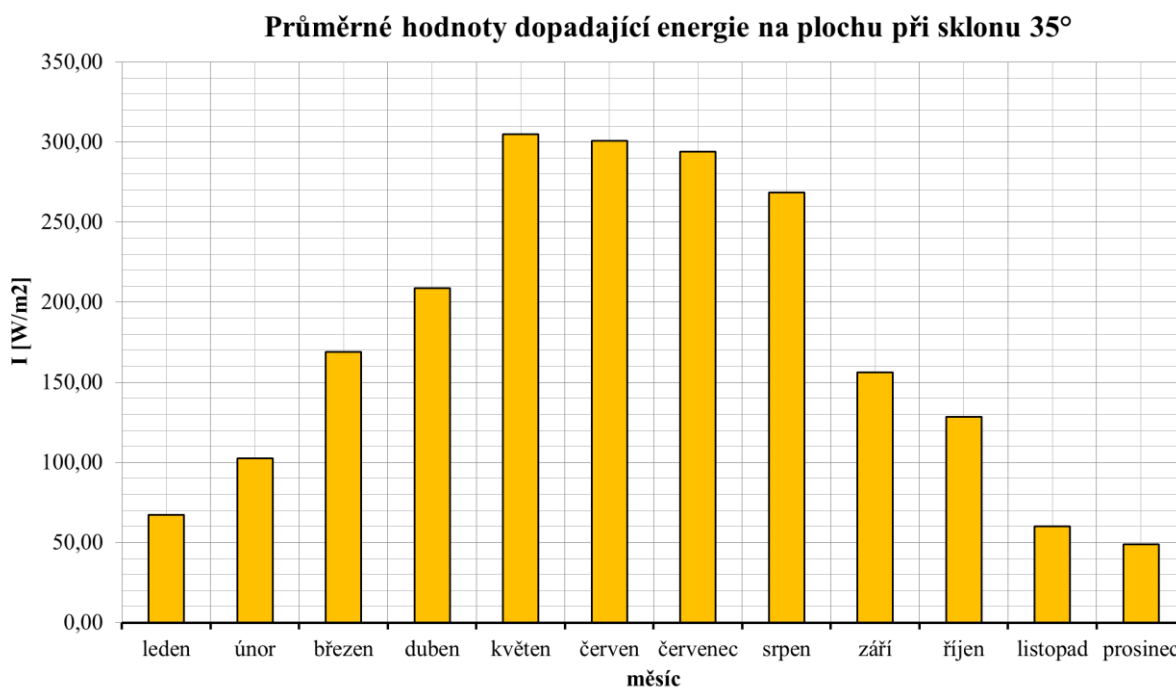
K výpočtům účinnosti, množství vyrobené energie fotovoltaickým panelem a energetickým bilancím je zapotřebí získat hodnoty množství dopadající energie. Pro jejich získání jsem použil výpočtovou hodnotu z předešlé kapitoly. Konkrétně výpočetní vztah 3.4. Stejně jsem učinil i v případě zjištění působících teplot prostředí. Hodnoty jsem použil z předešlé kapitoly 3.3. Simulace z dat meteostanice. Níže uvádím výsledné hodnoty v tabulce číslo 3.7.

Tabulka č. 3.7: Hodnoty získané a dopočtené z meteostanice s použitím teplotních koeficientů

