



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

NÁVRH LABORATORNÍHO PRVKU ZAMĚŘENÉHO NA MĚŘENÍ FV PANELU ZA RŮZNÝCH TEPLIT

DESIGN OF A LABORATORY EQUIPMENT FOCUSED ON MEASURING A PV PANEL AT DIFFERENT TEMPERATURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Moravčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Šedina

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Daniel Moravčík

ID: 230498

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Návrh laboratorního prvku zaměřeného na měření FV panelu za různých teplot

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou vlivu vnější teploty na fotovoltaické články. Sestavte zařízení využívající kontrolér Arduino, které bude řídit a udržovat teplotu fotovoltaického článku. Pro regulaci teploty využijte pulzně šířkovou modulaci. Ověřte chování přípravku pro možné využití v laboratoři.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 1.6.2023

Vedoucí práce: Ing. Martin Šedina

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá teplotnou závislosťou výkonu fotovoltického článku a spôsobom regulácie jeho teploty. Taktiež sa zaoberá návrhom a realizáciou laboratórneho prvku, slúžiaceho na reguláciu teploty fotovoltického článku v laboratóriu. Teoretická časť rozoberá princíp fotovoltických článkov a ich elektrické parametre, nakoľko niektoré z nich sú predmetom merania, na ktoré je zhotovené zariadenie vyrobené. Teoretická časť sa následne ešte zaoberá najmä vplyvom okolitého prostredia na výkon článkov a ich spôsobmi chladenia v praxi. Samotná praktická časť popisuje návrh a zhotovenie laboratórneho prvku pre reguláciu teploty použitého pre nastavenie teploty fotovoltického článku, pričom sa najprv zameriava na elektrický návrh a následne na konštrukčné vyhotovenie. Nakoniec sa práca venuje overeniu funkcie vyhotoveného zariadenia, kedy je určená presnosť zariadenia.

Kľúčové slová

Fotovoltický článok, fotoelektrický jav, PN prechod, výkon, teplotná závislosť, teplotný koeficient, chladenie fotovoltických článkov, termoelektrický jav, termočlánok, Peltierov článok, Arduino, PWM signál

Abstract

The bachelor's thesis deals with the temperature dependence of the performance of a photovoltaic cell and the method of regulating its temperature. He also deals with the design and implementation of a laboratory element used to regulate the temperature of the photovoltaic cell in the laboratory. The theoretical part discusses the principle of photovoltaic cells and their electrical parameters, as some of them are the subject of measurement for which the device is made. The theoretical part then deals mainly with the influence of the surrounding environment on the performance of cells and their cooling methods in practice. The practical part itself describes the design and manufacture of a laboratory element for temperature regulation used to adjust the temperature of a photovoltaic cell, focusing first on the electrical design and then on the structural design. Finally, the work is devoted to the verification of the function of the manufactured device, when the accuracy of the device is determined.

Keywords

Photovoltaic cell, photoelectric phenomenon, PN junction, power, temperature dependence, temperature coefficient, cooling of photovoltaic cells, thermoelectric phenomenon, thermocouple, Peltier cell, Arduino, PWM signal

Bibliografická citácia

MORAVČÍK, Daniel. *Návrh laboratorního prvku zaměřeného na měření FV panelu za různých teplot* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-31]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/152424>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Martin Šedina.

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko študenta: *Daniel Moravčík*

VUT ID študenta: *230498*

Typ práce: *Bakalárska práca*

Akademický rok: *2022/23*

Téma záverečnej práce: *Návrh laboratorního prvku zaměřeného na měření FV panelu za různých teplot*

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/ho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 1. júna 2023

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu semestrálnej práce Ing. Martinovi Šedinovi za metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc, a ďalšie podnetné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce. Taktiež by som chcel poďakovať aj Ing. Jiřímu Starému, Ph.D., za umožnenie a pomoc pri výrobe dosky plošných spojov na ústave elektrotechnológie.

V Brne dňa: 1. júna 2023

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ZOZNAM TABULIEK	10
ÚVOD	11
1. FOTOVOLTICKÝ ČLÁNOK	12
1.1 FOTOELEKTRICKÝ JAV.....	12
1.2 PRECHOD PN.....	13
1.3 ELEKTRICKÉ PARAMETRE FOTOVOLTICKÉHO ČLÁNKU	15
1.3.1 Náhradná schéma	15
1.3.2 Zaťažovacia a výkonová charakteristika.....	16
1.3.3 Parametre odčítané zo zaťažovacej charakteristiky.....	16
1.4 VPLYV OKOLITÉHO PROSTREDIA	18
1.4.1 Vplyv teploty.....	18
1.4.2 Vplyv intenzity žiarenia.....	20
2. CHLADENIE FOTOVOLTICKÝCH ČLÁNKOV.....	22
2.1 PASÍVNE CHLADENIE	22
2.2 AKTÍVNE CHLADENIE	23
3. RIEŠENIE ELEKTRICKEJ ČASTI ZARIADENIA	25
3.1 BLOKOVÁ SCHÉMA.....	25
3.2 SCHÉMA ZAPOJENIA	26
3.3 RIADIACA JEDNOTKA	27
3.3.1 Platforma Arduino	27
3.3.2 Arduino UNO R3 (klon).....	27
3.3.3 Program.....	29
3.4 NAPÁJACÍ ZDROJ	31
3.5 SNÍMANIE TEPLoty	32
3.6 REGULÁCIA TEPLoty	34
3.6.1 Peltierov článok.....	34
3.6.2 Chladenie Peltierovho článku.....	35
3.7 REGULÁCIA ELEKTRICKÉHO PRÚDU	37
3.7.1 Výber tranzistorov.....	39
3.7.2 Výber budičov.....	40
3.8 NASTAVENIE TEPLoty	41
3.9 ZOBRAZENIE TEPLoty.....	41
3.10 NÁVRH A VÝROBA DPS.....	42
3.10.1 Základný materiál	42
3.10.2 Návrh DPS	43
3.10.3 Výroba a osadenie DPS.....	44
4. KONŠTRUKČNÉ ZHOTOVENIE ZARIADENIA.....	46
4.1 KONŠTRUKČNÁ KRABIČKA	46
4.1.1 Výber.....	46
4.1.2 Zhotovenie otvorov.....	47

4.1.3	<i>Umiestnenie prvkov</i>	48
4.1.4	<i>Rám pre LCD displej</i>	49
4.2	OHRIEVACÍ PANEL	50
4.2.1	<i>Koncepcia</i>	50
4.2.2	<i>Svorky</i>	51
4.2.3	<i>Izolácia</i>	52
4.2.4	<i>Upevnenie chladenia</i>	52
4.2.5	<i>Termočlánok</i>	53
4.2.6	<i>FV článok</i>	53
5.	OVERENIE ČINNOSTI ZARIADENIA	55
5.1	<i>CHYBA NASTAVENIA TEPLoty</i>	55
6.	ZÁVER	59
	LITERATÚRA	60
	ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	64
	ZOZNAM PRÍLOH	66

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Tvorba hradlovej vrstvy na prechode PN (prevzaté z [4])	13
1.2	Volt-ampérová charakteristika fotodiódy (prevzaté z [3])	14
1.3	Náhradná schéma fotovoltického článku (prevzaté z [8])	15
1.4	Zaťažovacia a výkonová charakteristika fotovoltického článku (prevzaté z [10])	16
1.5	Vplyv teploty na výkon fotovoltického článku (prevzaté z [12])	18
1.6	Vplyv šírky zakázaného pásma na veľkosť teplotného koeficientu (prevzaté z [14])	19
1.7	Teplotné koeficienty jednotlivých FV článkov (prevzaté z [15])	20
1.8	Vplyv intenzity žiarenia na výkon FV článku (prevzaté z [16])	21
2.1	Pasívne vzdušné chladenie a) bez modifikácie b) s použitím plechu c) s použitím rebier (prevzaté z [17])	22
2.2	Konštrukcia tepelnej trubice (prevzaté z [18])	23
2.3	Aktívne chladenie a) vzduchom b) vodou (prevzaté z [17])	24
3.1	Bloková schéma laboratórneho prvku na reguláciu teploty FV článku	25
3.2	Schéma zapojenia elektrickej časti zariadenia	26
3.3	Klon vývojovej dosky Arduino UNO R3 (prevzaté z [21])	27
3.4	Priemyselný napájací zdroj (prevzaté z [22])	32
3.5	Klasický termočlánok typu K	32
3.6	A/D prevodník MAX6675	33
3.7	Polovodičový Peltierov článok	34
3.8	Rebrový chladič (pasívne chladenie)	36
3.9	Elektrický ventilátor (aktívne chladenie)	36
3.10	Použitý h-mostík	37
3.11	Rotačný enkodér (bez pull-up rezistorov)	41
3.12	LCD displej (80 znakov)	42
3.13	Návrh vytvorenej DPS (modrá - vrch, červená - spodok)	43
3.14	Vodivé cesty na vrchnej strane DPS	44
3.15	Vodivé cesty na spodnej strane DPS	44
3.16	Osadená DPS (vrchná strana)	45
3.17	Osadená DPS (spodná strana)	45
4.1	Vyhotovené zariadenie	46
4.2	Konštrukčná krabička (prevzaté z [29])	47
4.3	Vytvorenie otvorov v krabičke	47
4.4	Osadenie elektrických periférií v otvoroch	48
4.5	Umiestnenie prvkov v krabičke (bez kabeláže)	48
4.6	Umiestnenie prvkov v krabičke (s kabelážou)	49
4.7	Vyrobený plastový rám	49
4.8	Konštrukcia ohrievacieho panelu	50
4.9	Konštrukcia regulačnej časti panelu	50
4.10	Vyrobené svorky pre ohrievací panel	51
4.11	Použité konektory na svorke	51
4.12	Izolácia na kovovej platni	52
4.13	Uchytenie ventilátora ku chladiču	52
4.14	Uchytenie termočlánku na kovovú platňu	53
4.15	Použitý FV článok (vľavo-vrch, vpravo-spodok)	54
5.1	Snímka merania termokamerou pri teplote 15 °C a 35 °C	55
5.2	Graf korekčnej krivky nastavenia teploty	58

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 3.1	Parametre klonu Arduino UNO R3 (prevzaté z [20]).....	28
Tabuľka 3.2	Parametre napájacieho zdroja (prevzaté z [22])	31
Tabuľka 3.3	Parametre A/D prevodníku MAX6675 (prevzaté z [23])	33
Tabuľka 3.4	Parametre Peltierovho článku (prevzaté z [24])	35
Tabuľka 3.5	Parametre použitých tranzistorov (prevzaté z [26]).....	39
Tabuľka 3.6	Vypočítané hodnoty strát tranzistorov.....	40
Tabuľka 3.7	Parametre budiča TC4420 (prevzaté z [28]).....	40
Tabuľka 4.1	Parametre FV článku (prevzaté z [31]).....	53
Tabuľka 5.1	Namerané hodnoty teploty FV článku.....	56
Tabuľka 5.2	Priemerné hodnoty nameraných teplôt.....	56
Tabuľka 5.3	Vypočítané chyby a korekcie snímania teploty	57

ÚVOD

Elektrická energia sa v súčasnej dobe považuje za úplne bežnú súčasť života, ktorej spotreba sa stále zväčšuje. To však zväčšuje spotrebu prírodných zdrojov energie, ktoré sú v prípade neobnoviteľných zdrojov limitované ich množstvom a zároveň majú nežiadúci vplyv na životné prostredie. V posledných desaťročiach sa preto ľudstvo snaží, čo najviac eliminovať ekologický dopad výroby elektrickej energie. Z tohto dôvodu sa spoločnosť viac zameriava na premenu elektrickej energie zo zdrojov prírody, ktoré sú obnoviteľné a teda nevyčerpatelne. Jeden z týchto zdrojov prírody je aj slnečné žiarenie, ktoré je zároveň najdostupnejším a najčistejším zdrojom energie na Zemi.

Priama premena slnečnej energie na elektrickú sa realizuje prostredníctvom fotovoltického článku, pričom snaha spočíva v tom, aby na elektrickú energiu bola premenená všetka energia dopadajúceho slnečného žiarenia. To je však z technologického hľadiska nemožné. Napriek tomu sa technológie stále vyvíjajú za účelom dosiahnutia čo najväčšej účinnosti tejto premeny. Existujú však ďalšie faktory, ktoré túto účinnosť ovplyvňujú. Sú to najmä teplota článku a intenzita dopadajúceho žiarenia. Nakoľko účinnosť fotovoltických článkov nepresahuje ani 30 % a vývoj technológií potrvá určitý čas, je žiadúce, aby sa negatívny vplyv týchto vonkajších faktorov čo najviac eliminoval a tým sa zachovala najväčšia možná účinnosť premeny slnečnej energie.

Hlavným predmetom tejto práce je práve teplotná závislosť účinnosti fotovoltického článku, ktorá má byť meraná v laboratórnych podmienkach. Prvá časť tejto práce sa preto zaoberá fotovoltickým článkom z pohľadu princípu a elektrických parametrov, ktoré sú závislé od vonkajších faktorov, najmä od teploty. V ďalšej časti je opísaný samotný vplyv teploty na výkon článku a sú rozoberané základné možnosti chladenia článkov. Praktická časť práce sa zameriava na návrh a realizáciu laboratórneho zariadenia, ktorého funkcia spočíva v dosiahnutí a udržaní nastavenej teploty fotovoltického článku. Toto zariadenie by malo byť následne schopné pre použitie v laboratórnej úlohe zameranej na meranie teplotnej závislosti výkonu fotovoltického článku v rámci semestrálneho kurzu zameraného na výuku obnoviteľných zdrojov (Vybrané partie z obnoviteľných zdrojů a ukládání energie).

1. FOTOVOLTICKÝ ČLÁNOK

Fotovoltický článok je základným prvkom, ktorý umožňuje priamo premieňať slnečné žiarenie na elektrickú energiu využívajúc polovodičový prechod PN pomocou fotoelektrického javu prebiehajúceho bez vytvárania hluku a emisií, pričom zároveň proces premeny energie nevyžaduje spotrebu akýchkoľvek látok. Jeho história siaha do roku 1883, kedy Charles Fritts, americký vynálezca, zostrojil prvý fotovoltický článok s použitím selénu, ktorý nedosahoval účinnosť ani 1 %. Od tej doby, po rokoch technologických vylepšení sa fotovoltický článok v súčasnosti používa z rozličných materiálov v rôznych druhoch zariadení, pričom dosahuje laboratórnu účinnosť približne až 40 % a jeho výskum pokračuje s cieľom znižovať náklady na výrobu a zvyšovať účinnosť premeny energie. [1]

1.1 Fotoelektrický jav

Základným princípom FV (fotovoltického) článku je práve fotoelektrický jav, ktorý umožňuje premenu energie slnečného žiarenia na energiu elektrickú. Pri tomto jave dochádza k uvoľňovaniu elektrónov z látky v dôsledku absorpcie elektromagnetického žiarenia danou látkou. Daný proces uvoľnenia elektrónov vychádza z predpokladu fyzika Maxa Plancka z roku 1900, že svetlo nemôže predávať energiu spojito, ale po určitých dávkach, ktorých veľkosť sa mení podľa vlnovej dĺžky žiarenia, pričom najmenšia možná veľkosť predanej dávky sa nazýva kvantum alebo fotón. Toto kvantum môže mechanicky interagovať s časticami hmoty a teda okrem svojej energie má aj svoju hybnosť, čo dovoľuje sa naň pozeráť ako na časticu. Žiarenie sa následne môže v konečnom dôsledku chápať ako prúd častíc, ktoré podliehajú bežným mechanickým zákonom zachovania energie a hybnosti. Svetlo tak nadobúda ako spojité, tak časticový charakter. Pre energiu fotónu potom platí

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

kde h predstavuje planckovú konštantu ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s), f je frekvencia dopadajúceho žiarenia [Hz], c je rýchlosť svetla ($3 \cdot 10^8$ m/s) a λ je vlnová dĺžka dopadajúceho žiarenia [m]. [2]

Na základe časticového charakteru fotónov dochádza pri absorpcii svetla hmotou k interakcii fotónov žiarenia s elementárnymi časticami hmoty, pričom pre správnu funkciu FV článku je potrebná práve interakcia fotónu s viazanými elektrónmi vo väzbe polovodiča, kvôli vzniku páru elektrón-diera. [2]

Rovnica, ktorá vyjadruje fotoelektrický jav je vo svojej podstate zákon zachovania energie a vyplýva z nej, že každý jeden dopadajúci fotón je schopný predať jeho energiu

práve jednému elektrónu, ktorej časť sa spotrebuje na prekonanie väzbovej energie a zvyšná časť sa premení na kinetickú energiu daného elektrónu

$$f = \phi + E_K \quad [J], \quad (1.2)$$

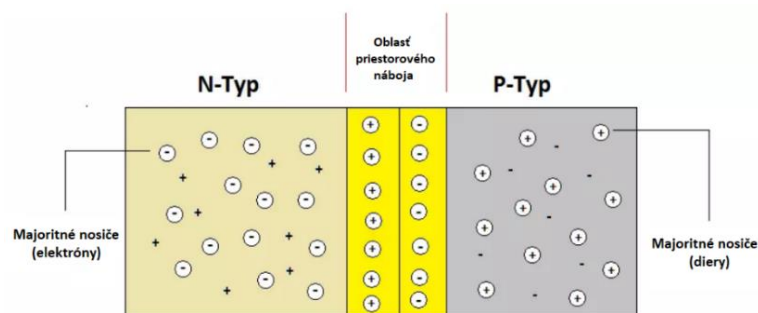
kde h predstavuje planckovú konštantu ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s), f je frekvencia dopadajúceho žiarenia [Hz], ϕ je výstupná práca elektrónu [J] a E_K je kinetická energia elektrónu [J]. [2]

Pre FV článok je však dôležité, aby energia dopadajúceho žiarenia bola dostatočne veľká na uvoľnenie elektrónu z väzby atómu polovodiča, no zároveň dostatočne malá na to, aby zostali vo vnútri jeho materiálu a mohli byť využité pre tvorbu elektrickej energie. Tento typ fotoelektrického javu sa nazýva vnútorný. Slnčné svetlo túto požiadavku splňuje, nakoľko jeho spektrum elektromagnetického žiarenia svojou vlnovou dĺžkou odpovedá požadovanej energii. [2]

