

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektrotechnologie



**Zařízení a postupy pro měření teplotních
charakteristik**

Devices and procedures for measuring temperature characteristics

Diplomová práce

Lukáš Gdula

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

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Technologické systémy

Praha

2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Gdula** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **406143**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Zařízení a postupy pro měření teplotních charakteristik

Název diplomové práce anglicky:

Devices and procedures for measuring temperature characteristics

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište základní principy řízení laboratorního prostředí při testech fotovoltaických článků, modulů a při testech bateriových systémů.
- 2) Dokončete návrh a realizujte systém řízení mikroprostředí pro potřeby testů v laboratoři diagnostiky FV systémů.
- 3) Realizujte vzorová měření a určete mezní parametry vámi navrženého systému.

Seznam doporučené literatury:

- [1] REDDY, Thomas B. a David. LINDEN. Linden's handbook of batteries. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-007-1624-213.
- [2] ČERNÁ, L., KUŘÍK, O., a BENDA, V. Zařízení pro měření neosvětlených fotovoltaických článků. [Funkční vzorek]. 2010
- [3] Gray, Jeffery L. The Physics of the Solar Cell. A. Luque a S. Hegedus. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Chichester : John Wiley & Sons, Ltd., 2003, 3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **27.09.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2020**

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma zařízení a postupy pro měření teplotních charakteristik vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí práce.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Lukáš Gdula

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu práce Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D. za užitečné rady, trpělivost, pomoc při zpracování a za vedení této práce.

Obsah

1. Teoretická část	11
1.1 Úvod	11
1.2 Klimatická komora	11
1.2.1 Typy klimatických komor	12
1.2.1.1 Tepelná komora.....	12
1.2.1.2 Vlhkostní komora.....	12
1.2.1.3 Šoková teplotní komora.....	12
1.2.1.4 Korozní komora	12
1.2.1.5 Vibrační komora	12
1.2.1.6 Tlaková komora	13
1.2.1.7 Stolová komora.....	13
1.2.1.8 Walk-in komora.....	13
1.2.1.9 Drive-in komora	14
1.2.2 Změna teploty vzduchu	15
1.2.2.1 Ohřev vzduchu	15
1.2.2.2 Chlazení vzduchu	16
1.2.3 Cirkulace vzduchu.....	18
1.3 Zkoušky fotovoltaiky	19
1.3.1 Vizuální kontrola.....	19
1.3.2 Měření VA charakteristiky	19
1.3.2.1 Proud nakrátko	20
1.3.2.2 Napětí naprázdno	20
1.3.2.3 Bod maximálního výkonu	20
1.3.2.4 Činitel plnění.....	21
1.3.2.5 Účinnost.....	21

1.3.2.6	Koeficient atmosferické masy	21
1.3.2.7	Vliv teploty na VA charakteristiku	22
1.3.3	Izolační zkouška.....	24
1.3.4	Termovizní diagnostika	24
1.3.5	Elektroluminiscence	25
1.4	Klimatické zkoušky fotovoltaiky	26
1.4.1	Zkouška teplotním cyklováním.....	26
1.4.2	Zkouška vlhkým teplem.....	27
1.4.3	Zkouška cyklováním vlhkost-mráz	27
1.5	Zkoušky bateríí	28
1.6	Možnosti regulace.....	29
1.6.1	Dvoustavová regulace.....	29
1.6.2	PID regulace	30
2.	Popis výchozího stavu.....	32
2.1	Aparatura	32
3.	Zprovoznění zařízení.....	37
3.1	Konstrukční úpravy aparatury.....	37
3.2	Chladič.....	38
3.3	Teplotní senzory	38
3.2	Řídicí jednotka	40
3.3	Uživatelské rozhraní	41
3.3.1	Ovládání aparatury.....	42
3.3.2	Blokové schéma.....	43
4.	Měření a vyhodnocení výsledků.....	45
4.1	Měřicí sestava	46
4.2	Průběh měření	46

4.3. Naměřené hodnoty na fotovoltaickém článku.....	48
5. Závěr	50
6. Přílohy	51
7. Zdroje	53
8. Kontaktní adresa	54

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na problematiku měření teplotních charakteristik fotovoltaických článků, modulů a bateriových systémů. V práci jsem navázal na projekt Aparatura pro měření teplotní závislosti temných charakteristik fotovoltaických článků, který vypracoval Bc. Ondřej Červený. Jeho částečně zkonstruované zařízení jsem opravil a zkompletoval pro praktické laboratorní využití.

Abstract

Diploma thesis is focused on the measurement of temperature characteristics of photovoltaic cells, modules and battery systems. In my work I followed the project Apparatus for measuring temperature dependence of dark characteristics of photovoltaic cells, which was elaborated by Bc. Ondřej Červený. I repaired and assembled his partially constructed equipment for practical laboratory use.

Klíčová slova

Klimatická komora, Fotovoltaický článek, Voltampérová charakteristika, Arduino Nano, LabVIEW

Key words

Climate chamber, Photovoltaic cell, Volt-ampere characteristic, Arduino Nano, LabVIEW

Použité symboly a konstanty

RV	Relativní vlhkost [%]
Q	Energie [J]
m	Hmotnost [kg]
c	Měrná tepelná kapacita [J/kg*K]
ΔT	rozdíl teplot [K]
Wh	Watt hodina
P	Příkon [W]
η	Účinnost ohřevu
τ	Doba ohřevu [h]
FV	Fotovoltaika
V-A char.	Voltampérová charakteristika
STC	Standard Test Conditions (Standardní testovací podmínky)
AM	Koeficient atmosferické masy
G	Intenzita slučeního záření [W/m ²]
θ	teplota [°C]
U _{OC}	Napětí naprázdno [V]
I _{SC}	Proud nakrátko [A]
P _{MPP}	Maximální výkon [W]
U _{MPP}	Napětí v bodě maximálního výkonu [V]
I _{MPP}	Proud v bodě maximálního výkonu [A]
FF	Fill factor (činitel plnění)