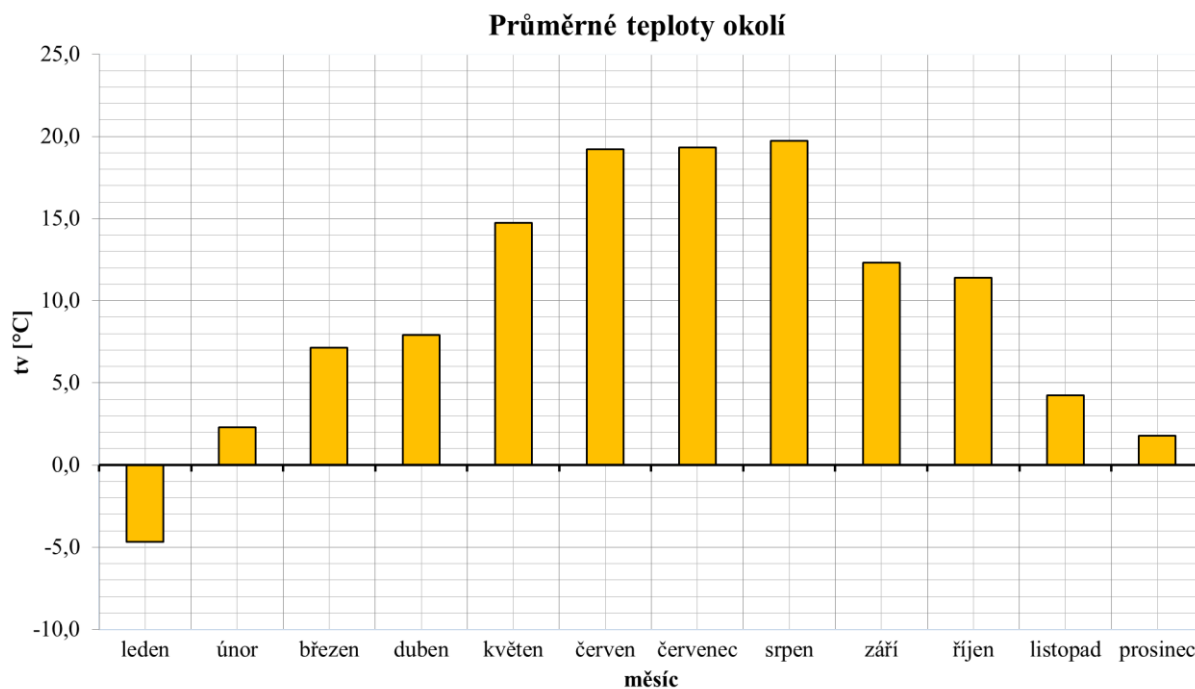
měsíc	teplota prostředí [$^{\circ}\text{C}$]	množství dopadající energie [kWh/m^2]	intenzita sluneční energie [W/m^2]
leden	-4,7	0,8	67
únor	2,3	1,3	102
březen	7,2	2,1	169
duben	7,9	2,6	209
květen	14,7	3,8	305
červen	19,2	3,7	301
červenec	19,3	3,7	294
srpen	19,7	3,4	269
září	12,3	2,0	156
říjen	11,4	1,6	129
listopad	4,2	0,7	60
prosinec	1,8	0,6	49



Graf č. 3.13: Průměrné množství dopadající energie na plochu pro jednotlivé měsíce – meteostanice s použitím teplotních koeficientů



Graf č. 3.14: Průměrné hodnoty dopadající energie na plochu při sklonu 35° – meteostanice s použitím teplotních koeficientů



Graf č. 3.15: Průměrné teploty okolí vztahované ke každému měsíci – meteostanice s použitím teplotních koeficientů

3.4.1 Výpočty z dat meteostanice s použitím teplotních koeficientů

Ve výpočtech z dat meteostanice s použitím teplotních koeficientů jsem postupoval odlišně oproti předchozím kapitolám. Zde jsem aplikoval teplotní koeficienty ohřevu a chladnutí. Všechny důležité informace o koeficientech a jejich výpočtech jsem uvedl v kapitole 2.1 Analýza chování fotovoltaických panelů. Celá tato simulační metoda je založena na matematickém výpočtu ohřevu a chladnutí FVP pomocí rovnic koeficientů. K získání teplotních hodnot jsem musel nejprve provést výpočty ze všech hodnot ze získání dopadající intenzity slunečního záření na plochu panelu.

Výpočty byly prováděny v rozsahu pěti minut, a to pro každý den v roce. Následný postup spočíval ve vyhodnocování přírůstku nebo úbytku nadcházející hodnoty teploty, a to pro každý bodu v čase, na který jsem podle chování aplikoval výpočetní vzorec. Mohly nastat tři stavy. První: hodnota následující převyšovala aktuální. Vyplývající použití, bylo použít výpočet pro ohřev fotovoltaického panelu. Ve druhém stavu, kdy hodnota následující byla menší než aktuální, došlo k použití výpočtu pro chladnutí. V případě, že hodnota slunečního záření vyšla nulová, bral jsem stav za ustálený a nebyl důvod k použití výpočtu pro ohřev nebo chladnutí.