1.2 Prechod PN

Fotovoltické články sa zhotovujú z polovodičov, ktoré predstavujú látky s elektrickou vodivosťou nachádzajúcou sa niekde medzi vodivosťou dielektrik a kovov. Disponujú vlastnosťou stať sa elektricky vodivými v závislosti od dodanej energie. [3]

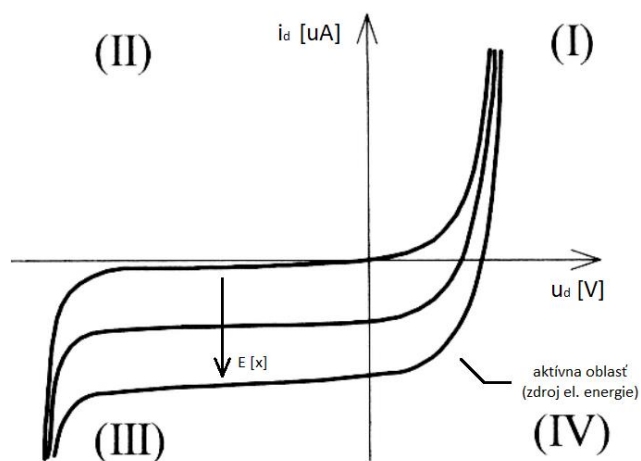
V štruktúre FV článku sa nachádzajú vedľa seba dve rozdielne dotované polovodičové oblasti s rozdielnym typom vodivosti. Jedná sa o fotodiódu, ktorej jedna oblasť je dotovaná kladne a druhá záporne, pričom medzi týmito oblasťami vzniká elektrické pole v dôsledku rozdielnej koncentrácie elektrónov v dotovaných oblastiach a tak dochádza k následnému prechodu elektrónov z polovodiča typu N do oblasti polovodiču typu P (viď Obrázok 1.1). Takto vzniká oblasť priestorového náboja, kedy v polovodiči typu P zostávajú záporne nabité atómy a v polovodiči typu N naopak kladné. Týmto spôsobom je vzniknuté elektrické pole orientované v opačnom smere ako je pohyb nosičov náboja, čím sa difúzia v určitej miere ukončí. [3]



Obrázok 1.1 Tvorba hradlovej vrstvy na prechode PN (prevzaté z [4])

Pri dopade svetla na FV článok určitá časť fotónov dodáva energiu elektrónom, ktorá je dostačujúca pre ich uvoľnenie z atómovej mriežky polovodiča. Takto uvoľnené elektróny po sebe zanechajú menej záporné miesto v mriežke, teda diery. V prípade, že fotón s dostačujúcou energiou dopadne do oblasti PN prechodu, sú vygenerované nosiče elektrického náboja (elektrón, diery) prostredníctvom difúzneho napätia odsávané mimo priestor prechodu, pričom diery smerujú do oblasti P a elektróny do oblasti N. V dôsledku toho, sa tieto oblasti polarizujú rozdielne a vzniká rozdiel potenciálov. Spojením P a N oblastí vonkajším elektrickým obvodom, začne ním tiecť elektrický prúd. Nosiče, ktoré sú vygenerované v oblasti mimo prechodu musia difundovať k oblasti elektrického poľa. To má za následok, že môže nastať situácia, kedy nosiče náboja zrekombinujú skôr ako sa dostanú do oblasti priestorového náboja, čím sa neuplatnia na vzniknutom elektrickom prúde. [3]

Zapojením záťaže do obvodu medzi vzniknuté nábojové oblasti, FV článok, respektíve fotodióda, dodáva do záťaže elektrický prúd, pričom sa na nej vytvorí úbytok napätia, ktorý má rovnakú polaritu ako tečúci prúd. FV článok sa tak v obvode správa ako zdroj energie, kedy je jeho polarita napätia a prúdu opačná. Na nasledujúcom obrázku je tento režim naznačený v štvrtom kvadrante volt-ampérovej charakteristiky fotodiódy, pričom sa označuje ako hradlový režim (viď Obrázok 1.2). [3]



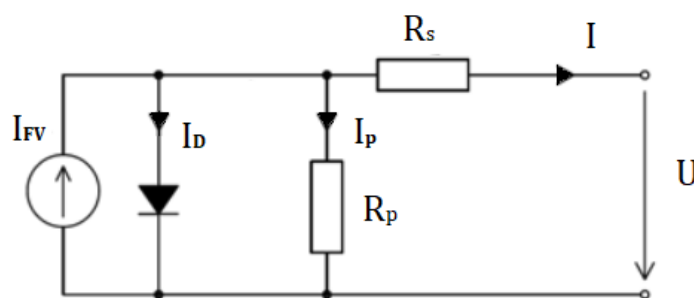
Obrázok 1.2 Volt-ampérová charakteristika fotodiódy (prevzaté z [3])

1.3 Elektrické parametre fotovoltického článku

Elektrické vlastnosti jednotlivých fotovoltických článkov alebo panelov odrážajú ich elektrické parametre, ktoré následne môžu byť porovnávané medzi sebou. Nakoľko sú však elektrické parametre FV článkov citlivé aj na okolité faktory prostredia, ich hodnoty sa merajú pri takzvaných štandardných skúšobných podmienkach (Standard Test Conditions, STC), ktoré stanovujú teplotu článku $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, hodnotu ožiarenia 1000 W/m^2 a spektrum pri $AM=1,5$. [5]

1.3.1 Náhradná schéma

Na fotovoltický článok je nedostatočné hľadiť iba ako na samostatnú fotodiódu, pri ktorej celé premenené množstvo slnečnej energie na elektrickú je využité na spotrebu užívateľa. Naopak, je potrebné uvažovať aj straty, ktoré vyplývajú z ďalších elektrických vlastností diódy a tiež prírodných vodičov. Potom je možné článok popisovať pomocou náhradnej schémy (viď Obrázok 1.3). Oblasť PN prechodu pri ožiarení slnečným svetlom generuje elektrický prúd, ktorý v schéme predstavuje ideálny zdroj prúdu, pričom jeho veľkosť je priamo úmerná svetelnému toku. Zároveň pri ožiarení PN prechodu taktiež dochádza ku kladnému nabíjaniu oblasti typu P a k zápornému nabíjaniu oblasti typu N. Nastáva tak situácia, kedy prechod PN je priepustne polarizovaný a určitá časť generovaného prúdu (I_D) prechádza znázornenou diódou. Ďalšie prúdové straty (I_P) vznikajú v dôsledku technologických nedokonalostí článkov, ktoré predstavuje rezistor (R_P) paralelne zapojený k dióde. Sériovo zapojený odpor (R_S) simuluje zaťaženie elektrických vodičov, na ktorých nastáva úbytok napätia, čím je ovplyvnené výstupné napätie článku. [6] [7]



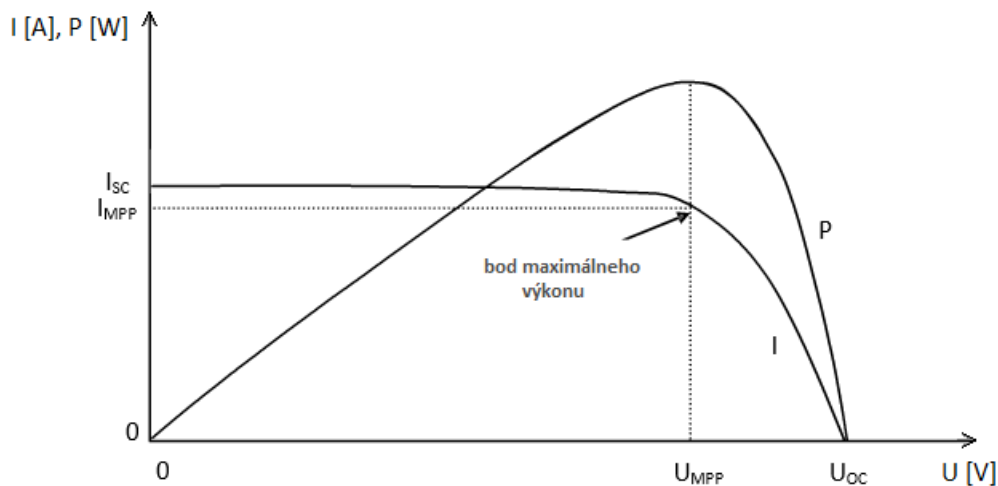
Obrázok 1.3 Náhradná schéma fotovoltického článku (prevzaté z [8])

1.3.2 Zaťažovacia a výkonová charakteristika

Zaťažovacia charakteristika poskytuje základné informácie o prevádzke FV článku ako zdroja elektrickej energie. Vo svojej podstate zobrazuje závislosť medzi elektrickým napätím a prúdom generovaných FV článkom. [6] [9]

Výkonová charakteristika následne vychádza zo zaťažovacej charakteristiky, kedy z okamžitých veľkostí hodnôt napätia a prúdu je možné pomocou ich súčinu vypočítať hodnoty okamžitého výkonu článku. [6] [9]

Z kriviek týchto charakteristík (viď Obrázok 1.4) je potom možné odčítať a vypočítať niektoré dôležité elektrické parametre FV článku. Charakteristiky sa určujú pri konštantnej hodnote intenzity žiarenia a teploty, pričom v závislosti od ich veľkostí je možné porovnávať jednotlivé charakteristiky. [6] [9]



Obrázok 1.4 Zaťažovacia a výkonová charakteristika fotovoltického článku (prevzaté z [10])

1.3.3 Parametre odčítané zo zaťažovacej charakteristiky

Prúd nakrátko (I_{sc})

Skratový prúd je maximálny prúd, ktorý je článok schopný produkovať. Maximálny prúd je generovaný v stave, kedy na výstupe článku je nulový úbytok napätia a teda vonkajší obvod je v skrute. V zaťažovacej charakteristike predstavuje hraničnú hodnotu prúdu. Môže byť závislý ako od technológie článku, tak aj od vonkajších vplyvov prostredia ako je uhol dopadu slnečného žiarenia, teplota alebo intenzita svetla. [6] [9]

Napätie naprázdno (U_{0C})

Napätie naprázdno je maximálne napätie na výstupe článku. Je ho možné dosiahnuť v prípade, že vonkajším obvodom netečie žiadny prúd. V zaťažovacej krivke predstavuje hraničnú hodnotu napätia. Jeho hodnota je závislá na technológii článku a vonkajších vplyvoch ako je to aj v prípade skratového prúdu. [6] [9]

Bod maximálneho výkonu (MPP-Maximum power point)

FV článok je schopný generovať rozlične veľký elektrický výkon, nakoľko dokáže pracovať v rôznych kombináciách veľkosti elektrického prúdu a napätia. Avšak pre každý fotovoltaický článok existuje vo svojej zaťažovacej a výkonovej charakteristike taký pracovný bod, pri ktorom je dosiahnutý najväčší výkon článku. Tento bod sa nazýva bod maximálneho výkonu. Maximálnu hodnotu výkonu je pritom možné vypočítať

$$P_{MPP} = U_{MPP} * I_{MPP} [W], \quad (1.3)$$

kde U_{MPP} predstavuje generované napätie [V] a I_{MPP} generovaný prúd [A], pri ktorých FV článok generuje maximálny výkon. [6] [9]

Činiteľ plnenia (FF-Fill factor)

Činiteľ plnenia je vo svojej podstate meradlom technologickej kvality článku. Počíta sa ako podiel maximálneho výkonu článku a teoretického výkonu, ktorý je definovaný pomocou napätia naprázdno (U_{0C}) a prúdu nakrátko (I_{SC}). Typické hodnoty činiteľa plnenia sa pohybujú od 0,5 do 0,82. Často sa tiež udáva v percentách. Jeho hodnotu je tak možné vypočítať

$$FF = \frac{U_{MPP} * I_{MPP}}{U_{0C} * I_{SC}} [-], \quad (1.4)$$

kde U_{MPP} predstavuje generované napätie [V] a I_{MPP} generovaný prúd [A], pri ktorých FV článok generuje maximálny výkon. U_{0C} je napätie naprázdno [V] a I_{SC} je prúd nakrátko [A]. [6] [9]

Účinnosť (η)

Účinnosť fotovoltaického článku je jeden z najpodstatnejších parametrov pri výbere článku, ktorý charakterizuje aké množstvo energie dopadajúceho žiarenia dokáže článok premeniť na energiu elektrickú. Účinnosť je potom definovaná ako podiel okamžitého výkonu článku a výkonu dopadajúceho žiarenia. Pri výpočte maximálne dosahovanej hodnoty účinnosti FV článku sa okamžitý výkon počíta z maximálnych dosiahnutých hodnôt napätia a prúdu

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{in}} = \frac{U_{MPP} * I_{MPP}}{P_{in}} [-], \quad (1.5)$$

kde U_{MPP} predstavuje generované napätie [V] a I_{MPP} generovaný prúd [A], pri ktorých FV článok generuje maximálny výkon. P_{in} je výkon dopadajúceho žiarenia [W]. [6] [9]

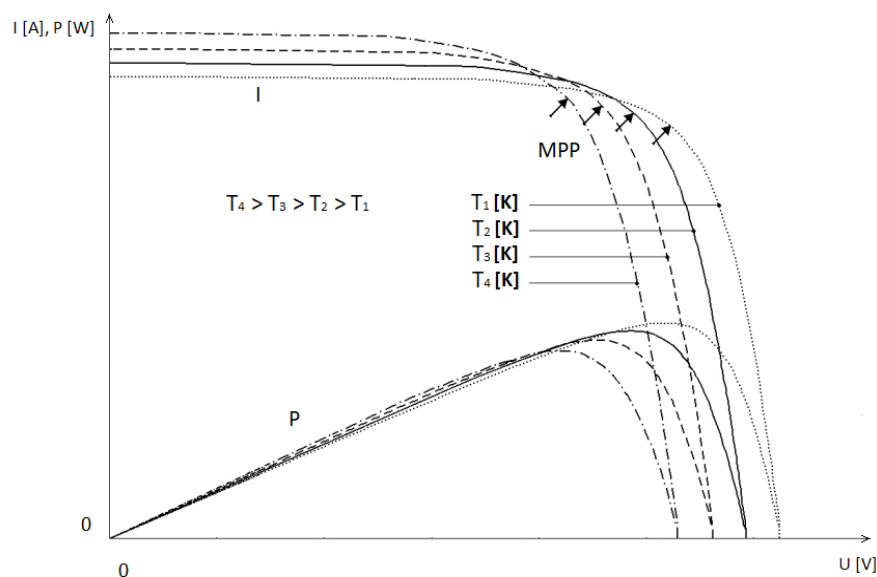
1.4 Vplyv okolitého prostredia

Fotovoltaické panely a teda fotovoltaické články len zriedkavo pracujú v laboratórnych podmienkach. Naopak, sú to zariadenia, ktoré sa používajú najmä v exteriéry. To však znamená, že meniace sa počasie mení aj podmienky, v ktorých články pracujú. Elektrické parametre článkov sa tak v priebehu dňa a celej prevádzky menia, pričom najzásadnejší vplyv na ich hodnoty má meniaci sa teplota a intenzita dopadajúceho žiarenia. [9]

1.4.1 Vplyv teploty

Nakoľko fotovoltaický článok je polovodič, jeho elektrické vlastnosti sa menia v závislosti od teploty, ako je to aj pri ostatných polovodičových zariadeniach. Teplota pritom ovplyvňuje energiu elektrónov, od ktorej sa následne odvíja pravdepodobnosť ich uvoľnenia sa z väzby v atómoch a teda vzniku voľných nosičov elektrického náboja. V prípade zväčšovania teploty elektróny nadobúdajú väčšiu hodnotu energie, čím nadobúdajú väčšiu schopnosť prekonať energetickú bariéru, ktorú je nutné prekonať pri uvoľnení z väzby. To má za následok zväčšenie generovaného elektrického prúdu. Tento nárast je však malý a preto zanedbateľný. [6] [11]

Na druhej strane, nárast teploty spôsobí aj nárast difúznej hodnoty minoritných nosičov náboja, čím sa zväčšuje saturačný prúd, čoho následkom je pokles napätia FV článku. Táto zmena napätia vplyvom teploty je pritom výraznejšia ako zmena generovaného prúdu v článku. Výsledkom toho sa celkový výkon a účinnosť FV článkov s rastúcou teplotou znižuje (viď Obrázok 1.5). [6] [11]



Obrázok 1.5 Vplyv teploty na výkon fotovoltaického článku (prevzaté z [12])

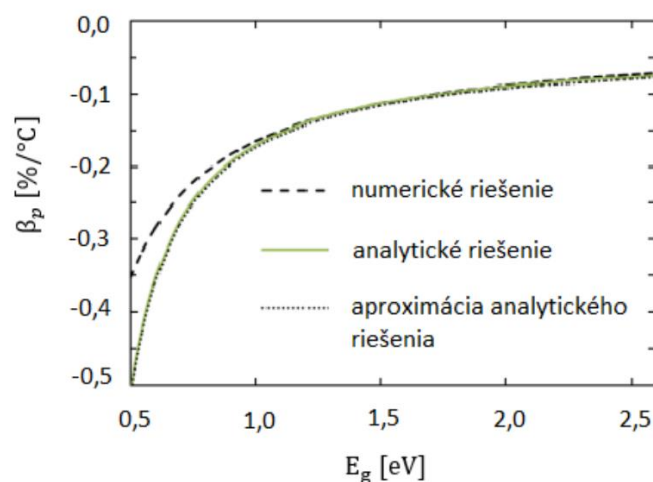
Teplotná závislosť výkonu článkov je vyjadrená pomocou teplotného koeficientu (TC-Temperature Coefficient), ktorý udáva v akej miere sa výkon článku zmení pri zmene teploty o jeden stupeň. Teplotný koeficient výkonu článku je možné zjednodušene vyjadriť

$$\beta_P = \frac{1}{P_0} * \frac{\delta P}{\delta \vartheta} * 100 = \frac{1}{P_0} * \frac{P - P_0}{\vartheta - \vartheta_0} * 100 \text{ [%/}^\circ\text{C]}, \quad (1.6)$$

kde P predstavuje okamžitý výkon FV článku [W] a P₀ výkon FV článku pri teplote 25 °C [W]. ϑ je teplota v okamihu generovania okamžitého výkonu [°C] a ϑ_0 je normalizovaná teplota (25 °C). [13]