l_x	Skutečná vzdálenost paprsku v atmosféře [m]
l_0	Kolmá vzdálenost paprsku v atmosféře [m]
θ	Úhel mezi Sluncem a zenitem [°C]
φ	Úhel mezi dopadajícím paprskem a horizontem [°C]
e	Náboj elektronu, $e = 1,602176487 \cdot 10^{-19}$ C
η	Diodový faktor [-]
k	Boltzmannova konstanta, $k = 1,3806505 \cdot 10^{-23}$ Js
T	Termodynamická teplota [K]
A	Plocha [m ²]
n_i	Intrinzičná koncentrace [1/m ³]
$D_{n(p)}$	Difuzní koeficient elektronů (děr) [m ² /s]
$L_{n(p)}$	Difuzní délka elektronů (děr) [m]
p_{p0}	Rovnovážná koncentrace děr [1/m ³]
n_{N0}	Rovnovážná koncentrace elektronů [1/m ³]
E_g	Šířka zakázaného pásu [eV]

1. Teoretická část

1.1 Úvod

S rostoucím rozšířením elektrotechnických výrobků jako jsou fotovoltaické moduly a baterie rostou i nároky na jejich spolehlivost a životnost. Nejenže se zvětšuje počet vyráběných a instalovaných výrobků, ale zároveň je širší i jejich geografické uplatnění. Výrobky tak často musí splňovat podmínky funkčnosti od tropického vlhkého a teplého klimatu, přes suchá horka pouští až po arktické mrazy. Pro ověření funkčnosti, životnosti a spolehlivosti v daných podmínkách nám slouží zařízení nazývané klimatická komora. Ta nám umožní simulovat reálná prostředí a pokud nastavíme vhodné podmínky tak i urychlené stárnutí. Během relativně krátkého času můžeme ověřovat životnost a provozuschopnost výrobků vystavených běžným podmínkám po několika letech. Další využití klimatické komory je pro analýzu poruch díky klimatické stimulaci.

1.2 Klimatická komora

Klimatické komory jsou zařízení ve kterých jsou po danou dobu řízeně udržovány zvolené klimatické podmínky. Typicky se jedná teplotu a vlhkost vzduchu, ale může jít i o tlak (nadmořská výška) a solnou mlhu (koroze). Speciálním případem jsou komory pro zkoušky mechanických a elektro-dynamických vibrací strojních zařízení. Konstrukce klimatických komor bývá obdobná. Skládají se ze zkušebního prostoru, kde je uložen testovaný přípravek v řízeném prostředí. Další součástí jsou klimatické jednotky, kde je vzduch ochlazován/oteplován a vlhčen/odvlhčován. Průtok vzduchu je typicky řízen za pomoci ventilátorů, jedná se tedy o řízenou cirkulaci vzduchu v komoře (1).

Základními parametry klimatických komor jsou

- teplotní rozsah a přesnost regulace teploty
- rychlost změny teploty za jednotku času
- rozsah vlhkosti a přesnost regulace
- rychlost změny vlhkosti za jednotku času
- objem komory

1.2.1 Typy klimatických komor

Klimatické komory můžeme dělit podle jejich primárního klimatické určení, často ovšem kombinují více klimatických parametrů zároveň. Další možnost rozdělení je podle jejich velikosti, respektive objemu zkušebního prostoru.

1.2.1.1 Tepelná komora

Umožňuje nastavení a udržování požadované teploty. Typicky v rozsahu -80 °C až 200 °C.

1.2.1.2 Vlhkostní komora

Umožňuje udržovat požadovanou relativní vlhkost vzduchu při stálé teplotě nebo proměnné teplotě. Typicky v rozsahu 10 – 100 % RV.

1.2.1.3 Šoková teplotní komora

Umožňuje aplikovat na testované vzorky teplotní šok, tedy významnou změnu teploty v krátkém čase. Tyto komory obsahují dvě zóny o rozdílné teplotě v případě typu vzduch-vzduch, nebo dvě lázně u typu kapalina-kapalina. Testovaný vzorek je pomocí zdviže přesouván z jednoho prostředí do druhého. Typický rozsah teplot je obdobný jako u tepelné komory a rychlost přesunu záleží na typu konstrukce, ale řádově se pohybuje v jednotkách až desítkách sekund.

1.2.1.4 Korozní komora

V této komoře je testovaný vzorek vystaven mlze chloridu sodného za vysoké relativní vlhkosti a konstatní, nebo cyklicky měněné teploty. V některých případech se mlha roztoku chloridu sodného (NaCl) okyseluje kyselinou octovou (CH₃COOH), případně přidává chlorid měďnatý (CuCl₂). Některé typy korozních komor umožňují i provedení Kesternichovy zkoušky (2). Při té je vzorek exponován oxidu siřičitému (SO₂) a oxidu uhličitému (CO₂). Tím se simuluje agresivní průmyslové prostředí pro elektrotechnické výrobky. Typické rozmezí teplot je - 40 až 100 °C a RV 20 až 100%.

1.2.1.5 Vibrační komora

Umožňuje provádět horizontální i vertikální vibrace. V kombinaci s klimatickými změnami se testuje funkčnost a životnost výrobku.

1.2.1.6 Tlaková komora

Umožňuje simulovat vysokou nadmořskou výšku za pomoci nízkého tlaku.

1.2.1.7 Stolová komora

Nejrozšířenější typ klimatických komor z hlediska objemu, jedná se o menší komory s objemem od jednotek do několika stovek litrů. Vhodné zejména do laboratoří na testování menších výrobků nebo materiálových vzorků.