Pro výpočet jsem použil následující rovnici. Za teplotu okolí jsem dosadil data získaná z meteostanice. Do teplotního koeficientu jsem dosadil získané aproximace naměřených a vypočtených hodnot. Získané aproximace je možné nalézt v kapitole 2.1 Analýza chování fotovoltaických panelů. V neposlední řadě hodnota časového intervalu byla pět minut. Výstupné hodnoty ze vztahu (3.9) jsou hodnoty koeficientu pro konkrétní hodnotu dopadající intenzity slunečního záření.

$$\begin{aligned} t_{FV} &= t_0 \pm (K_{TEP} * t) = & (3.10) \\ &= -1,4 - (0,000000002 * 169,4^3 - 0,000003 * 169,4^2 + 0,0015 * 5) = -1,3 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Kde:

t_0 – teplota okolí [$^\circ\text{C}$]

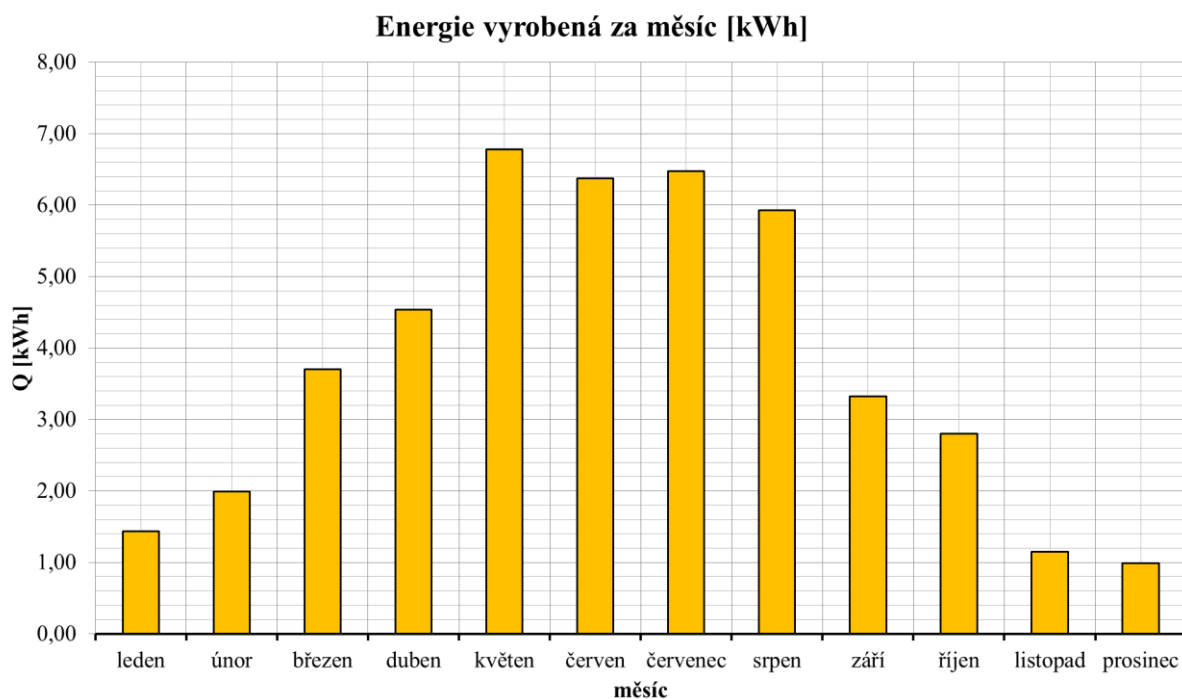
K_{TEP} – teplotní koeficient pro ohřev nebo chladnutí [$^\circ\text{C}/\text{min}$]

t – časový interval

Tento vztah jsem uplatnil na měření bez horního krytu konstrukce, s horním krytem konstrukce pro proudění větru do 3 m/s a s horním krytem konstrukce při proudění větru nad 3 m/s. Po aplikování jsem získal provozní teploty během daného dne, které jsem posléze zprůměroval k získání průměrných provozních teplot za měsíc. Z výsledných výpočtů jsem dále zjistil, že hodnoty mezi těmito postupy měření se téměř vůbec nelišily. Proto uvádím v následující tabulce pouze hodnoty pro jeden typ měření. Ostatní hodnoty jsou k možnému nahlédnutí v příloženém disku.