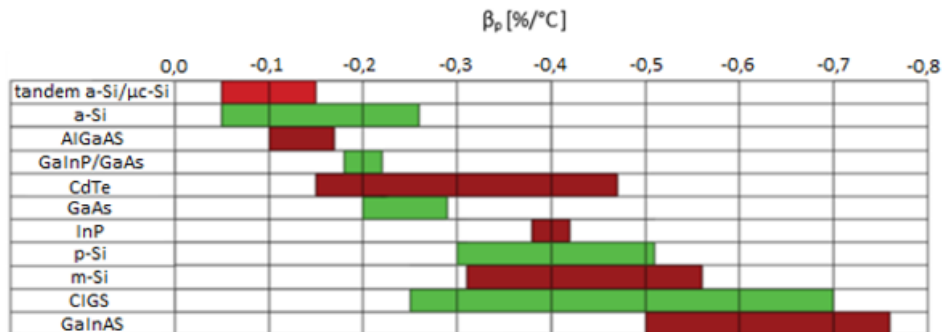
Z uvedenej rovnice vyplýva, že výkon FV článku sa mení lineárne v závislosti od teploty (neplatí pri viacvrstevných článkoch). Teplotný koeficient je u FV článkov záporný, čo je zapríčinené v dôsledku väčšieho záporného teplotného koeficientu napätia v porovnaní s veľkosťou kladného koeficientu prúdu, ktorý je menší. Normalizovaná teplota je pritom zvolená 25 °C, čo vyplýva z testovacích podmienok FV článku, v ktorých je podľa STC (Standard Test Conditions) použitá práve táto teplota. Elektrický výkon FV článku tak pri nízkych teplotách nadobúda väčších hodnôt, pričom v zime môže dosiahnuť až o 20 % väčší výkon. V lete môže článok dosiahnuť teplotu až 50 °C, čo naopak zmenší výkon článku. Napriek tomu, články v lete v dôsledku väčšieho množstva dopadajúceho žiarenia dodávajú o 80 % viac energie ako v zime. [5] [13]

Samotný teplotný koeficient výkonu je podmienený vlastnosťami materiálu, z ktorého je článok vyrobený, pričom jeho veľkosť je ovplyvnená šírkou zakázaného pásma (viď Obrázok 1.6). [13] [14]



Obrázok 1.6 Vplyv šírky zakázaného pásma na veľkosť teplotného koeficientu (prevzaté z [14])

Voľba materiálu tak ovplyvňuje teplotnú závislosť výkonu FV článkov. Nasledujúce grafické rozdelenie (vid' Obrázok 1.7) zobrazuje jednotlivé typy článkov a ich hodnoty teplotného koeficientu elektrického výkonu. [15]

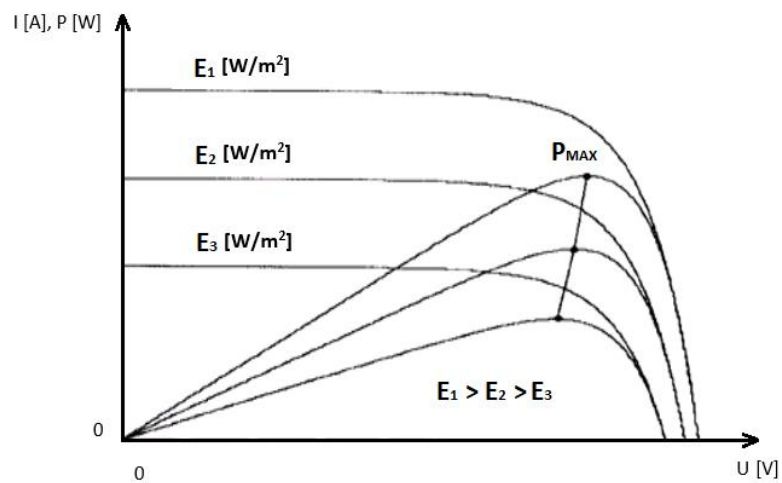


Obrázok 1.7 Teplotné koeficienty jednotlivých FV článkov (prevzaté z [15])

1.4.2 Vplyv intenzity žiarenia

Ako vyplýva z vlastností polovodičov, dodávaná energia prostredníctvom slnečného žiarenia ovplyvňuje generovanie voľných nosičov elektrického náboja vnútri polovodiča. To má za následok, že intenzita žiarenia, ktorá v podstate vyjadruje veľkosť dodávanej energie slnečným žiarením za jednotku času, ovplyvňuje pravdepodobnosť generovania voľných nosičov a tým aj veľkosť generovaného prúdu FV článkom. Intenzita žiarenia môže byť pritom ovplyvnená vo veľkej miere počasím a striedaním dňa s nocou. V inom prípade môže byť intenzita dopadajúceho žiarenia ovplyvnená uhlom, pod ktorým dopadajú slnečné lúče na FV článok, pričom ak slnečné lúče dopadajú pod menším alebo väčším uhlom ako je 90 °, určitá časť žiarenia sa odráža od povrchu článku a dodávaná energia žiarením sa znižuje. [5] [9]

Závislosť výkonu FV článku na intenzite žiarenia (vid' Obrázok 1.8) je tiež zároveň spojená aj s veľkosťou sériového odporu článku R_s . V prípade, že článok disponuje malým sériovým odporom, výkon článku s rastúcou intenzitou žiarenia stúpa. Pokiaľ FV článok disponuje veľkým sériovým odporom, výkon článku s rastúcou intenzitou žiarenia klesá, pričom toto správanie sa prejavuje najmä pri tenkovrstevných článkoch. [6]



Obrázok 1.8 Vplyv intenzity žiarenia na výkon FV článku (prevzaté z [16])

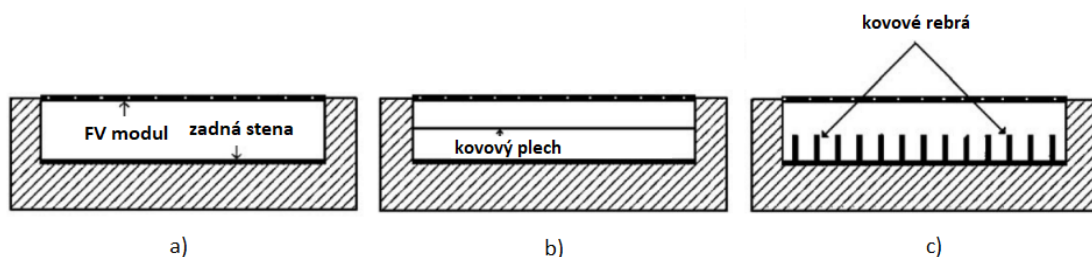
2. CHLADENIE FOTOVOLTICKÝCH ČLÁNKOV

Pri dopade slnečného žiarenia na FV článok alebo panel sa všetka jeho energia nepremení na elektrickú energiu, ale určitá časť žiarenia sa odrazí od jeho povrchu a určité množstvo energie sa ukladá v materiáli zariadenia v podobe tepla. Ako bolo uvedené v jednej z predošlých podkapitol, teplota ovplyvňuje elektrický výkon a okrem toho aj životnosť FV zariadenia. Pre zachovanie pôvodnej účinnosti a životnosti článkov je preto potrebné pri vyšších teplotách realizovať ich chladenie. [11] [17]

2.1 Pasívne chladenie

Táto metóda je založená na prirodzenom chladení využívajúcom zdroje chladenia, pri ktorých nie je potrebné externé energetické napájanie užívateľom. Tento typ chladenia teda nevyžaduje žiadne finančné náklady na jeho prevádzku. Náklady sú vyžadované iba pri počiatočnej realizácii tejto metódy. Jej nevýhodou je však menšie zväčšenie účinnosti FV panelu. [17]

Ako pasívne chladenie sa používa prúdenie vzduchu, odvádzanie tepla vodou alebo použitie tepelných trubíc a PCM (Phase Change Materials) látok. Pri prirodzenej konvekcií vzduchu sa realizuje priestor alebo potrubie zo zadnej strany článkov, ktoré slúži práve na prúdenie vzduchu, čím je teplo odvádzané z článkov. Pre väčšiu účinnosť chladenia sa do tohto priestoru vkladá tenký plech alebo v najlepšom prípade kovové rebrá, ktoré zväčšia vystavený povrch prúdiacemu vzduchu (viď Obrázok 2.1) a tak zväčšia rýchlosť ochladzovania článkov. [17]

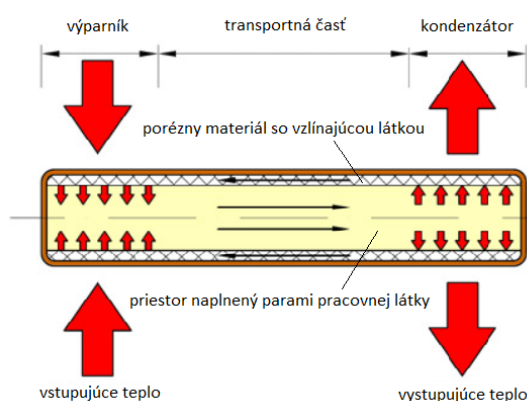


Obrázok 2.1 Pasívne vzdušné chladenie a) bez modifikácie b) s použitím plechu c) s použitím rebier (prevzaté z [17])

Pri chladení vodou je využívaný rozdiel hydraulической výšky, ktorá zapríčiňuje prúdenie vody aj bez použitia pumpy. Takto prúdiaca voda následne ochladzuje povrch článkov. Ďalším spôsobom chladenia pomocou vody je ponorenie článkov do vodnej nádrže. Dôležitým faktorom pri ponáraní do vody je to, že čím sa články ponoria hlbšie, tým je horšia absorpcia žiarenia FV článkom. [17]

Chladienie FV článkov pomocou PCM materiálov spočíva vo viazaní potrebného tepla (latentného tepla) takejto látky k jej fázovej zmene z tuhého stavu na kvapalnú. Hlavná podstata chladienia článkov pritom vychádza z nemeiacej sa teploty PCM materiálov počas akumulácie latentného tepla FV článku, čím dochádza k jeho chladieniu. [17]

V prípade použitia tepelnej trubice je využívaný princíp odvádzania tepla prostredníctvom skupenskej premeny kvapaliny, ktorá sa nachádza vnútri trubice. Trubica (viď Obrázok 2.2) má pritom jeden koniec v chladnejšom prostredí (kondenzátor) a druhý koniec je umiestnený v priestore zdroja tepla (výparník), kde sa kvapalina vyparuje. Kvapalina v plynnej fáze následne prúdi na druhý koniec trubice v dôsledku rozdielnej teploty, kde sa naspäť skondenzuje. [17] [18]



Obrázok 2.2 Konštrukcia tepelnej trubice (prevzaté z [18])

2.2 Aktívne chladienie

Je to metóda, ktorá na chladienie článkov potrebuje externé dodávanie energie. Účinnosť chladienia tejto metódy je väčšia v porovnaní s pasívnym chladiením, avšak energia využívajúca na chladienie článkov sa odpočítava od vyrobenej elektrickej energie. [17]

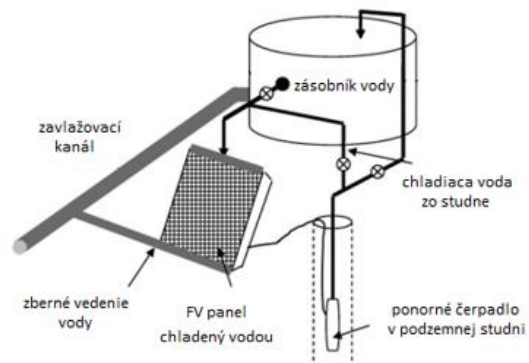
Opäť sa používa vzduch a voda (viď Obrázok 2.3), pričom tieto dva spôsoby dopĺňa ešte PV/T (Photovoltaic/Thermal) systém. Pri chladiení vzduchom sa jedná o rovnaký princíp chladienia ako je to v prípade prirodzeného chladienia vzduchom s tým rozdielom, že v tomto prípade je prúdenie vzduchu vytvárané pomocou ventilátora. Vyššiu účinnosť je opäť možné doceliť pridaním tenkého plechu alebo kovových rebier do priestoru prúdenia vzduchu. [17]

Chladienie vodou sa v tomto prípade od pasívneho chladienia odlišuje v tom, že sa používa pumpa, ktorá riadi prúd tečúcej vody na články, pričom voda stečená na spodok článkov môže byť využitá pre ďalšie účely. [17]

Pomocou PV/T systému sa odvádzané teplo z FV článkov ďalej využíva, pričom teplo je odvádzané do chladiaceho média, ako je napríklad voda. Médium prúdi potrubím po zadnej strane článku, čím ho ochladzuje a následne ohriate médium prúdi do tepelného výmenníka, kde predáva svoju energiu na ďalšie použitie pre užívateľa. [17]



a)



b)

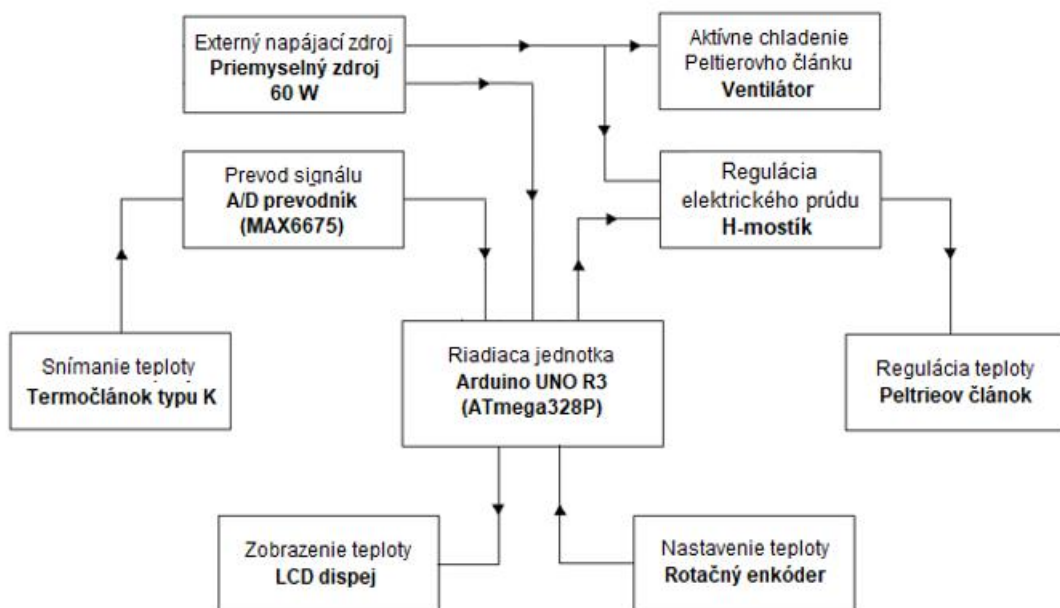
Obrázok 2.3 Aktívne chladienie a) vzduchom b) vodou (prevzaté z [17])

3. RIEŠENIE ELEKTRICKEJ ČASTI ZARIADENIA

Od laboratórneho prvku tejto práce je požadovaná funkcia regulácie teploty FV článku v rozmedzí od 15 °C do 65 °C. Konceptcia elektrickej časti tohto zariadenia stojí na niekoľkých elektrických prvkoch (viď Obrázok 3.1). Elektrická časť zariadenia pritom využíva dva termoelektrické javy, ktoré umožňujú jeho realizáciu a teda reguláciu teploty prostredníctvom elektrickej energie. Prvým z nich je Seebeckov jav, ktorý je využívaný pri snímaní aktuálnej teploty FV článku. V druhom prípade, kedy je potrebná samotná teplotná regulácia článku, sa využíva Peltierov jav.

3.1 Bloková schéma

Nasledujúca bloková schéma elektrickej časti laboratórneho prvku (viď Obrázok 3.1) vyobrazuje jednotlivé prvky, pričom každý z nich má svoju funkciu, ktorá je potrebná na vytvorenie výsledného laboratórneho zariadenia.



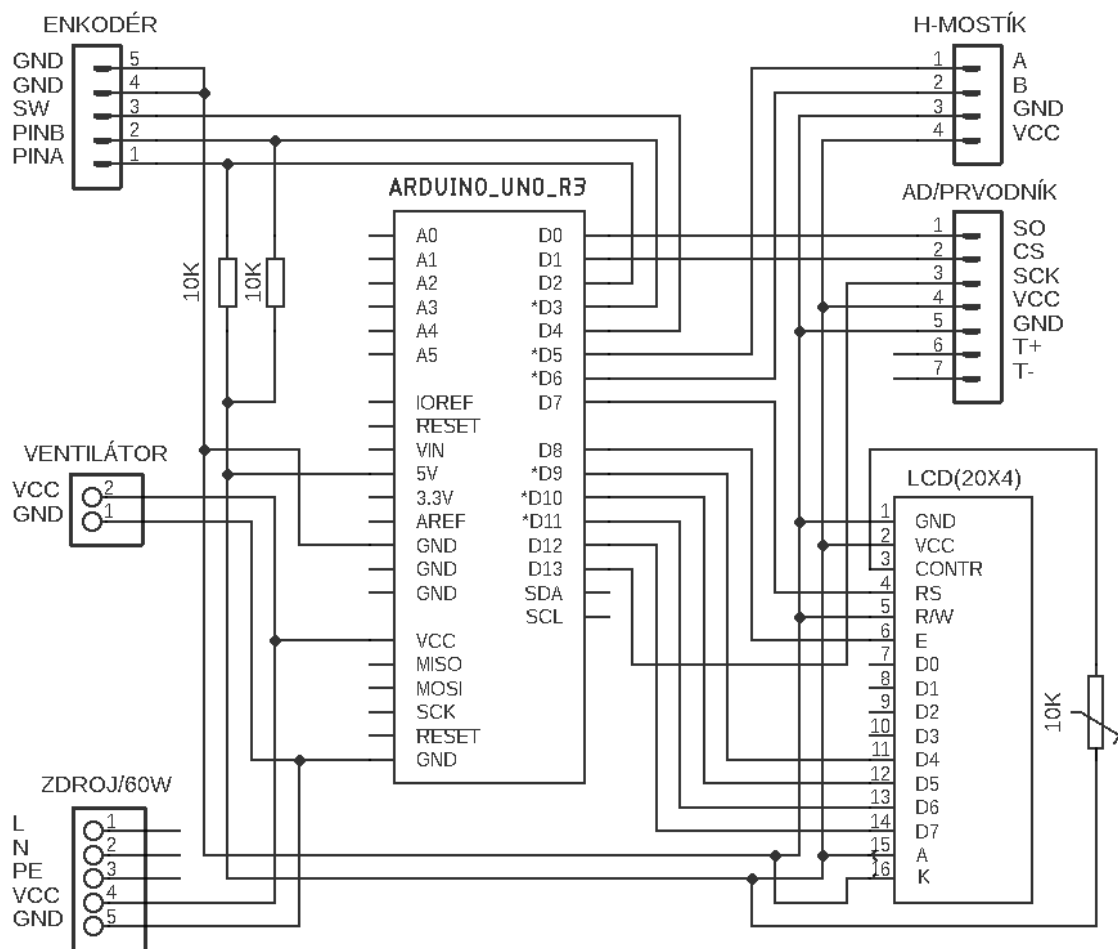
Obrázok 3.1 Bloková schéma laboratórneho prvku na reguláciu teploty FV článku

Celé zariadenie je riadené prostredníctvom elektrickej platformy Arduino. Tento riadiaci prvok riadi niektoré ďalšie prvky, pričom jeho riadenie závisí od výstupných signálov niektorých snímacích prvkov, ktoré Arduino prijíma. Riadiaca jednotka prijíma signály z termočlánku, ktorý sníma teplotu FV článku a z rotačného enkodéra, ktorým sa nastavuje hodnota požadovanej teploty. Naopak, riadiaca jednotka vysiela signály do Peltierovho článku ohrievajúceho alebo ochladzujúceho FV článok a do LCD displeja, na ktorom je vyobrazená aktuálna a nastavená teplota článku.