Obrázek 1: Stolová komora ESPEC řady SH/SU

1.2.1.8 Walk-in komora

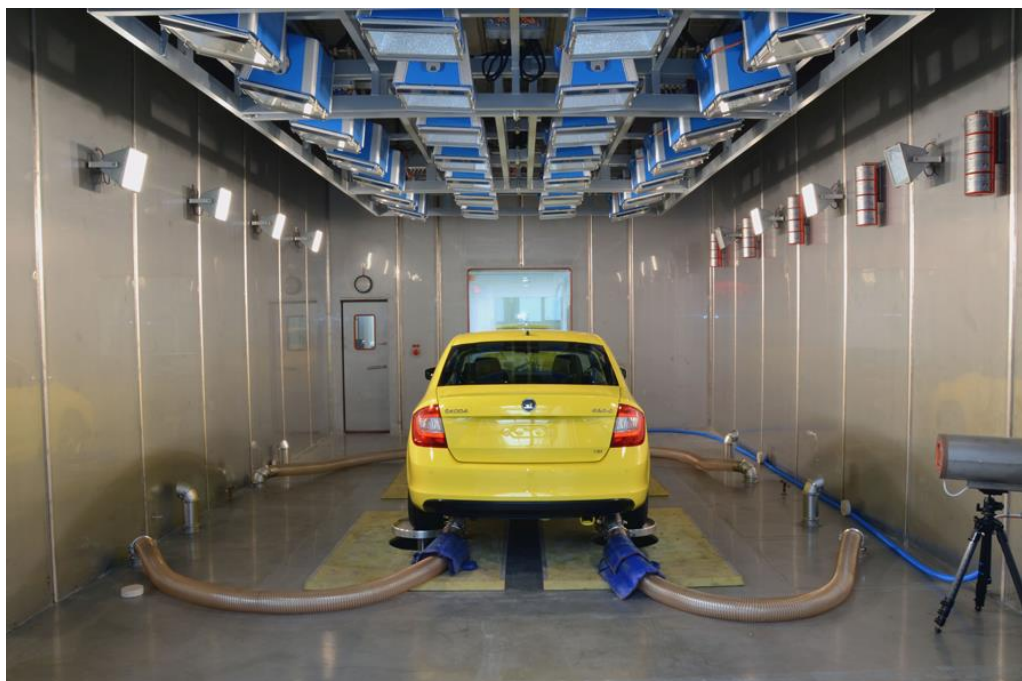
Jak napovídá název jedná se o komory velkých rozměrů. V podstatě je to celá místnost, kde je udržováno požadované klimatické prostředí. Běžné provedení je "kontejnerového typu". Objem je typicky 2 – 70 m³.



Obrázek 2: Velkoobjemová klimatická komora ClimeEvent

1.2.1.9 Drive-in komora

Velikostí obdobná walk-in komoře, ale využívaná výhradně pro testování vozidel. Umožňuje simulovat vlivy teploty, vlhkosti, vibrací a slunečního záření.



Obrázek 3: Drive-in klimatická komora

1.2.2 Změna teploty vzduchu

Pro potřeby mé práce se dále budu zabývat pouze teplotními komorami. Při ohřevu vzduchu zůstává u čistě teplotních komor konstantní měrná vlhkost (hmotnost vodní páry na jednotku objemu suchého vzduchu) mění se ale relativní vlhkost vzduchu. Ta s rostoucí teplotou klesá (poměr hmotnosti vodní páry při dané teplotě a tlaku ku hmotnosti vodní páry za stejné teploty a tlaku v syté páře).

1.2.2.1 Ohřev vzduchu

Ohřev vzduchu může být prováděn několika způsoby.

První možností je využití výměníku voda-vzduch. Nejčastěji se jedná o lamelové výměníky tvořené měděnými trubkami a hliníkovými lamelami. Teplonosná látka je voda z otopné soustavy nebo samostatného zdroje (bojleru). Potřebnou energii můžeme spočítat ze známého vzorce.

$$Q = m * c * \Delta T$$

Rovnice 1: Množství tepla

Pokud budeme uvažovat jako teplonosnou látku vodu, pak bude měrná tepelná kapacita $c = 4186 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$. Pro snazší výpočet můžeme převést měrnou tepelnou kapacitu z J na Wh.

$$W = \frac{J}{s} \rightarrow W * s = J \rightarrow W * 3600 * s = 3600 * J \rightarrow J = \frac{W * h}{3600}$$

Rovnice 2: Jednotkové odvození převodu z J na Wh

Měrnou tepelnou kapacitu pak tedy můžeme vyjádřit takto.

$$c_{Wh} = \frac{4186 \text{ W} * \text{h}}{3600 \text{ kg} * \text{K}} = 1,163 \frac{\text{W} * \text{h}}{\text{kg} * \text{K}}$$

Rovnice 3: Měrná tepelná kapacita

Výsledné množství energie potřebné pro ohřev daného množství vody vypočteme pomocí následujícího vzorce (3), kde ΔT je rozdíl vstupní a výstupní teploty, P je příkon topného tělesa, η účinnost ohřevu a τ doba potřebná pro ohřev v hodinách .

$$E = m * c_{wh} * \Delta T = P * \eta * \tau$$

Rovnice 4: Potřeba energie

Pro ohřev na vysoké teploty se využívá parních ohřivačů, jelikož mají vyšší výkon. Nevýhodou je nutnost bytelnější struktury výměníku kvůli vysokému tlaku. Obvykle se používají ocelové trubky.

U menších zařízení kde nám dostačuje nižší výkon se s výhodou používá elektrických ohřivačů. Mají tvar tyčí nebo spirál. V podstatě se jedná o odporové topné kabely, regulace je tedy jednoduchá pomocí změny proudu. U těchto zařízení není třeba řešit ochranu proti zamrznutí.