Tabulka č. 3.8: Výsledné vypočtené hodnoty z meteostanice s použitím teplotních koeficientů

měsíc	průměrná teplota [°C]	účinnost [-]	energie vyrobená plochou 1m ² [kWh/m ²]	energie vyrobená za den [kWh]	energie vyrobená za měsíc [kWh]
leden	-4,6	0,078	0,064	0,046	1,44
únor	2,4	0,078	0,099	0,071	1,99
březen	7,3	0,079	0,166	0,119	3,70
duben	8,1	0,080	0,210	0,151	4,54
květen	14,9	0,080	0,304	0,219	6,78
červen	19,3	0,079	0,295	0,212	6,37
červenec	19,5	0,079	0,290	0,209	6,48
srpen	19,9	0,079	0,266	0,191	5,93
září	12,5	0,078	0,154	0,111	3,32
říjen	11,5	0,077	0,126	0,090	2,80
listopad	4,3	0,075	0,053	0,038	1,15
prosinec	1,8	0,075	0,044	0,032	0,99



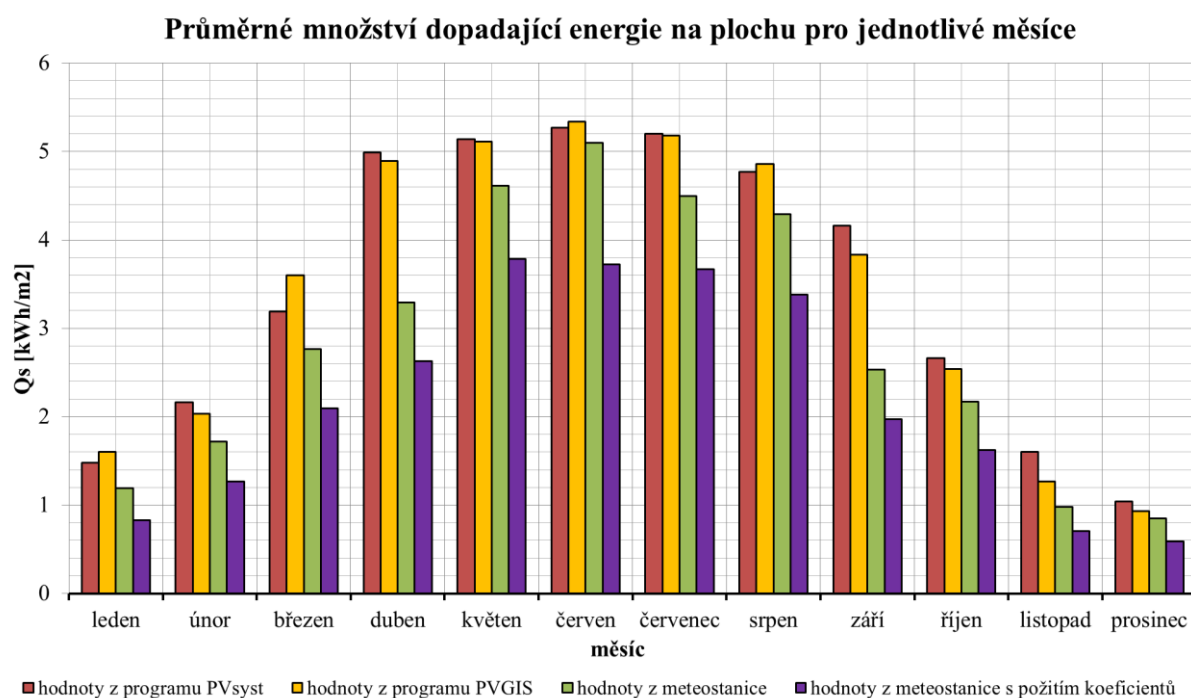
Graf č. 3.16: Grafické zobrazení vypočteného množství vyrobené energie za rok - meteostanice s použitím teplotních koeficientů