Zvyšné dva schematické prvky slúžia pre úpravu signálov potrebnú pre správnu funkciu jednotlivých prvkov. Celé zariadenie je zároveň napájané externým napájacím zdrojom, ktorý okrem riadiacej jednotky nepretržite napája aj aktívne chladenie, ktoré slúži pre chladenie Peltierovho článku.

3.2 Schéma zapojenia

Nasledujúci Obrázok 3.2 vyobrazuje schému zapojenia elektrickej časti zariadenia. Čo sa týka zapojenia h-mostíku, v schéme je použitý iba blok s napájacími bodmi, nakoľko sa celým jeho zapojením zaoberá jedna z ďalších podkapitol (viď Obrázok 3.10).



Obrázok 3.2 Schéma zapojenia elektrickej časti zariadenia

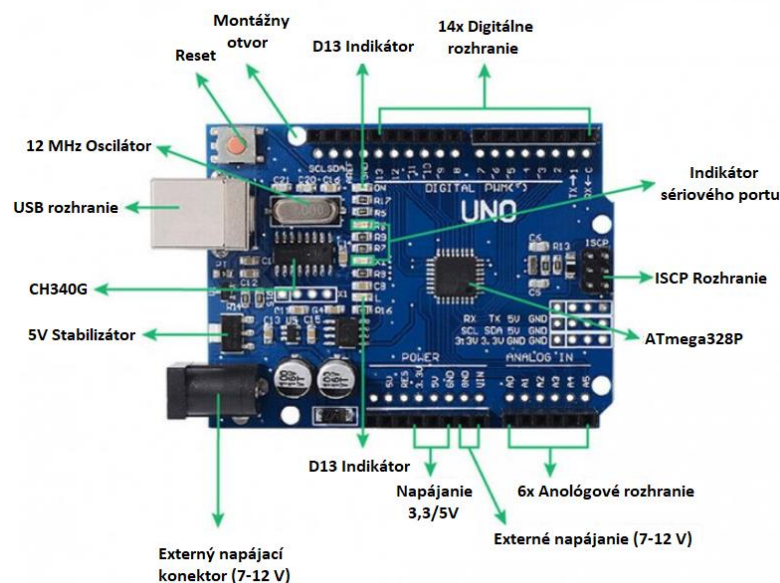
3.3 Riadiaca jednotka

3.3.1 Platforma Arduino

Arduino predstavuje otvorenú hardvérovú a softvérovú platformu, pričom sa jedná o jednodoskové mikrokontroléry, pomocou ktorých je možné vytvárať digitálne zariadenia. Základným prvkom Arduina je procesor od firmy Atmel, ktorý je zároveň obklopený inými elektronickými komponentami. Dosky pritom obsahujú niekoľko analógových a digitálnych vstupno-výstupných pinov. Tieto dosky tiež obsahujú sériové komunikačné rozhrania, ktorými je možné programovať samotný procesor. [19]

3.3.2 Arduino UNO R3 (klon)

Pre realizovanie laboratórneho prvku je použitý klon vývojovej dosky Arduino UNO R3 (viď Obrázok 3.3). Ten využíva procesor ATmega328P od firmy Atmel. Disponuje pritom štrnástimi digitálnymi vstupno-výstupnými pinmi, pričom šesť z nich možno používať ako výstup PWM (z angl. Pulse width modulation), ktorý dokáže na svojom výstupe nastaviť rozličnú strednú hodnotu napätia. Okrem toho doska obsahuje aj šesť analógových vstupov. Celé zariadenie pracuje na frekvencii 12 MHz vďaka keramickému oscilátoru (CSTCE12M0V53-R0). Programovanie procesoru je možné realizovať pomocou USB konektoru s USB prevodníkom (CH340G), alebo prostredníctvom ISCP a UART vývodov, ktoré sú súčasťou hardvéru spolu s napájacím konektorom. Pre chod procesoru sa na doske nachádzajú ešte ďalšie elektrické prvky slúžiace pre jeho správne napájanie ako sú kondenzátory alebo napäťový regulátor. [20]



Obrázok 3.3 Klon vývojovej dosky Arduino UNO R3 (prevzaté z [21])

Napriek tomu, že na realizáciu laboratórneho prvku by v podstate stačilo použiť hlavne procesor ATmega328P, je použitá celá vývojová doska z dôvodu uľahčenia práce s nahrávaním programu. S použitím dosky, ktorej parametre zobrazuje Tabuľka 3.1, stačí jednoducho nahráť program z počítača cez USB rozhranie do procesora. Túto jednoduchú implementáciu umožňuje práve USB prevodník, slúžiaci na zmenu spôsobu sériovej komunikácie z USB na UART, s ktorým dokáže procesor pracovať. Doska tiež uľahčuje spôsob napájania procesora, pričom je možné dosku pripojiť na napájanie 7 až 12 V cez napájací konektor prostredníctvom adaptéra priamo zo siete 230 V vďaka zhotovenej napájacej časti dosky (regulátory napätia, kondenzátory), ktorá napája procesor napätím o hodnote 5 V. Tieto dve výhody dosky sú využívané pri návrhu zariadenia, kedy pre doladovanie alebo testovanie funkčnosti programu je potrebné častejšie programovanie procesoru a napájanie prototypu bez zakúpeného priemyselného zdroja. Pri finálnom napájaní laboratórneho zariadenia je následne použitá svorka namiesto DC napájacieho konektora z dôvodu ušetrenia konštrukčného priestoru, pričom vbudovaný stabilizátor umožňuje celé zariadenie napájať napätím 12 V.

Tabuľka 3.1 Parametre klonu Arduino UNO R3 (prevzaté z [20])

Napájacie napätie [V]	7-12
Pracovné napätie [V]	5
Maximálny výstupný prúd [mA]	200
Maximálny výstupný prúd na jednom výstupe [mA]	40
Flash pamäť [KB] (ATmega328P)	32
SRAM [KB] (ATmega328P)	2
EEPROM [KB] (ATmega328P)	1
Frekvencia [MHz]	12
Digitálne výstupy	14
PWM výstupy	6
Analógové vstupy	6

3.3.3 Program

Na programovanie procesoru vývojovej dosky je použité vývojové prostredie Arduino IDE, kedy je program písaný v programovacom jazyku Wiring. Príloha A bakalárskej práce tento napísaný a okomentovaný program obsahuje. Program využíva iba dve knižnice, kedy jedna slúži pre správne čítanie teploty z A/D prevodníka MAX6675 a druhá slúži pre komunikáciu s LCD displejom.

```
#include <max6675.h> //komunikácia s A/D prevodníkom
#include<LiquidCrystal.h> //komunikácia s LCD
```

Celá koncepcia programu je postavená na snímaní aktuálnej teploty konca termočlánku typu K a nastavenej teploty pomocou enkodéra, pričom na základe rozdielu týchto dvoch teplôt je nastavená výstupná hodnota napätia na PWM výstupoch (D5 a D6), ktorej veľkosť je určená vzhľadom na veľkosť rozdielu teplôt. Na výstupnej hodnote napätia PWM výstupov následne závisí regulácia teploty FV článku. Na snímanie aktuálnej teploty sa používa už spomenutá knižnica, ktorá obsahuje hotovú funkciu pre snímanie teploty. Tá je následne zapisovaná do definovanej premennej, pričom je predtým potrebné nastaviť pomocou definovanej funkcie vstupy prevodníka, do ktorého je termočlánok zapojený (D0, D1, D13).

```
//zápis použitých výstupov
int pinSO = 0;
int pinCS = 1;
int pinSCK = 13;

//zápis použitých výstupov pre knižnicu
MAX6675 termoclanek(pinSCK, pinCS, pinSO);

// čítanie teploty z termočlánku každých 250 ms
if(millis() >= cas+250)
{aktualna = termoclanek.readCelsius();
cas = millis();}
```

Čo sa týka čítania nastavenej hodnoty prostredníctvom enkodéra, program je písaný bez použitej knižnice. Vo svojej podstate sa jedná iba o pričítanie alebo odčítanie hodnoty definovanej premennej na základe čítania napäťových impulzov privedených na digitálne vstupy (D2 a D3). Pri čítaní impulzov však nedochádza k správne časovému zosúladeniu. Preto je využitá funkcia prerušenia programu, kedy sa aktuálne vyhodnotí impulz na vstupe D3, práve vtedy, keď je privedený vstup D3 na zem, čím sa určí odčítanie alebo pričítanie pri otočení enkodéra (pre prehľadnosť textu komentár obsahuje iba Príloha A).

```

//funkcia uskutočnená pri prerušení programu

void enkoder () {
  static unsigned long lprerusenie = 0;
  unsigned long prerusenie = millis();

  if (prerusenie - lprerusenie > 5) {
    if (digitalRead(PinB) == LOW)
      {
        stav-- ;
      }
    else {
      stav++ ;
    }
  }
  lprerusenie = prerusenie;}

//funkcia definujúca prerušenie programu

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PinA), stav, LOW);

```

Vyobrazenie informácií na LCD displeji je realizované pomocou funkcií definovaných knižnicou pre LCD displej. Najprv je potrebné definovať použité výstupy (D7, D8, D9, D10, D11, D12) pre pripojenie a zahájiť komunikáciu s LCD displejom, pričom pred následným zadávaním textu sa definuje aktuálne nastavenie pozície na displeji.

```

LiquidCrystal lcd(7,8,9,10,11,12); //nastavenie vástupov pre LCD
displej

lcd.begin(20, 4); //začiatok komunikácie s LCD (20 stĺpcov, 4 riadky)

lcd.setCursor(0,0); //nastavenie pozície začiatku textu
lcd.print("aktualna=");
lcd.print(aktualna2,0);
lcd.print(" ");
lcd.print((char)223);
lcd.print("C");

lcd.setCursor(0,1); //nastavenie pozície začiatku ďalšieho textu
lcd.print("nastavena=");
lcd.print(stav,0); //vyobrazenie nastavenej teploty na LCD
lcd.print(" ");
lcd.print((char)223);
lcd.print("C");

```

Nastavenie výstupného napätia na PWM výstupoch (D5 a D6) je realizované pomocou podmienok, ktoré vyhodnocujú rozdiel medzi nastavenou a aktuálnou hodnotou. Je pritom použitých 5 veľkostných rozdielov, na základe ktorých je nastavená odlišná hodnota napätia na digitálnych výstupoch. Je to z toho dôvodu, že použitý A/D prevodník dokáže snímať teplotu najmenej s krokom 0,25 °C.

```
else if((0.5<(nastavena1-aktualna))&((nastavena1-aktualna)<=1))
    //príklad jednej podmienky

    {lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print(" ohrev " ); //vypíše sa v treťom riadku "ohrev"
    analogWrite(6,0); //výstup A6 je privedený na zem
    analogWrite(5,150);} //privedené napätie o určenej intenzite
```

3.4 Napájací zdroj

Celé zariadenie je napájané priemyselným spínaným zdrojom S-60-12 s maximálnym napätím 12 V a celkovým výkonom 60 W (viď Tabuľka 3.2), čo umožňuje dodať do zariadenia až 5 A, pričom jeho výstupné napätie je ešte možné mechanicky meniť.

Tabuľka 3.2 Parametre napájacieho zdroja (prevzaté z [22])

Vstupné napätie [V]	110-240 (50/60Hz)
Výstupné napätie [V]	12 ± 10%
Výstupný prúd [A]	5
Výkon [W]	60
Pracovná teplota [°C]	0 - 40
Skladovacia teplota [°C]	-20 - 60
Hmotnosť [g]	175
Rozmery [mm]	110×80×37

Tento zdroj (viď Obrázok 3.4) je zvolený vzhľadom na jeho konštrukčné rozmery, maximálne napätie a požadovaný výkon celého zariadenia. Veľkosť napätia pritom vychádzala z možnosti priamo napájať z tohto zdroja aj riadiacu jednotku, ktorej regulátor napätia dovoľuje pripojiť maximálne 12 V na jej vstup. Čo sa týka výkonu, tak značná časť je spotrebovaná Peltierovým článkom, ktorý je schopný pracovať s výkonom až 79 W. Avšak maximálny dodávaný výkon do článku bude obmedzený približne na 58 W, čo postačuje pre ohriatie FV článku na 65 °C a ochladenie na 15 °C.

Zvyšný výkon o približnej hodnote 2 W je spotrebovaný riadiacou jednotkou (Arduino) a aktívnym chladením (ventilátor). Nakoľko sa jedná o spínaný zdroj, jeho váha a rozmery sú menšie v porovnaní s lineárnym zdrojom, čo zapadá do koncepcie celého zariadenia.



Obrázok 3.4 Priemyselný napájací zdroj (prevzaté z [22])

3.5 Snímanie teploty

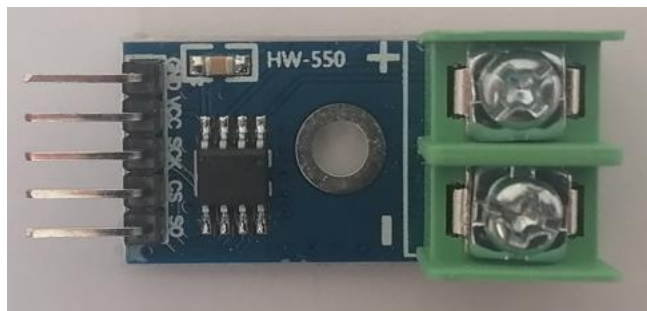
Zariadenie využíva na snímanie teploty termočlánok typu K (vid' Obrázok 3.5), ktorý je umiestnený na kovovej platni, ktorej meranie teploty je požadované pre riadenie ohrevu FV článku.



Obrázok 3.5 Klasický termočlánok typu K

Princípom čítania aktuálnej teploty je snímanie veľkosti vytváraného napätia na koncoch pripojeného termočlánku, ktorá sa priamo úmerne (zjednodušene) mení s teplotou na druhom konci termočlánku. Nakoľko je však hodnota generovaného napätia v milivoltoch až v mikrovoltoch, použitá riadiaca jednotka by nedokázala správne snímať aktuálnu teplotu.

Preto je použitý A/D prevodník MAX6675 (vid' Obrázok 3.6), ktorý generované napätie zosilní a zdigitalizuje, čo umožňuje komunikáciu po zbernici SPI, kedy jednotlivé výstupy prevodníka sú pripojené na digitálne vstupy riadiacej jednotky (D0, D1, D13).



Obrázok 3.6 A/D prevodník MAX6675

Kvôli presnej regulácii teploty FV článku bolo zamýšľané, že sa pre meranie teploty použije citlivejší senzor teploty BMP280, ktorý dokáže čítať teplotu s krokom až 0,01 °C. Avšak kvôli konštrukčnej veľkosti ho nebolo možné spoľahlivo umiestniť v konštrukcii zariadenia. Použitý termočlánok má teda rozmerové výhody, ktoré uľahčujú meranie teploty na miestach, kde by sa teplotný senzor nedal umiestniť. Avšak nakoľko použitý prevodník dokáže čítať teplotu s krokom až 0,25 °C (vid' Tabuľka 3.3) je potrebné definovať intenzitu ohrievania Peltierovho článku vo viacerých teplotných rozmedziach.

Tabuľka 3.3 Parametre A/D prevodníku MAX6675 (prevzaté z [23])

Teplotný rozsah [°C]	-20 - 85
Napájacie napätie [V]	-0,3 - 6
Krok merania [°C]	0,25
Rýchlosť merania [Hz]	157
Citlivosť prevodu [$\mu\text{V}/\text{LSB}$]	10,25
Komunikácia [-]	SPI
Absolútna presnosť [°C]	1,5

Ako je vidieť z parametrov (vid' Tabuľka 3.3), prevodník dokáže najmenej čítať teplotu pri zmene generovaného napätia 10,25 μV , to znamená, že presnosť merania závisí od toho, ako je nekalibrovaný samotný termočlánok. K najpresnejšiemu meraniu by teda dochádzalo, ak by použitý termočlánok generoval napätie 41 μV pri zmene teploty o 1 °C.

3.6 Regulácia teploty

Na reguláciu teploty FV článku je použitý Peltierov článok, ktorý ho ohrieva alebo ochladzuje. Princíp spočíva v tom, že pri privedení napätia na svorky tohto článku ním začne tiecť elektrický prúd (pohyb nosičov náboja) čoho dôsledkom sa jedna strana začne ohrievať a druhá naopak ochladzovať. To, ktorá strana sa začne ohrievať pritom závisí od polarít priloženého napätia a teda od smeru tečúceho prúdu v článku.