1.2.2.2 Chlazení vzduchu

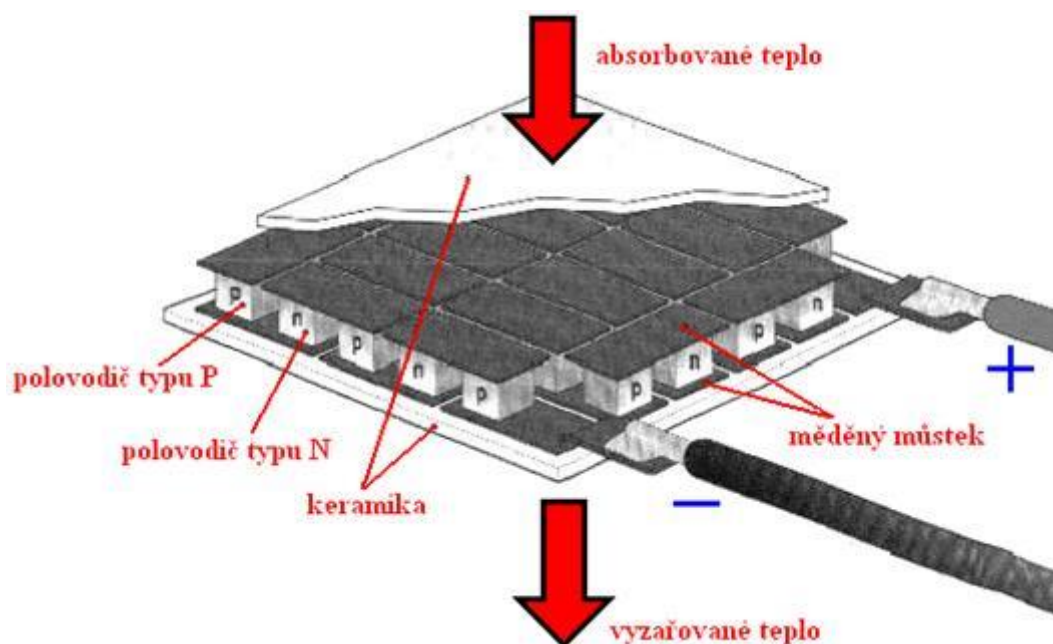
Chlazení vzduchu můžeme rozdělit na dva typy mokré a suché chlazení. Při mokřém chlazení dochází ke kondenzaci na povrchu chladiče. Důvodem je, že povrchová teplota chladiče je nižší než teplota rosného bodu. Mění se měrná vlhkost vzduchu. U suchého chlazení ke kondenzaci nedochází a měrná vlhkost vzduchu se tedy nemění.

Chladič vzduchu může být realizován jako výměník voda-vzduch. Opět měděné trubky s hliníkovými lamelami. Teplonosná látka je voda nebo nemrzoucí kapalina pro dosažení záporných teplot.

Druhou možností je výměník chladivo-vzduch. Chladivo se vstříkuje do výparníku, kde se odpaří a přes stěny výparníku odebere teplo, tím že zkondenzuje. Výhodou je vyšší chladicí výkon díky využití změn skupenství kapalina-plyn a nižší dosažitelná teplota. Nevýhodou je obtížná regulace, nutnost použít chladicí kapaliny a jejich náchylnost k namrznání.

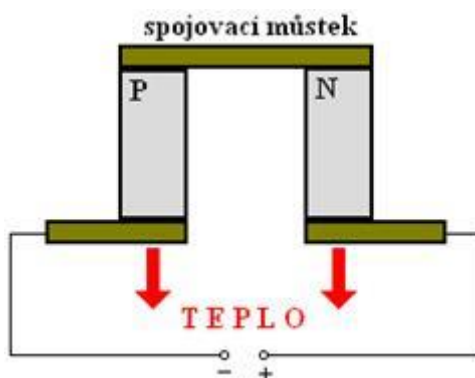
V případě kdy dostačuje malý chladicí výkon se dá použít Peltierův článek. Jeho nevýhodou je vyšší spotřeba elektrické energie. Ovšem mají vysokou životnost, tichý chod, snadno se regulují. V případě potřeby se změnou polarity stejnosměrného proudu dají využít i jako topení. Peltierův článek využívá Peltierova jevu. Při průchodu elektrického proudu oběma

kovy se vytvoří teplotní rozdíl a v závislosti na polaritě budeme jeden spoj ochlazovat druhý ohřívat.



Obrázek 4: Peltierův článek

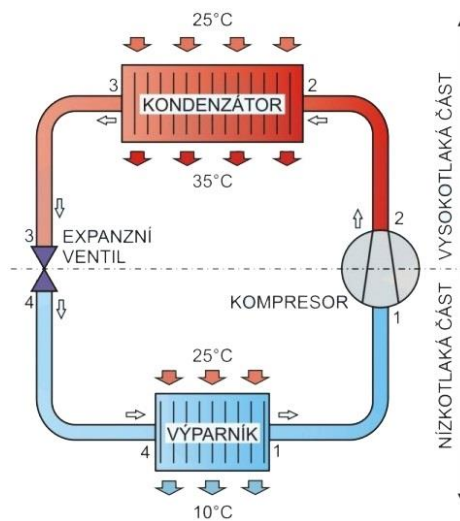
Základem jsou dvě tělíska polovodičů, jedno typu P (Bi-Sb-Te) a druhé typu N (Bi-Te-Se). Ty jsou spojené spojovacím můstkem.



Obrázek 5: Detail Peltierova článku

Pokud potřebujeme velký chladicí výkon je nejběžnější využití chladicího kompresoru. To je známý princip běžně využívaný u chladniček a mrazáků. Skládá se z chladicího okruhu a kompresoru. Důležitá je volba chladiva, která nám stanoví mezní hodnoty teploty. Teplota varu vody je při atmosférickém tlaku 100 °C, pokud ale tlak zvýšíme, teplota varu roste. Tohoto

principu využívá Papinův hrnec, kde dosahujeme teploty varu vody 130 °C a tím zkrátíme dobu přípravy pokrmů. Opačný efekt můžeme zažít při pobytu ve vyšší nadmořské výšce. S klesajícím tlakem klesá i teplota bodu varu, takže ve výšce 6000 m.n.m. bude pouze 85 °C. V ledničkách se používali chladiva známá jako freony, od těch se již vzhledem k ekologickým důvodům upustilo, ale používají se chladiva podobných vlastností. Princip funkce je tedy následující. Kompresor chladivo v plynném stavu vtlačí do výměníku. Zde se plyn ochladí a kondenzuje, přebytečné teplo se uvolní do okolí. Pro představu je to žebrování na zadní straně chladniček. Kapalina dále putuje skrz expanzní ventil do výparníku, který je v chladné části. Ve výparníku jsou trubky s větším průměrem než v kondenzátoru, tím dojde k prudkému snížení tlaku chladicího media. Zároveň se s tím sníží teplota varu a kapalina se začne vypařovat. Teplo potřebné pro skupenskou přeměnu je odebíráno z vnitřku chladného prostoru. Plyn je přiváděn zpět do kompresoru a cyklus se opakuje (4).