3.4.2 Vyhodnocení dat z meteostanice s použitím teplotních koeficientů

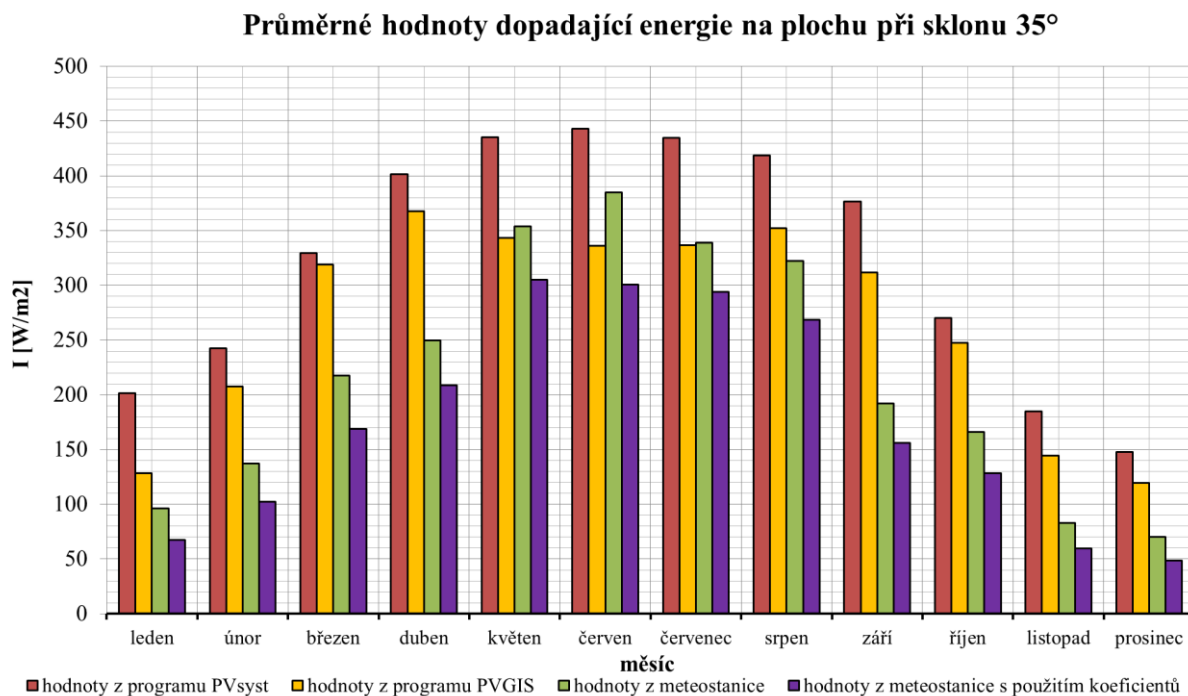
Z grafické závislosti pro vstupní data z meteostanice s použitím teplotních koeficientů je možné získat přehled o množství vyrobené energie pro konkrétní panel. Nejvíce vyrobené energie dosahuje v letních měsících, a to konkrétně v květnu. Naopak nejmenších výsledků dosahoval v prosinci.