3.6.1 Peltierov článok

Pre reguláciu teploty sa využíva polovodičový Peltierov článok typu TEC1-12708 (viď Obrázok 3.7), ktorý je zvolený vzhľadom na jeho dovolený maximálny výkon, kedy musí byť dostačujúci pre vyhriatie FV článku na maximálnu teplotu 65 °C a pre maximálne ochladenie na teplotu 15 °C.



Obrázok 3.7 Polovodičový Peltierov článok

Ako je vidieť z nasledujúcej tabuľky (viď Tabuľka 3.4), niektoré parametre článku sú závislé na teplote a menia sa s teplotou. Pri návrhu celého zariadenia je však nutné zohľadniť či sa článok dokáže zohriať na požadovanú teplotu, čo v tomto prípade je splnené. Druhým hlavným faktorom, na ktorý treba myslieť je maximálny rozdiel teplôt oboch strán. Tu opäť nenastal problém, nakoľko teplo z horúcej strany článku prechádza v určitej miere aj na druhú stranu článku. To však platí iba v prípade, že sa teplota nastavuje tak, aby nasledujúca potvrdená teplota nebola väčšia ako 20 °C oproti pôvodnej. Vyplýva to z použitého princípu ohrevu a zároveň z vlastností ohrevu kovovej platne a FV článku. Peltierov článok pri vyššom rozdiel teplôt generuje teplo pri plnom výkone, čím sa rýchlo zohrieva, ale teplota platne a FV článku sa mení pomalšie. To znamená, že Peltierov článok by sa mohol prehriať, nakoľko by veľký rozdiel nastavenej a aktuálnej teploty pretrvával dlhší čas. Z tohto dôvodu je do programu pridaná podmienka, ktorá zabezpečuje, že po stlačení enkodéru sa teplota potvrdí iba v prípade, keď nová nastavená teplota nebude väčšia ako o 20 °C pôvodne nastavenej teploty.

Tabuľka 3.4 Parametre Peltierovho článku (prevzaté z [24])

Teplota horúcej strany [°C]	25	50
Operačné napätie [V]	0 – 15,4	0 – 17,5
Operačný prúd [A]	0 – 8,5	0 – 8,4
Teplota [°C]	-20 - 90	-20 - 90
Maximálny výkon [W]	71	79
Odpor článku [Ω]	1,5	1,8
Rozdiel teploty strán [°C]	66	75

Nakoľko v prípade navrhovaného zariadenia je pre napájanie článku použité napätie o veľkosti 12 V. Celkový spotrebovaný výkon je obmedzený týmto napätím a tiež vnútorným odporom, ktorý obmedzuje tečúci prúd do článku. Pokiaľ by sa zobralo do úvahy, že maximálny vnútorný odpor by nadobudol hodnotu 1,80 Ω, tak celkový spotrebovaný výkon článku by mohol byť vypočítaný nasledovne

$$P_p = U_Z * I_p = \frac{U_Z^2}{R_p} = \frac{12^2}{1,80} = 80 \text{ W}, \quad (3.1)$$

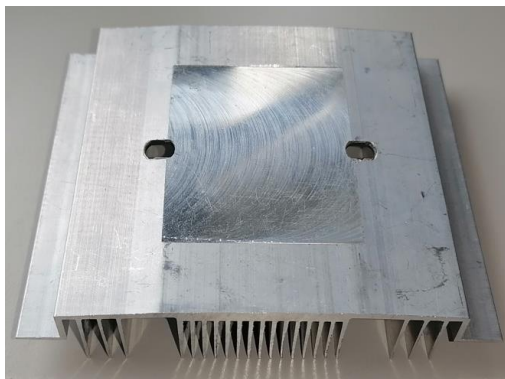
kde P_p je spotrebovaný výkon Peltierovým článkom, U_Z predstavuje napätie externého zdroja [V], I_p vyjadruje veľkosť pretekajúceho prúdu článkom [A] a R_p je vnútorný odpor článku [Ω].

Z predchádzajúceho výpočtu tak vyplýva, že vypočítaný výkon presahuje maximálnu dovolenú hodnotu spotrebovaného výkonu (viď Tabuľka 3.4), čo teoreticky znamená poškodenie Peltierového článku. V reálnych podmienkach k tomu však nedôjde, nakoľko použitý zdroj dokáže dodať výkon iba 60 W, pričom určitá časť výkonu sa spotrebuje na riadenie zariadenia a aktívne chladenie. Nakoľko je pre napájanie zariadenia použitý spínaný priemyselný zdroj s nadprúdovou ochranou, pri každom preťažení by sa zdroj automaticky vypol. Preto je prúd tečúci do Peltierovho článku automaticky obmedzovaný programom na dostatočne malú hodnotu prúdu, ktorá odpovedá približne výkonu 60 W.

3.6.2 Chladenie Peltierovho článku

Jedna strana Peltierovho článku ovplyvňuje druhú prenikaním tepla z teplejšej strany cez štruktúru článku na chladnejšiu stranu. Nastáva tak problém pri chladení FV článku, kedy z tohto dôvodu nie je možné dosiahnuť požadované ochladenie. Preto je potrebné, aby sa jedna strana Peltierovho článku chladila pasívnym aj aktívnym chladením, kedy sa odvádza teplo preč z článku.

V prípade pasívneho chladenia je použitý hliníkový rebrový chladič s rozmermi 99x118x24 mm (viď Obrázok 3.8).



Obrázok 3.8 Rebrový chladič (pasívne chladenie)

Pasívne chladenie je podporované aktívnym chladením, ktoré znižuje tepelný odpor chladiča odvádzaním teplého vzduchu z rebier pasívneho chladiča do okolitého prostredia. Tým je umožnený lepší odvod tepla z Peltierovho článku a dosiahnutie požadovanej teploty. Ako aktívne chladenie je použitý dvojpinový elektrický ventilátor typu ZY-922512SM (viď Obrázok 3.9).

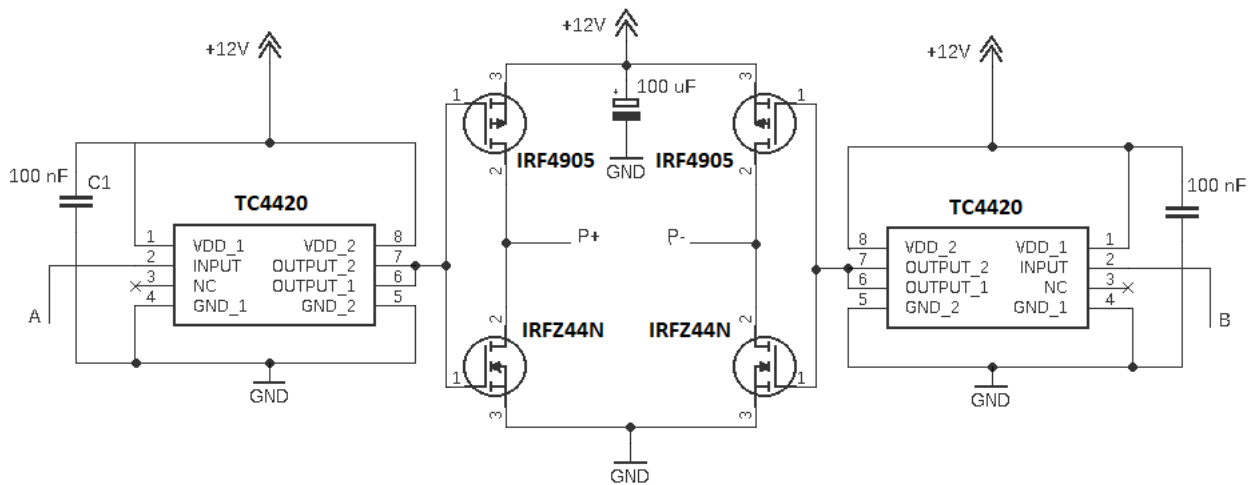


Obrázok 3.9 Elektrický ventilátor (aktívne chladenie)

3.7 Regulácia elektrického prúdu

Aby bola dosiahnutá správna regulácia ohrevu a chladenia Peltierovho článku v čase, je potrebné, aby bolo možné meniť veľkosť a smer tečúceho prúdu do tohto článku. Na túto reguláciu je použitý h-mostík (viď Obrázok 3.10), ktorý využíva štyri unipolárne MOSFET tranzistory (dva typu N, dva typu P), ktoré sú riadené riadiacou jednotkou (Arduino) prostredníctvom dvoch budičov napätia (TC4420). [25]

Nakoľko Peltierov článok je potrebné pre dosiahnutie požadovanej teploty napájať elektrickým prúdom o veľkosti blížiacej sa k 5 A, použitie regulácie prostredníctvom h-mostíku zabezpečuje v prvom rade regulované napájanie Peltierovho článku dostatočne veľkým elektrickým prúdom. To by prostredníctvom samotnej riadiacej jednotky nebolo možné, nakoľko jedným výstupom riadiacej jednotky môže tiecť maximálne 40 mA. Takýto spôsob regulácie tak spočíva na riadení elektrického prúdu z externého zdroja poskytujúceho dostatočne veľký prúd, prostredníctvom výkonových spínacích prvkov (MOSFET tranzistory), ktoré sú pomocou výstupného napätia riadiacej jednotky spínané cez hradlá (GATE) tranzistorov.



Obrázok 3.10 Použitý h-mostík

Použitie h-mostíku tiež umožňuje správnu reguláciu teploty z hľadiska zmeny stavu ohrievacieho procesu, kedy umožňuje usmernenie toku elektrického prúdu do Peltierovho článku, čím sa určuje, ktorá strana článku sa bude zohrievať, a ktorá chladiť. Umožňuje tak meniť polaritu svorkového napätia bez mechanického prepínania kontaktov a tým rýchlu odozvu prepínania stavu ohrevu článku pri vyrovnávaní nastavenej teploty.

Pri pohľade na schému zapojenia h-mostíku (viď Obrázok 3.10) je možné vidieť, že celý h-mostík je riadený dvomi vstupmi z riadiacej jednotky. Môže tak dôjsť ku štyrom možným kombináciám napät'ových stavov. V prvom prípade môžu byť obidva vstupy uzemnené. V takom stave by vrchné dva tranzistory typu P boli zopnuté, čo by umožňovalo tok prúdu cez tieto tranzistory. Avšak v tomto stave by spodné dva tranzistory typu N neboli zopnuté, čo by bránilo akémukoľvek toku prúdu k zemi, čo platí aj pre tok prúdu cez Peltierov článok, nakoľko na obidvoch vývodoch článku by sa objavilo napätie 12 V.

Ďalší prípad predstavuje stav, kedy je na obidvoch vstupoch privedené napájacie napätie z riadiacej jednotky. V tomto okamihu by boli naopak zopnuté spodné dva tranzistory typu N, čím by sa priviedol na vstupy Peltierovho článku nulový potenciál. Vrchné dva tranzistory by sa však nezopli a bránili by tak akémukoľvek toku elektrického prúdu cez celý obvod.

Posledné dve kombinácie privedenia napájacieho napätia na vstupy h-mostíka, kedy je privedené napätie vždy iba na jeden vstup, umožňuje tok elektrického prúdu cez priamo cez Peltierov článok. V takejto kombinácii sa vždy zopne jeden vrchný tranzistor typu P na jednej strane a jeden tranzistor typu N na druhej strane. Pomocou zopnutia jedného tranzistora typu P je pracovného napätie externého zdroja 12 V privedené na jeden vstup Peltierovho článku a pomocou zopnutia jedného tranzistora typu N na druhej strane je na druhý vstup Peltierovho článku privedený nulový potenciál.

Vďaka použitej štruktúre vstupov h-mostíka, kedy jeden vstup napája súčasne jeden tranzistor typu N s tranzistorom typu P, je zabránené výskytu skratového stavu. Ten by mohol nastať v prípade inej štruktúry zapojenia pri prepínaní smeru toku prúdu, kedy by mohli byť v jednom okamihu zopnuté dva tranzistory na jednej strane mostíka, či už z dôvodu použitia nesprávnej kombinácie privedeného napätia alebo z dôvodu rozličných vypínacích dôb jednotlivých tranzistorov.

Vstupy h-mostíku sú pripojené na digitálne PWM výstupy (D5 a D6), ktorých stredná hodnota napätia sa mení podľa potreby ohrevu alebo chladenia FV článku. Celý h-mostík následne nie je ovládaný len pomocou dvoch napät'ových stavov, ale prostredníctvom 256 stavov, čo vychádza zo spôsobu riadenia použitej riadiacej jednotky. Tranzistory h-mostíku tak prepúšťajú elektrický prúd, ktorého stredná hodnota je úmerná strednej hodnote vstupného napätia na hradlá tranzistorov.

3.7.1 Výber tranzistorov

Výber tranzistorov je hlavne podmienený požadovanou veľkosťou tečúceho prúdu, napájacieho napätia externého zdroja, odporu tranzistoru v zopnutom stave $R_{DS(ON)}$ a tepelného odporu $R_{\theta JA}$.

Obidva tranzistory sú dimenzované hlavne tak, aby mohli byť napájané napätím 12 V a mohol ním pretekať elektrický prúd o veľkosti aspoň 5 A. Ďalej je pri výbere tranzistorov prihliadané na vznik úbytkov napätia a taktiež na výkonnostné statické straty, ktoré môžu ovplyvňovať výkon Peltierovho článku a otepľovanie tranzistorov. Preto sú použité tranzistory (viď Tabuľka 3.5), ktoré majú menšiu veľkosť odporu v zopnutom stave $R_{DS(ON)}$ a tepelného odporu $R_{\theta JA}$, čím je možné tieto úbytky a straty eliminovať.

Tabuľka 3.5 Parametre použitých tranzistorov (prevzaté z [26])

	IRF4905	IRFZ44N
$U_{DS(MAX)}$ [V]	-55	55
$I_{D(MAX)}$ [A]	-74	49
$R_{DS(ON)}$ [Ω]	0,020	0,022
$R_{\theta JA}$ [$^{\circ}C/W$]	62	60

Úbytok napätia na tranzistoroch ΔU je určený najmä odporom v zopnutom stave $R_{DS(ON)}$, pričom je žiadúce, aby bol čo najviac eliminovaný, čím sa umožňuje privedenie celého napätia externého napätia na vstupy Peltierovho článku. Úbytok napätia je pritom možné určiť rovnicou

$$\Delta U = R_{DS(ON)} * I_D \quad [V], \quad (3.2)$$

kde $R_{DS(ON)}$ je odpor tranzistora v zopnutom stave [Ω] a I_D predstavuje maximálny tečúci prúd cez tranzistor [A]. [27]

Statické straty P_S sú z hľadiska technologických vlastností tranzistora opäť ovplyvnené najmä odporom v zopnutom stave $R_{DS(ON)}$. Tieto straty je možné určiť nasledovne

$$P_S = R_{DS(ON)} * I_D^2 \quad [W], \quad (3.3)$$

kde $R_{DS(ON)}$ je odpor tranzistora v zopnutom stave [Ω] a I_D predstavuje maximálny tečúci prúd cez tranzistor [A]. [27]

Následne je možné zo statických strát dopočítať oteplenie tranzistorov ΔT , ktorý však tiež závisí aj od dynamických strát. Nakoľko pri spínaní tranzistorov nie je použitá vysoká frekvencia (980 Hz), je možné tieto dynamické straty zanedbať. Pre výpočet oteplenia je tak možné použiť vzťah

$$\Delta T = R_{\theta JA} * P_s \quad [^{\circ}\text{C}], \quad (3.4)$$

kde $R_{\theta JA}$ je tepelný odpor tranzistora [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$] a P_s predstavuje jeho statické výkonové straty [W]. [27]

Jednotlivé vzťahy sú použité pre výpočet potrebných údajov (viď Tabuľka 3.6) ako pre tranzistor typu P (IRF 4905), tak pre tranzistor typu N (IRFZ44N).

Tabuľka 3.6 Vypočítané hodnoty strát tranzistorov

	IRF4905	IRFZ44N
ΔU [V]	0,10	0,11
P_s [W]	0,50	0,55
ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	31	33

3.7.2 Výber budičov

Nakoľko je pomocou tranzistorov spínané napájacie napätie 12 V, pre správne spínanie je potrebné, aby bolo na hradlo tranzistorov typu P privádzané napätie o väčšej hodnote ako je výstupné napätie riadiacej jednotky (5 V). Vychádza to z technologických vlastností tranzistorov, kedy je vyžadované, aby napätie medzi hradlom a emitorom U_{GS} pri rozopnutí bolo aspoň 2 V. V prípade použitia tranzistorov typu N, je táto požiadavka splnená, keďže ich emitor je pripojený k zemi a teda rozdiel napätia medzi výstupom riadiacej jednotky (hradlo) a emitorom je v okamihu vypnutia 0 V. Ak je však potrebné vypnúť tranzistor typu P je vyžadované, aby bolo na hradlo tranzistora privedené napätie najmenej o 2 V menšie ako je napätie privádzané na emitor tranzistora. V tomto prípade musí byť na hradlo privedené napätie o veľkosti aspoň 10 V, čo samotný výstup riadiacej jednotky neumožňuje. Práve z tohto dôvodu je použitý budič napätia TC4420 (viď Tabuľka 3.7), ktorý funguje ako zosilňovač výstupného napätia riadiacej jednotky, čím je na hradlá tranzistorov typu P pri potrebe vypnutia privedené napätie 12 V. [25]

Tabuľka 3.7 Parametre budiča TC4420 (prevzaté z [28])

Špičkový výstupný prúd [A]	6
Prevádzkové napätie [V]	4,5 - 18
Kapacitná zaťažiteľnosť [pF]	10000
Čas oneskorenia [ns]	55

3.8 Nastavenie teploty

Nastavenie požadovanej teploty na zhotovenom zariadení je realizované pomocou digitálneho enkodéra (viď Obrázok 3.11), ktorý má v sebe zabudovanú aj funkciu tlačidla. Je použitý najmä preto, že hodnota nastavenej teploty nie je závislá na aktuálnom stave výstupného napätia, ako je to v prípade analógového potenciometra. Táto vlastnosť enkodéra umožňuje nastaviť počiatočnú teplotu FV článku vždy s hodnotou, ktorá je určená programom (20 °C). V prípade, že by bol použitý potenciometer, počiatočná hodnota nastavenej teploty by závisela na nastavenej pozícii potenciometra, čo by znamenalo, že pokiaľ by bola požadovaná rovnaká počiatočná hodnota nastavenej teploty na FV článku po zapnutí zariadenia, užívateľ pred posledným vypnutím by musel vždy nastaviť potenciometer do polohy odpovedajúcej počiatočnej hodnoty teploty.