Obrázek 6: Kompresorové chlazení

Další možností jak chladit komoru s velkým výkonem je využití vodního chlazení. Tedy výměníku voda-vzduch. Jedná se o běžně používané chladiče, nevýhoda je, že chlazený prostor musí mít vyšší teplotu, než prostor kde teplo disipujeme.

1.2.3 Cirkulace vzduchu

Vzduchotechnika zajišťuje přívod a odvod vzduchu. Rozlišujeme dva typy cirkulace. Přirozená cirkulace je způsobena fyzikálním jevem, teplých vzduch má nižší hustotu a proto

stoupá vzhůru nad studený vzduch a díky tomu vzniká přirozená cirkulace. Nucené cirkulace je dosaženo pomocí ventilátorů, které zaručují proudění vzduchu.

1.3 Zkoušky fotovoltaiky

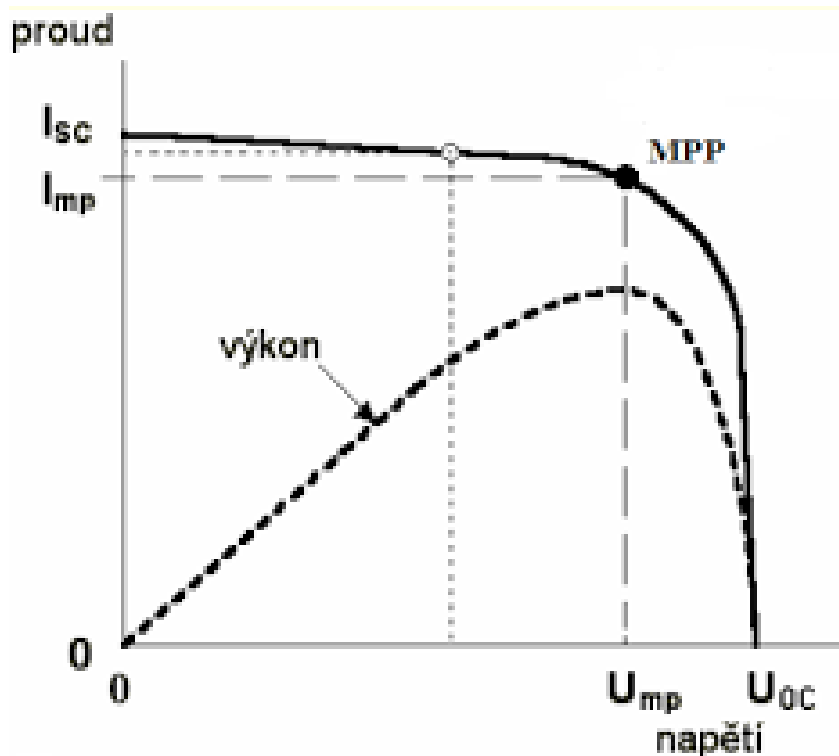
Diagnostika FV panelů pomáhá odhalit defekty na FV panelech i jednotlivých FV článcích. Jejich zjištění má zásadní roli ve výzkumu, vývoji a výrobě. V principu se dělí na dvě části. Měření elektrických parametrů (V-A charakteristika, měření kapacit, šumu) a optickou diagnostiku.

1.3.1 Vizuelní kontrola

Nejjednodušší a nejrychlejší zkouška. Lokalizuje viditelné vizuelní vady na FV panelu, které potenciálně ovlivňují jeho výkon. Výsledkem je fotodokumentace s popisem vad.

1.3.2 Měření VA charakteristiky

Základní zkouška FV panelu. Vhodné je využít solární analyzátor. Běžně se provádí za standardních testovacích podmínek (STC). Ty jsou dle normy (5) definovány jako intenzita záření $G = 1000 \text{ W/m}^2$, AM 1,5 při teplotě $\theta = 25^\circ\text{C}$. Výsledkem této zkoušky je získání výkonových parametrů modulu. Těmi jsou napětí naprázdno (U_{OC}), proud nakrátko (I_{SC}), maximální výkon (P_{MPP}), napětí maximálního výkonu (U_{MPP}), proud maximálního výkonu (I_{MPP}), účinnost (η) a činitel využití (FF) (6).



Obrázek 7: VA charakteristika

1.3.2.1 Proud nakrátko

Jedná se o nejvyšší hodnotu proudu, kterou můžeme získat z článku při určité úrovni osvětlení. Měříme jí, jak název napovídá, při spojení nakrátko, tedy ve zkratu. I_{sc} je pro křemíkové články při obvyklé úrovni osvětlení kolem 3,6 A.

1.3.2.2 Napětí naprázdno

Napětí naprázdno je nejvyšší hodnota napětí měřitelná na svorkách fotovoltaického článku. Měříme ji při odpojené zátěži. Jeho hodnota je pro křemíkové články běžně kolem 0,6 V.

1.3.2.3 Bod maximálního výkonu

Bod maximálního výkonu je maximum součinu napětí a proudu, takže se jedná o nulovou derivaci výkonu. Značí se MPP, P_{MPP} nebo také P_{max} , příslušné hodnoty napětí a proudu U_{mp} a I_{mp} . Systémy obsahující MPP tracker, neboli sledovač maximálního výkonu kontrolují tuto hodnotu a zajišťují, aby fotovoltaický panel pracoval poblíž ideálního bodu MPP.