3.5 Závěrečné vyhodnocení všech použitých metod

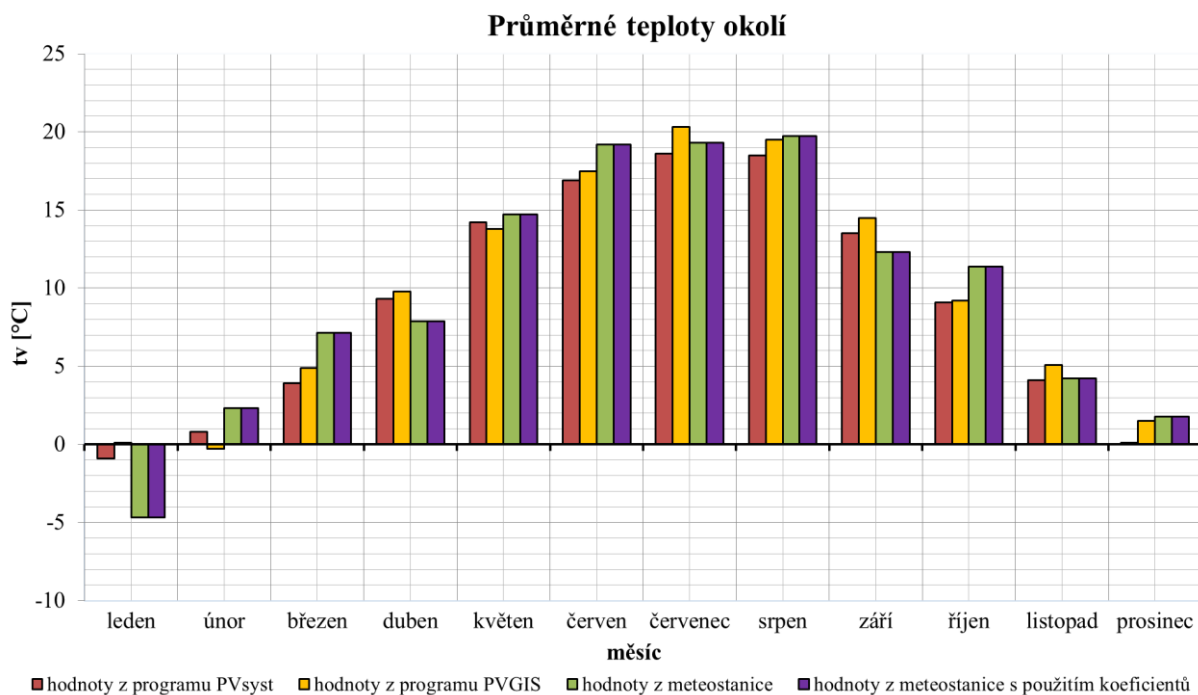
Závěrem kapitoly bych rád zhodnotil všechny použité simulační metody. Už při porovnání všech vstupních dat jsou patrné rozdíly. Jako první bych zmínil průměrné množství dopadající energie na plochu. Zde se simulační metoda PVGIS a PVsyst jen s nepatrnými odchylkami shoduje. Značný rozdíl je pak mezi těmito výpočetními programy a daty získanými a vypočtenými z meteostanice. Hodnoty průměrných teplot okolí jsou téměř stejné s výjimkou měsíce ledna. Dopadající energie na plochu panelu při sklonu 35 ° vycházely velice rozdílně. Největší hodnoty byly dosažené ve výpočetním programu PVsyst. Nejmenších hodnot pak dosahovala meteostanice s použitím teplotních koeficientů. Nutno podotknout, že data z meteostanice nejsou úplná, z důvodu výpadků. V některých měsících se jedná pouze o výpadek trvající maximálně několik hodin. U měsíce října se pak jedná o několik dní, a to konkrétně od 19. 10. 2017 až do 31. 10. 2017. Z tohoto důvodu mohou být data lehce zkreslená. Pro přehlednost jsem vytvořil grafické závislosti, které uvedu níže.



Graf č. 3.17: Souhrnné grafické porovnání výsledků simulací množství dopadající energie na plochu za měsíc