Obrázok 3.11 Rotačný enkodér (bez pull-up rezistorov)

Druhou výhodou použitého enkodéra je práve vbudovaná funkcia tlačidla, ktorá je použitá pre potvrdenie nastavenej hodnoty teploty, kedy sa následne začne v programe používať ako nastavená hodnota pre porovnanie rozdielu teplôt.

3.9 Zobrazenie teploty

Na zobrazenie informácií o stave teploty FV článku je použitý LCD displej (viď Obrázok 3.12), ktorý je k riadiacej jednotke pripojený len prostredníctvom digitálnych vstupov (viď Obrázok 3.2). Zapojenie LCD displeja je tiež doplnené o odporový trimmer 10K, ktorý slúži na nastavenie jasnosti displeja. Ten je umiestnený na vytvorenej doske plošných spojov.



Obrázok 3.12 LCD displej (80 znakov)

Displej celkovo vyobrazuje 3 informácie. Na prvom riadku je vypísaná aktuálna teplota FV článku. Na druhom riadku sa zobrazuje nastavená teplota a tretí riadok slúži na zobrazenie aktuálneho procesu zariadenia, teda či zariadenie FV článok chladí alebo zohrieva. V prípade, že aktuálna teplota zodpovedá nastavenej teplote, na treťom riadku sa vypíše, že teplota je nastavená.

3.10 Návrh a výroba DPS

Potreba výroby DPS (doska plošných spojov) vychádza z použitia riadiacich elektrických obvodov, ktoré nie sú súčasťou dosky Arduina UNO R3. Jedná sa teda o DPS potrebnú k zapojeniu usmerňovacieho h-mostíka, rotačného enkodéra a odporového trimmeru používaného pre nastavenie jasu LCD displeja. Vyrobená DPS tiež odpovedá na potrebu privedenia napätia z priemyselného zdroja a z riadiacej jednotky na aktívne elektrické prvky, nakoľko priemyselný zdroj ani riadiaca jednotka neobsahujú dostatočný počet napájacích výstupov. Na vyrobenej doske je tak privedené napätie z uvedených zdrojov, pričom ostatné prvky sú ďalej napájané z tejto dosky pomocou svoriek alebo pinov.

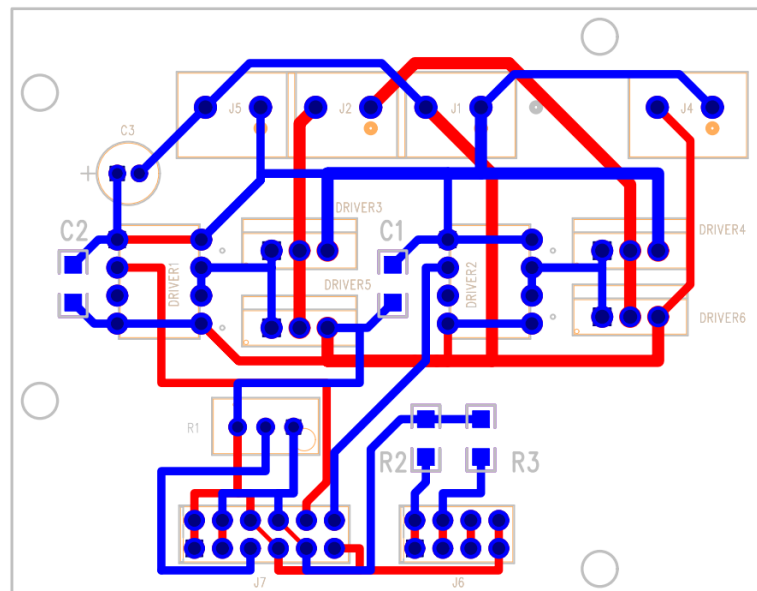
3.10.1 Základný materiál

Pre výrobu dosky je použitý materiál FR4 (epoxidová živica + sklená tkanina) s plátovanou meďou o hrúbke 105 μm . Hrúbka medi je zvolená vzhľadom na maximálnu veľkosť tečúceho prúdu vodivými cestami. Zvolenou hrúbkou medi je zabránené neprimerané ohrievanie vodivých ciest pri použití šírky ciest o veľkosti 1 mm. V prípade, že by bola použitá meď o hrúbke 35 μm pri veľkosti prúdu 5 A, cesty o šírke 1 mm by sa ohriali o 50 °C. Tým, že je použitá meď o hrúbke 105 μm sa cesty o tej istej šírke ohrejú iba o 10 °C. To uľahčuje celý návrh DPS, kedy nemusia byť použité širšie vodivé cesty a zachovávajú sa požadované rozmery DPS pre umiestnenie v konštrukčnej krabici. [29]

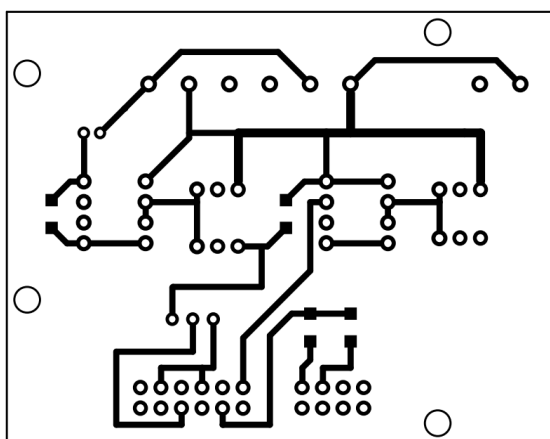
3.10.2 Návrh DPS

Návrh DPS je realizovaný v programe PADS, pričom schéma je navrhnutá v PADS Logic a rozloženie DPS je navrhnuté v PADS Layout. Obidva súbory sú umiestnené v prílohe práce (viď Príloha A).

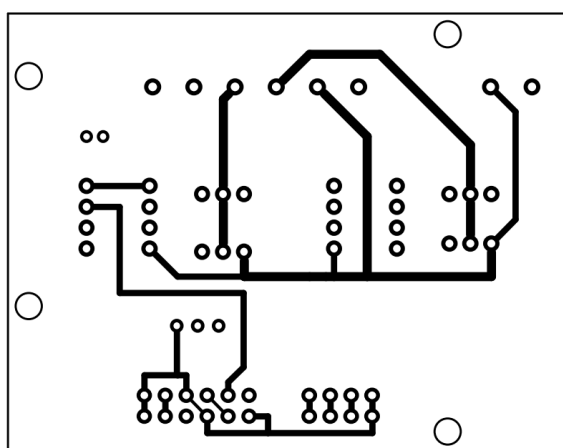
Doska bola navrhnutá tak, aby odpovedala rozmerom použitej vývojovej dosky Arduino UNO R3, pričom konštrukčné otvory dosky sú takisto zosúladené s otvormi použitého Arduina (viď Obrázok 3.13). Tento návrh zodpovedá konštrukčnému umiestneniu dosky v zariadení, kedy je doska umiestnená pomocou skrutiek nad Arduino. V návrhu sú použité najmä súčiastky typu THT (Through-Hole Technology), ktoré sú osadené iba z jednej strany, pričom vodivé cesty sú vytvorené na oboch stranách (viď Obrázok 3.14 a 3.15).



Obrázok 3.13 Návrh vytvorenej DPS (modrá - vrch, červená - spodok)



Obrázok 3.14 Vodivé cesty na vrchnej strane DPS



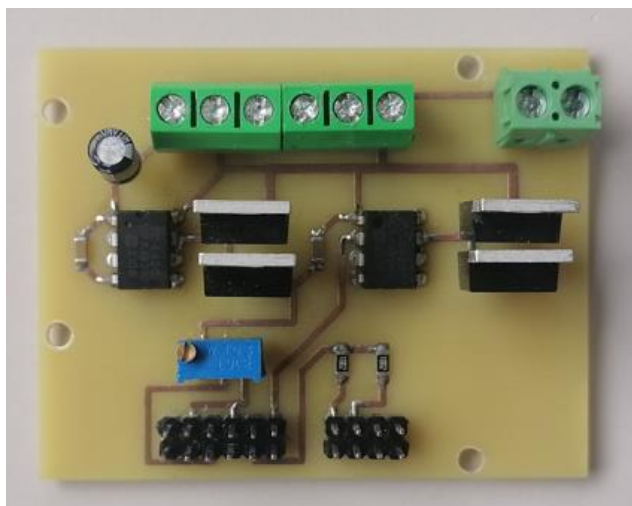
Obrázok 3.15 Vodivé cesty na spodnej strane DPS

3.10.3 Výroba a osadenie DPS

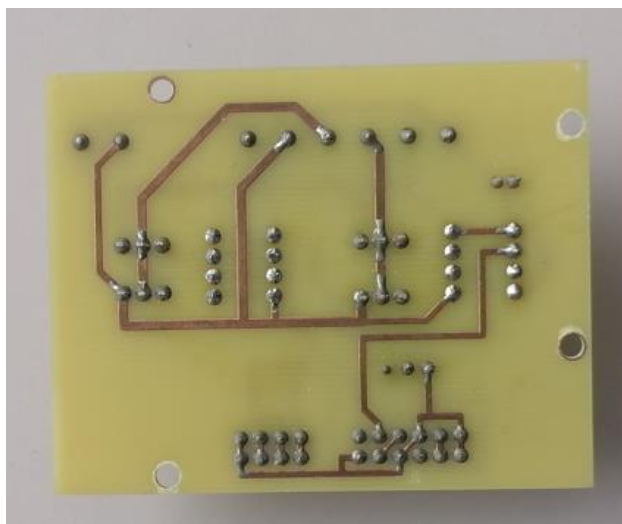
Výroba DPS bola uskutočnená subtraktívnou metódou v laboratóriu na ústave elektrotechnológie, kedy bol na základný materiál nalaminovaný fotorezist, ktorý bol následne osvietený pomocou negatívnej šablóny a vyvolaný vo vývojke, čím zostala na materiály vrstva fotorezistu, ktorá kopírovala vodivé cesty. Nakoniec sa odleptala odkrytá časť medi a fotorezist z vytvorených vodivých ciest.

Pri vytváraní šablóny vodivých ciest na základnom materiály bol využitý negatívny fotorezist. Preto bolo nutné pre vytvorenie vodivých ciest použiť aj negatívnu predlohu. Nakoľko sa jedná o obojstrannú DPS, bolo nevyhnutné zosúladiť šablóny vrchnej a spodnej strany DPS. Zosúladenie bolo docieľené tak, že sa vytvorila obálka z obidvoch šablón, ktoré boli k sebe navzájom prilepené pomocou obojstrannej pásky. Pri osvietení sa potom základný materiál s laminovaným fotorezistom iba vložil do tejto obálky.

Po zhotovení DPS boli následne súčiastky ručne osadené a zaspájkované (viď Obrázok 3.16 a 3.17). Nakoľko v laboratóriu nebola možnosť vytvoriť otvory pokovené z vnútornej strany, na prepojenie jednotlivých ciest na opačných stranách dosky boli využité THT súčiastky, ktoré vodivo prepájajú cesty svojimi vývodmi. Avšak z tohoto dôvodu museli byť niektoré súčiastky zospájkované z oboch strán.



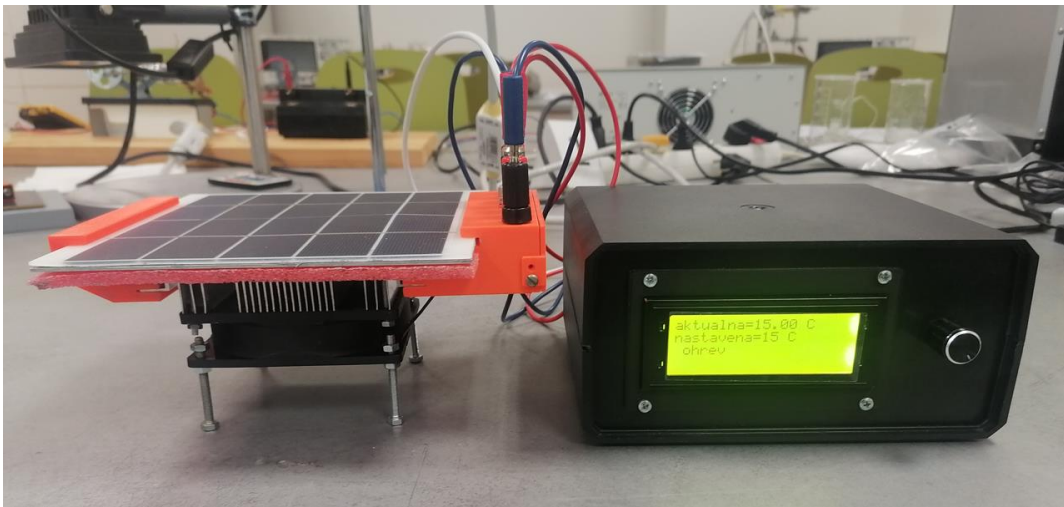
Obrázok 3.16 Osadená DPS (vrchná strana)



Obrázok 3.17 Osadená DPS (spodná strana)

4. KONŠTRUKČNÉ ZHOTOVENIE ZARIADENIA

Celé zariadenie je zhotovené z dvoch samostatných častí (viď Obrázok 4.1), ktoré sú navzájom elektricky prepojené pomocou elektrických vodičov. Jednu časť tvorí samotné riadiace zariadenie, vo forme konštrukčnej krabičky, kde sa nachádza všetka riadiaca elektronika, pričom zároveň slúži pre obsluhu celého zariadenia. Druhá časť zariadenia je tvorená prvkami, ktoré sa bezprostredne podieľajú na ohreve alebo chladení FV článku. Týmito prvkami je tak vytvorený ohrievací panel, ktorý zároveň obsahuje aj samotný FV článok.



Obrázok 4.1 Vyhotovené zariadenie

4.1 Konštrukčná krabička

Nakoľko sa zariadenie má používať ako laboratórny prvok v laboratóriu, celé zariadenie by malo mať príslušnú formu elektronického zariadenia. Z tohto dôvodu je pre umiestnenie elektronických prvkov a obsluhu celého zariadenia zvolená konštrukčná krabička.

4.1.1 Výber

Pre zariadenie je vybratá konštrukčná krabička KM85 (viď Obrázok 4.2), ktorá je vyrobená z plastu ABS (Akrylonitril-butadién-styrén). Skladá sa zo štyroch častí, kedy bočné steny krabičky sú zvierané vrchnou a spodnou časťou bez ďalšieho upevnenia. Upevnené je iba vrchná a spodná časť pomocou skrutiek. Výber krabičky je ovplyvnený hlavne rozmermi krabičky, ktoré sú čo najmenejšie vzhľadom na rozmery komponentov umiestnených v krabičke.



Obrázok 4.2 Konštrukčná krabička (prevzaté z [29])

4.1.2 Zhotovenie otvorov

Vytvorenie otvorov do krabičky je nutné z viacerých hľadísk. V prvom rade boli otvory vyvítané zo spodnej strany krabičky, ktoré slúžia pre následné upevnenie prvkov v krabičke pomocou skrutiek spolu s distančnými stĺpikmi a pre upevnenie spodnej a vrchnej časti krabičky. Na prednej a zadnej strane krabičky sú vytvorené otvory pomocou rozohriateho hrotu spájkovačky, čím sa vytvorili aj otvory tvaru obdĺžnika (viď Obrázok 4.3) s požadovanými rozmermi umiestnených prvkov. Z prednej časti je pritom vytvorený otvor pre LCD displej a rotačný enkodér a zo zadnej strany vytvorené otvory slúžia pre elektrické konektory, ktorými je napájaná samotná riadiaca časť a zároveň aj ohrievací panel (viď Obrázok 4.4).



Obrázok 4.3 Vytvorenie otvorov v krabičke

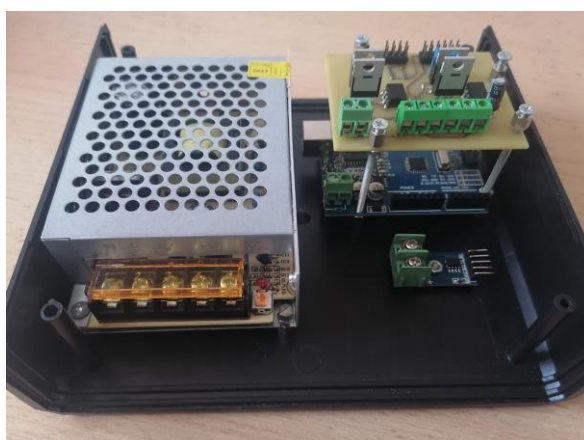


Obrázok 4.4 Osadenie elektrických periférií v otvoroch

4.1.3 Umiestnenie prvkov

Krabička obsahuje všetky riadiace elektrické komponenty, ktoré nie je potrebné bezprostredne umiestňovať v blízkosti FV článku. Jedná sa teda o priemyselný zdroj, riadiacu jednotku (Arduino), vytvorenú DPS, rotačný enkodér, LCD displej a konektory, ktoré slúžia pre pripojenie a prepojenie celého zariadenia. Jednotlivé komponenty sú umiestnené tak, aby sa čo najviac ušetrilo miesto v krabičke a zároveň sa mohli použiť signálové vodiče s čo najmenšou dĺžkou.

Nakoľko LCD displej je spolu s rotačným enkodérom pripojený k riadiacej jednotke a vyrobenej DPS prostredníctvom najväčšieho počtu vodičov, obidve dosky sú umiestnené nad sebou v blízkosti prednej strany krabičky. Obidve dosky sú pritom mechanicky spojené pomocou skrutiek, ktoré prechádzajú cez zosúladené otvory oboch dosiek (viď Obrázok 4.5). Týmto riešením sa zároveň vytvára miesto pre kabeláž vedenú zo zadnej strany krabičky (viď Obrázok 4.6).