1.3.2.4 Činitel plnění

Činitel plnění neboli Fill factor, je poměr maximálního výkonu MPP a nejvyšším teoretickým výkonem, který je dán součinem napětí naprázdno a proudu nakrátko. Snažíme se mít co nejvyšší hodnotu FF. Obvykle je kolem 0,8. Hlavní faktor ovlivňující jeho hodnotu je kvalita PN přechodu.

$$FF = \frac{U_{mp} * I_{mp}}{U_{0c} * I_{sc}} (-)$$

Rovnice 5: Fill factor

1.3.2.5 Účinnost

Všeobecně je účinnost poměr výkonu a příkonu. Pro problematiku fotovoltaiky bereme příkon jako intenzitu osvětlení (vstupní výkon) a výkon uvažujeme maximální bod výkonu.

$$\eta = \frac{MPP}{P_{IN}} = \frac{FF * U_{0c} * I_{sc}}{P_{IN}} (-)$$

Rovnice 6: Účinnost FV článku

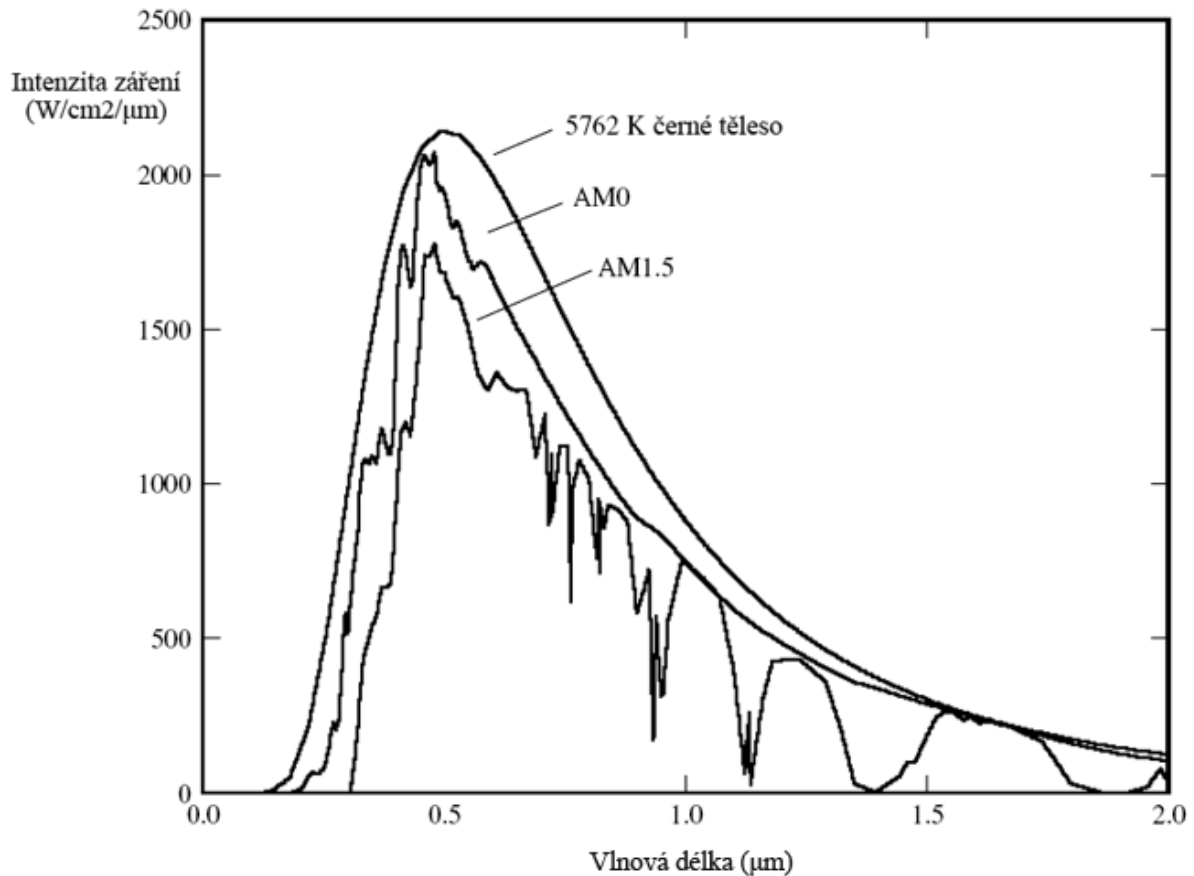
1.3.2.6 Koeficient atmosferické masy

Koeficient atmosferické masy AM je podíl vzdálenosti, kterou paprsek reálně urazí při průchodu atmosférou, ku vzdálenosti, kdyby paprsek dopadal kolmo na horizontální rovinu. Hodnotu AM můžeme také vyjádřit pomocí úhlu θ , což je úhel mezi Sluncem a zenitem nebo pomocí úhlu φ , což je úhel který svírá dopadající paprsek s horizontální rovinou.