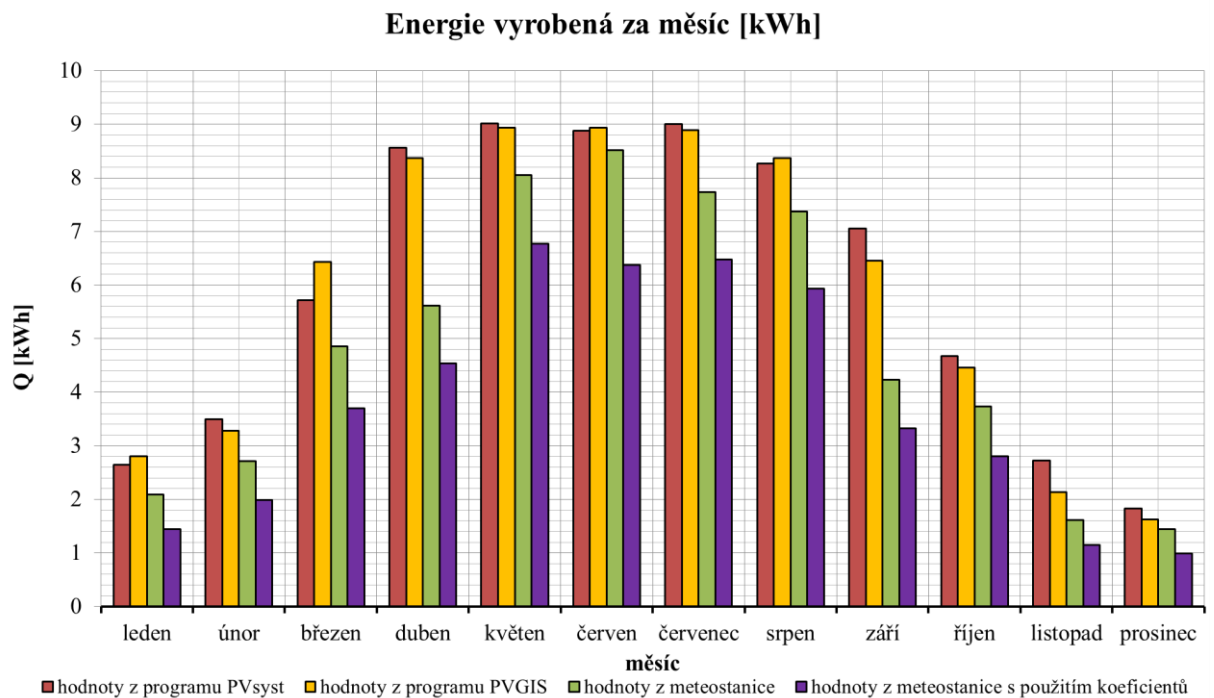


Graf č. 3.18: Souhrnné grafické porovnání výsledků simulací průměrné hodnoty dopadající energie na plochu při sklonu 35° za měsíc



Graf č. 3.19: Souhrnné grafické porovnání výsledků simulací průměrné teploty okolí za měsíc

Z výpočtů pro každou metodu jsou jako výstupní data uvedeny informace o tom, kolik energie je schopen daný panel vyrobit za měsíc. Výslednou grafickou závislost uvádím níže.



Graf č. 3.20: Souhrnné grafické porovnání výsledků simulací výroby elektrické energie za měsíc

Z grafické závislosti je zřetelný rozdíl mezi použitými výpočetními programy a jejich vstupními hodnotami. Rozdíl mezi výpočetním programem PVGIS a PVsyst je téměř nepatrný, a to i v případě odlišných vstupních hodnot. Zbylé dvě metody vycházejí ze stejného zdroje dat, nicméně se hodnoty v některých měsících od sebe výrazně liší. V simulacích pro metody výpočetních programů vyrobí fotovoltaický panel Calyxo CX60 nejvíce energie v květnu a v červenci. Nejméně pak v posledním měsíci v roce. U ostatních simulačních je neproduktivnější měsíc červen. V číslech je to pak tedy vztaženo za rok pro PVGIS $Q_{ROK} = 5,89$ kWh, PVsyst $Q_{ROK} = 5,99$ kWh, meteostanice $Q_{ROK} = 4,83$ kWh a pro meteostanici s použitím koeficientů, pouhých $Q_{ROK} = 3,79$ kWh.

4 Závěr

V první kapitole této práce je teoreticky rozebrán princip a funkce fotovoltaických panelů. Je zde podrobně vysvětlen fotoelektrický jev a jeho jednotlivé složky. Také tato kapitola vystihuje parametry fotovoltaického článku a jejich vliv na voltampérovou a výkonovou charakteristiku. Dále jsou zde popsány vlivy jako působení teploty nebo dopadající intenzity záření.

V druhé části práce popisují postup měření teplotních charakteristik fotovoltaického panelu za různých provozních podmínek. Mojí snahou bylo provést analýzu chování fotovoltaických panelů a dále pak vyhodnotit dosažené výsledky. K vyhodnocení jsem z praktického měření získal ohromné množství dat, ze kterých jsem musel vyseparovat ty, které pro mě byly přínosem. Po jejich vytřídění jsem docílil zjištění, jaký obrovský vliv má na proměňování teplotních charakteristik fotovoltaického panelu proměnlivost prostředí. Z dvou provedených odlišných typů měření se jako vhodnější osvědčilo proměňování teplotních charakteristik s odbouraným působením okolních nežádoucích vlivů.