Obrázok 4.5 Umiestnenie prvkov v krabičke (bez kabeláže)



Obrázok 4.6 Umiestnenie prvkov v krabičke (s kabelážou)

4.1.4 Rám pre LCD displej

Nakoľko vytvorené otvory na bočných stranách krabičky nemajú pekné ostré hrany, je z estetického hľadiska potrebné, aby boli tieto hrany zakryté. Pri všetkých prvkov nachádzajúcich sa na bočných stenách okrem LCD displeja sú tieto nedokonalosti zakryté samotnou konštrukciou prvkov, ktoré sú vyrábané na osadenie do panelu. LCD displej však takúto konštrukciu nemá. Preto je vyrobený plastový rám (ABS) pomocou 3D tlačiarne (viď Obrázok 4.7), ktorý bol navrhnutý pomocou softvéru SolidWorks (viď Príloha A).



Obrázok 4.7 Vyrobený plastový rám

4.2 Ohrievací panel

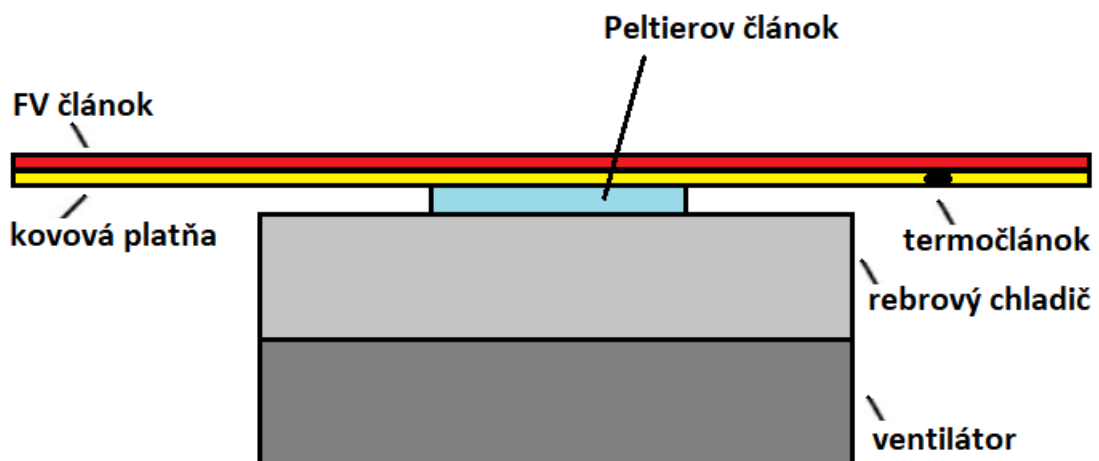
Ohrievací panel je druhá samostatná časť celého zariadenia, ktorá slúži čisto na samotné ohrievanie FV článku, pričom nie je potrebné, aby obsluha zariadenia nejakým spôsobom zasahovala do tejto časti pri vykonávaní merania (okrem pripojenia prívodných vodičov).

4.2.1 Konceptia

Celý ohrievací panel je zložený z viacerých častí (viď Obrázok 4.8 a 4.9), ktoré slúžia ako pre zahrievanie, tak pre uchytenie FV článku. Konceptia pritom vychádza z ohrevu FV článku pomocou Peltierovho článku na základe snímania aktuálnej teploty.



Obrázok 4.8 Konštrukcia ohrievacieho panelu



Obrázok 4.9 Konštrukcia regulačnej časti panelu

Ako je vidieť na predchádzajúcom nákrese (viď Obrázok 4.9) samotný FV článok nie je zohrievaný prostredníctvom priameho kontaktu s Peltierovým článkom, ale cez kovovú platňu. Tá sa priamo dotýka Peltierovho článku, pričom rozvádza teplo po celej ploche platne, na ktorej je umiestnený FV článok. Zo spodnej strany na kraji kovovej platne je zároveň umiestnený termočlánok, ktorý meria aktuálnu teplotu FV článku. Spodná strana Peltierovho článku sa priamo dotýka rebrového hliníkového chladiča, ktorý je ďalej pripevnený k elektrickému ventilátoru. Jednotlivé časti sú pritom spojené prostredníctvom teplo-vodivej pasty. Panel následne stojí na nohách, ktoré tvoria kovové skrutky s maticami. Spevnenie celej konštrukcie je zabezpečené pomocou plastových svoriek, pričom jedna z nich disponuje konektormi, z ktorých sú jednotlivé aktívne prvky ohrievacieho modulu napájané.

4.2.2 Svorky

Pre upevnenie a tým aj vytvorenie modulu ako jedného prenosného celku sú vyrobené plastové svorky (ABS) pomocou 3D tlačiarne (viď Obrázok 4.10), ktoré boli navrhnuté v programe SolidWorks (viď Príloha A). Jedna z nich zároveň slúži pre umiestnenie konektorov (viď Obrázok 4.11), prostredníctvom ktorých je panel elektricky prepojený s riadiacou časťou zariadenia.



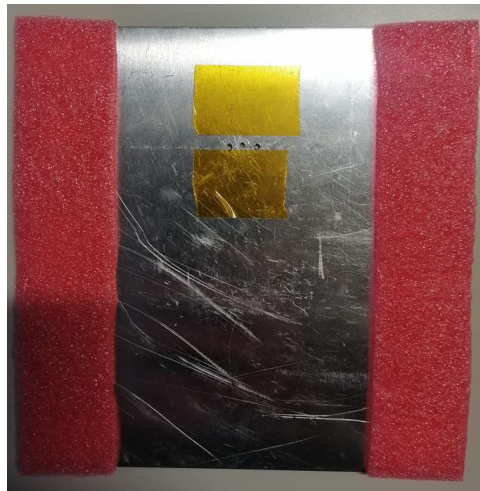
Obrázok 4.10 Vyrobené svorky pre ohrievací panel



Obrázok 4.11 Použité konektory na svorke

4.2.3 Izolácia

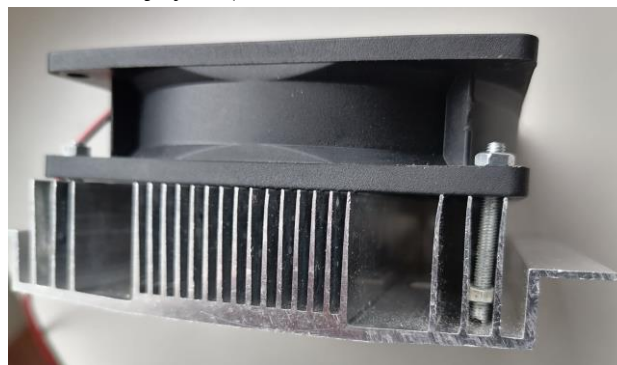
Pri regulácii teploty je zo spodnej strany odvádzané generované teplo pomocou ventilátora, ktorý vytvára prúdenie vzduchu. Takto vytvorený prúd vzduchu však ovplyvňuje konce kovovej platne, čím ovplyvňuje aj jej teplotu. Z tohto dôvodu je zo spodnej strany na krajoch platne pripevnený pomocou obojstrannej lepiacej pásky penový polyetylén (viď Obrázok 4.12), ktorý slúži ako tepelná izolácia.



Obrázok 4.12 Izolácia na kovovej platni

4.2.4 Upevnenie chladenia

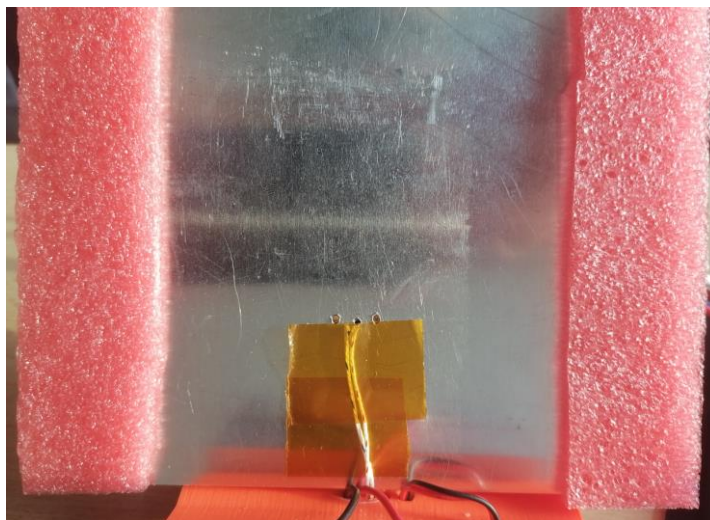
O použitom type chladenia sa práca zaoberá v kapitole č.3. Nakoľko však rebrový chladič nemá vytvorené žiadne konštrukčné body na uchytenie ventilátora, z konštrukčného hľadiska bolo nutné vymyslieť nejaký spôsob pripevnenia elektrického ventilátora ku kovovému chladiču. Riešenie, pri ktorom by sa vrtalo do chladiča nie je použité, nakoľko by to v určitej miere mohlo ovplyvniť tepelnú vodivosť chladiča a tým aj odvod tepla z Peltierovho článku. Preto je uchytenie riešené pomocou zúžených matíc, ktoré sú prilepené medzi dvomi rebrami chladiča. To následne umožňuje uchytenie ventilátora s chladičom pomocou závitovej tyče (viď Obrázok 4.13).



Obrázok 4.13 Uchytenie ventilátora ku chladiču

4.2.5 Termočlánok

Termočlánok je prichytený pomocou kaptónovej pásky vo vyvrtanom otvore kovovej dosky na spodnú stranu kovovej platne (viď Obrázok 4.14), kedy jeho vedenie pokračuje spodnou časťou vyhrievanej dosky až ku konektorom upevneným na svorke. Takéto riešenie je zvolené pre elimináciu vytvorenia medzery medzi platňou a FV článkom.



Obrázok 4.14 Uchytenie termočlánku na kovovú platňu

4.2.6 FV článok

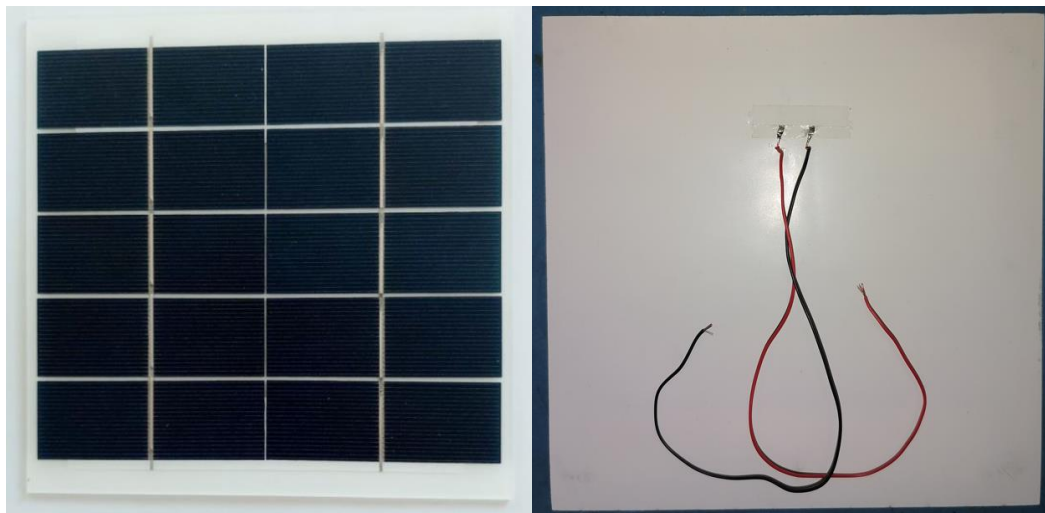
Pre meranie zaťažovacích charakteristík FV článku je použitý polykrystalický solárny článok (viď Obrázok 4.15), ktorého vlastnosti sú uvedené v tabuľke (viď Tabuľka 4.1). Článok je vybratý najmä vzhľadom na jeho veľkosť a cenu.

Tabuľka 4.1 Parametre FV článku (prevzaté z [31])

Maximálne výstupné napätie [V]	6
Maximálny výstupný výkon [W]	4,5
Maximálny výstupný prúd [A]	0,52
Rozmery [mm]	165x165x3

Nakoľko FV článok je umiestnený na kovovej platni, je potrebné, aby výstupné kontakty boli izolované od platne. To je zabezpečené pomocou kaptónovej pásky, ktorá je nalepená na platni v mieste dotyku kontaktov s platňou. Ďalej sú kontakty vedené pomocou tenkých izolovaných vodičov na spodnú stranu platne cez vyvrtané otvory v platni odkiaľ sú vedené až na konektory, ktoré sú umiestnené na plastovej svorke.

Opäť sa prihliadalo na to, aby sa eliminovala medzera medzi platňou a FV článkom. Z toho dôvodu sú otvory vyvrtané v platni v blízkosti vývodov FV Článku a sú použité tenké vývody.



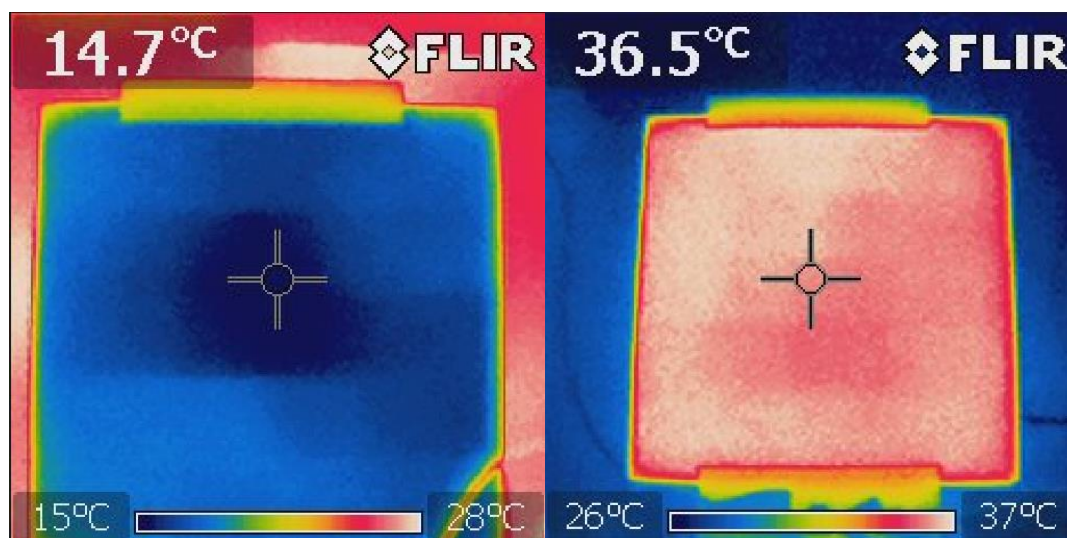
Obrázok 4.15 Použitý FV článok (vľavo-vrch, vpravo-spodok)

5. OVERENIE ČINNOSTI ZARIADENIA

V tejto kapitole je rozobrané overenie činnosti vyhotoveného zariadenia, od ktorého je požadované nastavenie teploty FV článku v rozmedzí od 15 °C do 65 °C. Zároveň má slúžiť ako učebná pomôcka pre meranie vplyvu teploty na výkon FV článku. Z tohto dôvodu je určená presnosť zariadenia (chyba nastavenia teploty), či teda zariadenie spĺňa požiadavku regulácie teploty.

5.1 Chyba nastavenia teploty

Určenie chyby presnosti bolo vyhotovené tak, že sa pri jednotlivých nastavených teplotách FV článku na zariadení zmerala teplota FV článku pomocou termokamery (viď Obrázok 5.1). Meranie sa uskutočnilo v rozsahu 15 °C až 65 °C s krokom 10 °C. Krok merania pritom vychádza z požiadavky laboratórnej úlohy, pre ktorú je zariadenie vyhotovené, kedy sa meranie bude uskutočňovať s týmto použitým krokom. Meranie teploty na FV článku prebiehalo na dvoch rozličných miestach článku. Prvý merané miesto bolo v strede plochy článku a druhé meranie prebiehalo na kraji článku. Je to z toho dôvodu, pretože teplo je generované Peltierovým článkom, ktorý je umiestnený pod stredom FV článku a teplota celého článku potom nie je vo všetkých miestach rovnaká. Vzniká tak teplotný gradient o určitej veľkosti. Čo sa týka určenia presnosti zariadenia, tak sa vychádza práve z priemeru týchto dvoch teplôt, pričom je zaistené, že každé miesto FV článku je vyhriate aspoň na nastavenú hodnotu. Pre čo najväčšie zníženie teplotného gradientu sa FV článok nechal vyhrievať približne päť minút. Nasledujúca Tabuľka 5.1 obsahuje namerané hodnoty nastavenej a reálnej teploty FV článku.



Obrázok 5.1 Snímka merania termokamerou pri teplote 15 °C a 35 °C

Tabuľka 5.1 Namerané hodnoty teploty FV článku

Nastavená teplota ϑ_N [°C]	Teplota na strede článku ϑ_S [°C]	Teplota na okraji článku ϑ_K [°C]
15,0	13,6	14,9
25,0	26,1	25,2
35,0	36,7	35,3
45,0	47,2	44,7
55,0	57,6	54,8
65,0	67,9	64,6

Z nameraných hodnôt sú následne vypočítané priemery dvoch zaznamenaných teplôt na FV článku, ktoré predstavujú výsledné hodnoty, a ktoré sú použité pre ďalší výpočet chyby celého zariadenia (viď Tabuľka 5.2).