$$AM = \frac{l_x}{l_0} = \frac{1}{\cos\theta} = \frac{1}{\sin\varphi} (-)$$

Rovnice 7: Koeficient atmosferické masy

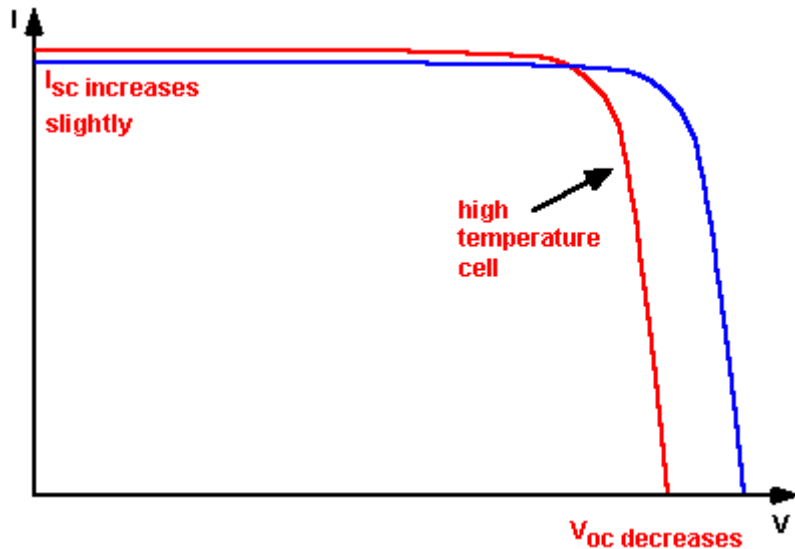
Na následujícím obrázku je možnost srovnat spektrální hustotu záření výkonu (intenzitu dopadajícího záření) absolutně černého tělesa s AM 0, tedy spektrální intenzitu slunečního záření mimo atmosféru a AM 1,5, tedy spektrální intenzitu slunečního záření pro STC. Hodnota AM 1, by platila pro paprsek kolmo dopadající k zemi, tedy na rovníku v den rovnodennosti.



Obrázek 8: Spektrální hustota dopadajícího výkonu

1.3.2.7 Vliv teploty na VA charakteristiku

Solární články jsou, jako většina polovodičů, teplotně velmi závislá. S rostoucí teplotou se zmenšuje šířka zakázaného pásu, kterou můžeme interpretovat také, jako zvyšující se energii elektronů v materiálu. Tím pádem stačí dodat nižší energii pro vyražení elektronu z vazby. U fotovoltaických článků je nejvíce ovlivněným parametrem napětí naprázdno.



Obrázek 9: VA charakteristika při rozdílných teplotách

Nejprve si uvedeme Shockleyho obecnou rovnici pro diodu. Zde I_0 je nasycený proud, U_D difúzní napětí na diodě, η je diodový faktor, k Boltzmannova konstanta, e elementární náboj elektronu a T termodynamická teplota.

$$I = I_0 * \left(e^{\frac{e * U_D}{\eta * k * T}} - 1 \right)$$

Rovnice 8: Shockleyho rovnice

Dále z předchozí rovnice vyjádříme difúzní proud. Kde e je elementární náboj elektronu, A je plocha, $D_{n(p)}$ difúzní koeficient elektronů (děr), n_i intrinzická koncentrace, $L_{n(p)}$ difúzní délka elektronů (děr), p_{P0} rovnovážná koncentrace děr v oblasti P a n_{N0} rovnovážná koncentrace elektronů v oblasti N.

$$I_0 = e * A * n_i^2 * \left(\frac{D_n}{L_n * p_{P0}} + \frac{D_p}{L_p * n_{N0}} \right)$$

Rovnice 9: Difúzní proud

V této rovnici je většina parametrů teplotně závislá, největší teplotní závislost má ale intrinzická koncentrace. Se zmenšující se šířkou zakázaného pásu koncentrace roste. Můžeme tedy napsat následující rovnici pro intrinzickou koncentraci. Kde B je konstanta nezávislá na teplotě, a E_g šířka zakázaného pásu.

$$n_i^2 = B * T^3 * e^{(-\frac{E_g}{k*T})} \rightarrow \frac{\partial U_{OC}}{\partial T} < 0$$

Rovnice 10: Intrinzická koncentrace

Napětí naprázdno klesá s rostoucí teplotou, u fotovoltaických článků z krystalického křemíku je pokles kolem 0,4%/K. Dále s vyšší teplotou roste sériový odpor a snižuje se odpor paralelní. Jak je patrné z obrázku 9, tak proud nakrátko se zvýší. Je to dáno tím, že šířka zakázaného pásu je nižší a tím pádem víc fotonů má energii potřebou pro vytvoření páru elektron – díra. Tento efekt je ale částečně negován nárůstem sériového odporu a ve výsledku je tedy neznatelný. Činitel plnění a účinnost s rostoucí teplotou také klesají.

$$\frac{\partial FF}{\partial T} < 0 \quad \frac{\partial \eta}{\partial T} < 0$$

Rovnice 11: Vliv teploty na FF a účinnost

Celkově tedy má rostoucí teplota negativní vliv na vlastnosti fotovoltaického článku. Kvalitnější články mají nižší teplotní závislost.

1.3.3 Izolační zkouška

Zjišťuje zda izolace mezi FV články a rámem vyhovuje požadavkům normy ČSN EN 61215 ed.2. Zkouška se provádí za standardních testovacích podmínek.