Poslední kapitola mé diplomové práce pojednává o výpočtových simulačních metodách, ve kterých jsem uplatnil jednak svá změřená, vypočtená a vyhodnocená data, jednak také data získaná ze simulačních programů PVGIS a PVsyst. Cílem této kapitoly bylo získat hodnoty, ze kterých bude patrný podíl vyrobené energie v jednotlivých měsících při simulačních metodách se vstupními daty jak z výpočetních programů, tak rovněž z dat z místní meteostanice. Z těchto dat jsem docílil mnohem menších hodnot než z dat z výpočetních programů. Problém mohl nastat kvůli chybějícím datům meteostanice, ale také i kvůli uvažovanému období jednoho roku. Poslední metoda, v níž jsem použil výpočty koeficientů z druhé části diplomové práce, se mi tolik neosvědčila. Výsledné hodnoty byly k mému údivu o dost nižší, než jsem původně předpokládal.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KAMINSKÝ, Jaroslav a Mojmír VRTEK. Obnovitelné zdroje energie. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1998. ISBN 80-7078-445-8
- [2] MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [3] QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [4] BROŽ, Karel a Bořivoj ŠOUREK. Alternativní zdroje energie. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02802-x.
- [5] Fotovoltaické elektrárny – princip funkce a součásti, elektrárny v ČR. OEnergetice.cz [online]. Copyright © 2018 [cit. 22.05.2018]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/fotovoltaicka-elektrarna-princip-funkce-a-soucasti/>
- [6] Profielektrika [online].]<http://elektrika.cz/data/clanky/princip-fotovoltaickeho-clanku/view>
- [7] Úvod do FV systémů - CNE Czech Nature Energy, a. s. Hlavní strana - CNE Czech Nature Energy, a. s. [online]. Copyright © 2018 [cit. 22. 05. 2018]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>
- [8] Pro elektrotechniky [online]. <http://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/5.php>
- [9] BANNERT, Petr. VOŠ a SPŠE Varnsdorf. Praktika z fotovoltaiky [online]. 2012 [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: http://is.muni.cz/el/1441/jaro2012/FY2BP_EkO/um/praktika_z_fotovoltaiky.pdfhttps://is.muni.cz/el/1441/jaro2012/FY2BP_EkO/um/praktika_z_fotovoltaiky.pdf
- [10] Fyzikální podstata:: MEF. Fyzika:: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 22. 05. 2018]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/723-fyzikalni-podstata>
- [11] Vysoké učení technické v Brně [online]. Copyright © [cit. 22. 05. 2018]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68659https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68659
- [12] 301 Moved Permanently. 301 Moved Permanently [online]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/w/Fotoelektrick%C3%BD_jev

- [13] Kof.zcu [online].<https://kof.zcu.cz/st/dp/horsky/html/2fotoel.html>
- [14] 301 Moved Permanently. 301 Moved Permanently [online]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/6091-zaciname-s-fotovoltaickymi-panely-2-cast-strucny-prehled-trhu-v-cr>
- [15] I-V400w, Photovoltaic Testers, I-V Curve tracers | HT Instruments. [online]. Copyright © Italia S.r.L All rights reserved. HT Italia [cit. 22. 05. 2018]. Dostupné z: <https://www.ht-instruments.us/en-us/products/photovoltaic-testers/i-v-curve-tracers/i-v400w>/<https://www.ht-instruments.us/en-us/products/photovoltaic-testers/i-v-curve-tracers/i-v400w/>
- [16] PV potential estimation utility. JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission [online]. Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>
- [17] TZB-info [online]. <https://stavba.tzb-info.cz/denni-osvetleni-a-osluneni/8381-deklinace-slunce-v-prubehu-desetileti>
- [18] Raytek Raynger ST Thermometer | Buy Tools & Hardware | Buy Your Tools & Hardware At Webshop. Webshop - Cash Converters Australia Online Store | Buy or Bid For Used Items Online from All Over Australia [online]. Copyright © Cash Converters [cit. 22. 05. 2018]. Dostupné z: <https://webshop.cashconverters.com.au/item/2332009/raytek-raynger-st-thermometer>