Tabuľka 5.2 Priemerné hodnoty nameraných teplôt

Nastavená teplota ϑ_N [°C]	Priemerná teplota ϑ_P [°C]
15,0	14,3
25,0	25,7
35,0	36,0
45,0	46,0
55,0	56,2
65,0	66,3

Z nameraných hodnôt teploty (viď Tabuľka 5.2) je možné následne vypočítať absolútnu a relatívnu chybu nastavenia teploty FV článku. V prípade absolútnej chyby merania sa jedná o rozdiel medzi nameranou hodnotou (nastavená teplota ϑ_N) a skutočnou hodnotou (priemerná teplota článku ϑ_P). Absolútna chyba merania Δ_ϑ je teda vypočítaná ako

$$\Delta_\vartheta = \vartheta_N - \vartheta_P \quad [^\circ\text{C}], \quad (5.1)$$

kde ϑ_N je teplota nastavená zariadením [°C] a ϑ_P je priemerná teplota FV článku (skutočná hodnota) [°C]. [32]

Relatívnu chybu nastavenia teploty senzoru δ_{θ} je zas možné vypočítať ako podiel absolútnej chyby nastavenia teploty Δ_{θ} a skutočnej hodnoty meranej teploty, teda priemernej teploty FV článku. Vzťah pre výpočet relatívnej chyby môže byť následne uvedený ako

$$\delta_{\theta} = \frac{\Delta_{\theta}}{\vartheta_P} * 100 \quad [\%], \quad (5.2)$$

kde Δ_{θ} je absolútna chyba nastavenia teploty zariadením [$^{\circ}\text{C}$] a ϑ_P je priemerná teplota FV článku [$^{\circ}\text{C}$]. [32]

Pokiaľ je známa absolútna chyba nastavenia teploty senzoru Δ_{θ} , ľahko sa dopočíta korekcia nastavenia K_{θ} , ktorá je vlastne iba záporná hodnota absolútnej chyby. Korekcia pritom predstavuje hodnotu, ktorej pripočítanie k nastavenej teplote znamená nadobudnutie hodnoty teploty na FV článku, v tomto prípade priemernej teploty FV článku. Korekcia je teda vypočítaná ako

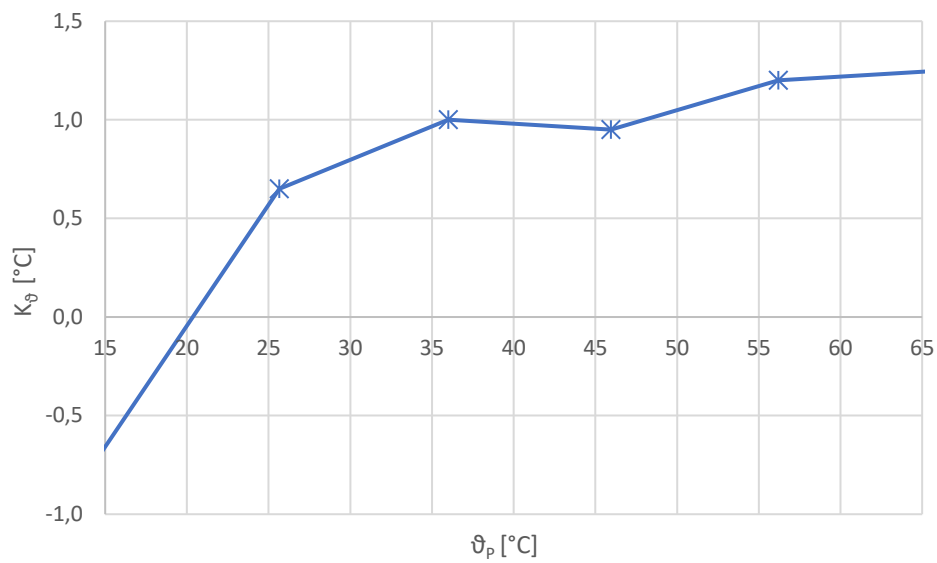
$$K_{\theta} = - \Delta_{\theta} \quad [^{\circ}\text{C}], \quad (5.3)$$

kde Δ_{θ} je absolútna chyba nastavenia teploty zariadením [$^{\circ}\text{C}$]. [33]

Všetky vypočítané hodnoty sú zapísané v nasledujúcej tabuľke (viď Tabuľka 5.3), kedy je zároveň vytvorený graf korekčnej krivky z vypočítaných korekcií teploty (viď Obrázok 5.2).

Tabuľka 5.3 Vypočítané chyby a korekcie snímania teploty

Nastavená teplota ϑ_N [$^{\circ}\text{C}$]	Absolútna chyba Δ_{θ} [$^{\circ}\text{C}$]	Relatívna chyba δ_{θ} [%]	Korekcia K_{θ} [$^{\circ}\text{C}$]
15,00	0,8	5,3	-0,8
25,00	-0,6	-2,5	0,6
35,00	-1,0	-2,8	1,0
45,00	-1,0	-2,1	1,0
55,00	-1,2	-2,1	1,2
65,00	-1,3	-1,9	1,3



Obrázok 5.2 Graf korekčnej krivky nastavenia teploty

Z vypočítaných hodnôt chýb je zrejmé, že najväčšia absolútna chyba nastáva pri nastavení teploty 65 °C, pre ktorú odpovedá aj najväčšia korekcia 1,3 °C. Celé zhotovené zariadenie je tak schopné pracovať najmenej s presnosťou 1,3 °C.

6. ZÁVER

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo zoznámenie sa s vplyvom teploty na výkon FV článku a vyhotovenie laboratórneho zariadenia, prostredníctvom ktorého je možné nastaviť a udržiavať požadovanú teplotu FV článku. V teoretickej časti je najskôr rozobraný princíp FV článku a jeho parametrov, nakoľko niektoré z nich sú predmetom merania v laboratórnej úlohe, pre ktoré je následne zariadenie vyhotovené. Teoretická časť ďalej pokračuje samotným vplyvom teploty na FV článok, kedy je vysvetlená príčina tohto vplyvu, pričom sa zaoberá teplotným koeficientom, ktorý vyjadruje mieru teplotnej závislosti výkonu článku. Druhá kapitola teoretickej časti sa zameriava na spôsoby chladenia článkov, ktoré sa využívajú pre zachovanie alebo zväčšenie ich generovaného výkonu, pričom sú opísané niektoré spôsoby pasívneho aj aktívneho chladenia.

V praktickej časti sa práca na začiatku venuje elektrickému návrhu, kedy je opísaná koncepcia návrhu a použitie elektronických komponentov, pričom základ návrhu stojí na pulznej šírkovej modulácii a na dvoch termoelektrických javoch, prostredníctvom ktorých je možné regulovať teplotu FV článku. Celé zariadenie je pritom riadené pomocou platformy Arduino a usmerňovacieho mostíka (h-mostík). Návrh si zároveň vyžiadal výrobu DPS, ktorá bola zhotovená v laboratóriu na ústave elektrotechnológie pomocou subtraktívnej metódy.

Praktická časť ďalej pokračuje konštrukčným zhotovením celého zariadenia, ktoré sa skladá z dvoch častí. Práca sa najskôr zaoberá konštrukčným návrhom riadiacej časti, kedy bolo nutné vyriešiť formálnu krabičku pre elektrické komponenty a ich uloženie do tejto krabičky pre minimalizáciu konštrukčnej veľkosti zariadenia. Následne práca opisuje aj zhotovenie ohrievacieho panela, pričom je riešený spôsob odvodu tepla z článku a uchytenie jednotlivých častí konštrukcie.

Pri konci práce sa jedna kapitola venuje overeniu činnosti zhotoveného zariadenia, ktoré je realizované prostredníctvom určenia chyby nastavenia teploty na FV článku. To je realizované pomocou snímania teploty povrchu článku termokamerou, ktorá je porovnávaná s nastavenou teplotou na zariadení. Maximálna chyba nastavenia teploty pritom nadobudla hodnotu $-1,3\text{ °C}$ pri nastavení teploty na hodnotu 65 °C , čím je splnená požiadavka pre použitie v laboratórnej úlohe zameranej na teplotný vplyv výkonu FV článku.

LITERATÚRA

- [1] This Month in Physics History. *APS NEWS* [online]. no. 4, 2009, (vol. 18) [cit. 2022-12-10]. ISSN 1058-8132. Dostupné z: <https://www.aps.org/publications/apsnews/200904/upload/April-2009-Volume-18-Number-4-Entire-Issue.pdf>
- [2] LIEDERMANN, K. *FY2_Moderní_fyzika_S.pdf*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2003. s. 6-8.
- [3] Boušek, J., B. Mojrová a P. Kosina. *Elektronické součástky sbírka příkladů*. BRNO: VUT v Brně, 2015. s. 82-83.
- [4] Pn-junction. In: *Images.theengineeringprojects* [online]. 2018 [cit. 2022-11-11]. Dostupné z: <https://images.theengineeringprojects.com/image/webp/2018/05/pn-junction-5.png.webp?ssl=1>
- [5] HASELHUHN, R. *Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu*. Ostrava: HEL, 2011. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [6] MASTNÝ, P. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [7] RAWA, M., A. Abdullah a A.Yusuf. Estimation of Parameters of Different Equivalent Circuit Models of Solar Cells and Various Photovoltaic Modules Using Hybrid Variants of Honey Badger Algorithm and Artificial Gorilla Troops Optimizer. *Mathematics* [online]. 2022, **10**(7) [cit. 2022-11-18]. ISSN 2227-7390. Dostupné z: doi:10.3390/math10071057
- [8] BELÁŇ, A. Model fotovoltického článku. *Posterus*. 2013, vol. 6, no. 10. ISSN 1338-0087.
- [9] Parameters and Characteristics of a Photovoltaic Cell. *Electricaltechnology* [online]. September 2020 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://www.electricaltechnology.org/2020/09/parameters-characteristics-solar-panel.html>
- [10] MOHAMMED, S. a D. DEVARAJ. Simulation and analysis of stand-alone photovoltaic system with boost converter using MATLAB/Simulink. *2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2014]* [online]. IEEE, 2014, 814-821 [cit. 2022-11-30]. ISBN 978-1-4799-2397-7. Dostupné z: doi:10.1109/ICCPCT.2014.7054991

- [11] Solar Cell Operation: Effect of Temperature. *Pveducation* [online]. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature>
- [12] LIBRA, M., V. POULEK a P. KOUŘIM. Temperature changes of I-V characteristics of photovoltaic cells as a consequence of the Fermi energy level shift. *Research in Agricultural Engineering* [online]. 2017, **63**(1), 10-15 [cit. 2022-11-30]. ISSN 12129151. Dostupné z: doi:10.17221/38/2015-RAE
- [13] SALVADOR, P., J. CONNOLLY a A. SÁNCHEZ. Statistical Analysis of the Temperature Coefficients of Industrial Silicon Solar Cells. *Energy Procedia* [online]. 2014, **55**, 578-588 [cit. 2022-12-10]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2014.08.029
- [14] DUPRÉ, O., R. VAILLON a M.A. GREEN. Physics of the temperature coefficients of solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 2015, **140**, 92-100 [cit. 2022-12-10]. ISSN 09270248. Dostupné z: doi:10.1016/j.solmat.2015.03.025
- [15] EMERY, K., J. BURDICK a Y. CAIYEM, et al. Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems. *Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1996* [online]. IEEE, 1996, 1996, 1275-1278 [cit. 2022-12-10]. ISBN 0-7803-3166-4. Dostupné z: doi:10.1109/PVSC.1996.564365
- [16] NIASAR, A. Journal of Alternate Energy Sources & Technologies: Implementation of Solar Cells and Natural Gas Fuel Cells as a Green Hybrid Power Plant [online]. 2013. [cit. 2022-11-30]. ISSN 2230 -7982. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/290728399_Implementation_of_Solar_Cells_and_Natural_Gas_Fuel_Cells_as_a_Green_Hybrid_Power_Plant
- [17] SHARAF, M., M. S. YOUSEF a A. S. HUZAYYIN. Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. 2022, **29**(18), 26131-26159 [cit. 2022-12-10]. ISSN 0944-1344. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-022-18719-9
- [18] KOTLÍK, V. Heat Pipe: princip a konstrukce. *Svethardware* [online]. 1.2.2007 [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/heat-pipe-princip-a-konstrukce/15941>

- [19] VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*. Bučovice: Martin Stríž, 2015. ISBN 978-808-7106-907.
- [20] Klon Arduino UNO R3 CH340. *Dratek* [online]. [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/1258-eses-klon-arduino-uno-r3-ch340.html?utm_source=eHub&utm_medium=affiliate&ehub=368744f97a234826a876bd03480af76e
- [21] Arduino UNO R3, klon. In: *Arduinopl-shop* [online]. 2022 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.arduinopl-shop.cz/arduino-uno-r3--klon/>
- [22] Průmyslový zdroj S-60-12, 12V/60W spínaný. *Hadex* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.hadex.cz/g580b-prumyslovy-zdroj-s-60-12-12v60w-spinany/?gclid=EAIaIQobChMIYKPoq-Q_wIVTqXVCh1YxQNiEAQYASABEGLL9vD_BwE
- [23] Maxim Integrated Products. [online katalogový list]. *MAX6675*. 2002. [cit.2023-05-25]. Dostupné z: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/73692/MAXIM/MAX6675/126/1/MAX6675.html>
- [24] HB Corporation. [online katalogový list]. *TEC1-12708*. 2002 [cit.2023-05-25]. Dostupné z: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/313842/HB/TEC1-12708/27/1/TEC1-12708.html>
- [25] LOFLIN, Lewis. TC4420hb. *Bristolwatch* [online]. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://bristolwatch.com/TC4420/TC4420hb.htm>
- [26] International IOR Rectifier . [online katalogový list]. *IRF4905*. 1997. [cit.2023-05-25]. Dostupné z: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/68156/IRF/IRF4905/403/8/IRF4905.html>
- [27] How to Calculate MOSFET Power Dissipation. *Electronicsbeliever* [online]. 2023 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://electronicsbeliever.com/how-to-calculate-mosfet-power-dissipation/>
- [28] TelCom Semiconductor. [online katalogový list]. *TC4420*. 1996. [cit.2023-05-25]. Dostupné z: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/26024/TELCOM/TC4420/180/1/TC4420.html>
- [29] Printed Circuit Board Width Tool. *4pcb* [online]. 2018 [cit. 2023-05-29]. Dostupné z: <https://www.4pcb.com/trace-width-calculator.html>

- [30] Krabíčka plastová KM85 178x160x85mm. *Hadex* [online]. [cit. 2023-05-29].
Dostupné z: <https://www.hadex.cz/o208c-krabicka-plastova-km85-178x160x85mm/>
- [31] Solární panel 6,0V/4,5W polykrystalický II mini. *Tipa* [online]. [cit. 2023-05-29].
Dostupné z: <https://www.tipa.eu/cz/solarni-panel-60v-45w-polykrystalicky-ii-mini/d-266072/>
- [32] VAJDA, Drahoslav. Vyhodnocovanie chyby merania. *Fyzika.utc* [online]. 2014
[cit.2023-05-25].Dostupné z:
<http://www.fyzika.utc.sk/praktika/Ulohy/Uvod/chyby.pdf>
- [33] RADA, Václav. Teorie měření a regulace. *Fce.vutbr* [online]. 2015
[cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/tst/rada.v/TMaR/t-mar-2015-3bcv-CHY1.pdf>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

FV	Fotovoltický
STC	Standard Test Conditions (Štandardné testovacie podmienky)
MPP	Maximum power point (Bod maximálneho výkonu)
FF	Fill factor (Činiteľ plnenia)
PV/T	Photovoltaic/Thermal (Fotovoltický/tepelný)
LCD	Liquid-crystal display (Displej s kvapalnými kryštálmi)
PWM	Pulse Width Modulation (Impulzová šírková modulácia)
USB	Universal Serial Bus (Univerzálna sériová zbernica)
ISCP	In-Circuit Serial Programming (Obvodové sériové programovanie)
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter (Univerzálny asynchrónny prijímač-vysielač)
SRAM	Static Random Access Memory (Statická pamäť)
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (Elektricky vymazateľná pamäť)
DPS	Doska plošných spojov
THT	Through Hole Technology (zástrčná montáž)

Symboly:

E_e	energia elektrónu	(J)
h	plancková konštanta	(J.s)
f	frekvencia	(Hz)
c	rýchlosť svetla	(m/s)
λ	vlnová dĺžka	(m)
ϕ	výstupná práca elektrónu	(J)
E_K	výstupná práca elektrónu	(J)
AM	koeficient hmotnosti vzduchu	(-)
I_D	prúd prechádzajúci diódou	(A)
I_p	prúd prechádzajúci paralelným odporom	(A)
R_s	sériový odpor FV článku	(Ω)

R_p	paralélly odpor FV článku	(Ω)
I_{SC}	prúdy nakrátko	(-)
U_{OC}	napätie naprázdno	(A)
η	účinnosť	(-)
P_{PMM}	maximálny dodávaný výkon FV článkom	(W)
U_{PMM}	napätie v bode maximálneho výkonu	(V)
I_{PMM}	prúdy v bode maximálneho výkonu	(A)
FF	činiteľ plnenia	(-)
P_{in}	výkon dopadajúceho žiarenia	(W)
β_P	teplotný koeficient výkonu FV článku	(%/°C ⁻¹)
P	okamžitý výkon FV článku	(W)
P_0	okamžitý výkon FV článku pri 25 °C	(W)
ϑ	okamžitá teplota	(°C)
ϑ_0	normalizovaná teplota	(°C)
E	intenzita slnečného žiarenia	(W/m ²)
U_Z	napätie externého zdroja	(V)
I_P	prúdy pretekajúci Peltierovým článkom	(A)
P_P	spotrebovaný výkon Peltierovým článkom	(W)
R_P	vnútorný odpor Peltierovho článku	(Ω)
$R_{DS(ON)}$	odpor tranzistora v zopnutom stave	(Ω)
I_D	maximálny tečúci prúdy tranzistorom	(A)
ΔU	úbytok napätia na tranzistore	(V)
P_S	statické výkonové straty tranzistora	(W)
ΔT	oteplenie tranzistora	(°C)
$R_{\vartheta JA}$	tepelný odpor tranzistora	(°C/W)
$\Delta \vartheta$	absolútna chyba nastavenia teploty	(°C)
ϑ_N	teplota nastavená zariadením	(°C)
ϑ_P	priemerná teplota FV článku	(°C)
$\delta \vartheta$	relatívna chyba nastavenia teploty	(%)
K_ϑ	korekcia nastavenia teploty	(°C)

ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA A – ELEKTRONICKÁ PRÍLOHA	67
---	-----------

Príloha A – Elektronická príloha

Elektronická príloha obsahuje zdrojový kód programu v podobe textového dokumentu (.txt), súbor návrhu schémy (.sch) a súbor rozloženia (.brd) DPS zhotovenej v programe PADS Logic a PADS Layout. Príloha obsahuje ešte štyri 3D modely vytvorených komponentov v rámci konštrukcie zariadenia vo formáte SLDPRT, ktoré boli navrhnuté v programe SolidWorks 2020.