1.3.4 Termovizní diagnostika

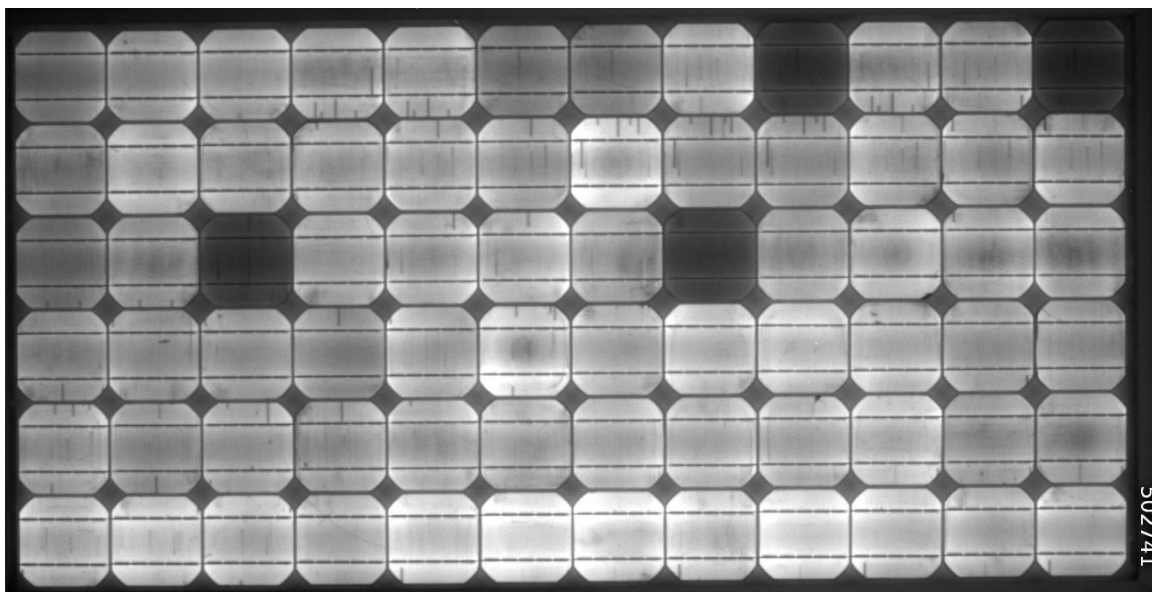
Za využití infračervené (IR) kamery jsme schopni pořídít záznam IR záření z FV panelu. To nám zobrazí rozložení povrchové teploty. Pro měření musíme zajistit dostatečně velkou intenzitu záření tepelného toku. Dále je výhodné provádět diagnostiku ze zadní strany, neboť sklo na přední straně má nízkou emisivitu a tím je diagnostika obtížnější. Pomocí této metody jsme schopni odhalit řadu defektů. Například přechodové odpory v pájeném spoji, konektoru, nízký R_p jednotlivých článků, vadnou bypass diodu nebo rozdíl VA charakteristik jednotlivých článků na daném modulu. Řízení prostřední je pro toto měření irelevantní, musíme ho ale monitorovat.



Obrázek 10: Termovizní diagnostika

1.3.5 Elektroluminiscence

Tato metoda využívá opačného jevu než je běžné využití FV panelu. Pokud necháme FV článkem protékat proud o velikosti blízké I_{SC} je z materiálu emitováno světelné záření (zářivá rekombinace), jehož vlnová délka závisí na materiálu. Pro křemík jsou fotony vyzařovány na vlnové délce 1100 nm, to je mimo viditelné spektrum. Musíme tedy využít speciální CCD kameru. Z té získáme šedý obraz, kde světlé části ukazují místa, kde bylo emitováno hodně fotonů a temná místa, kde málo. Takto můžeme zjistit nehomogenity a lokální poruchy.



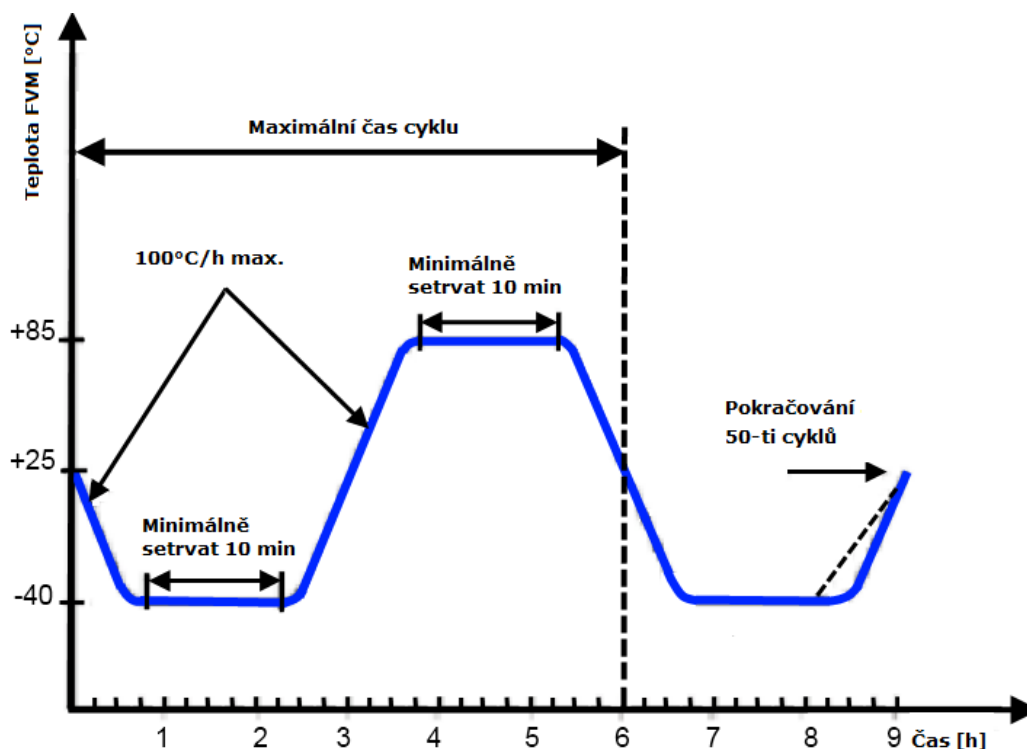
Obrázek 11: Záznam CCD kamery - elektroluminiscence

1.4 Klimatické zkoušky fotovoltaiky

Díky klimatickým zkouškám jsme schopni simulovat zrychlené stárnutí fotovoltaických panelů a tím pádem zjistit jejich předpokládané vlastnosti po dlouhé době reálného provozu. Testování fotovoltaických modulů z krystalického křemíku specifikuje mezinárodní norma ČSN EN 61215 ed.2 (5). Provádíme běžné zkoušky fotovoltaiky a srovnáváme naměřené hodnoty před a po klimatické zkoušce.

1.4.1 Zkouška teplotním cyklováním

Základem zkoušky je ověřit odolnost proti teplotnímu namáhání. Provádíme 50 cyklů. Čas jednoho cyklu je maximálně 6 hodin během této doby je FV modul vystaven teplotě -40°C (+2°C) a teplotě 85°C (+2°C) po dobu minimálně 10 minut. Rychlost změny teploty během přechodu nesmí přesáhnout 100 °C/h. Vlivem rozdílné tepelné roztažnosti materiálů, ze kterých se FV modul skládá se po provedení zkoušky podaří odhalit skryté vady.



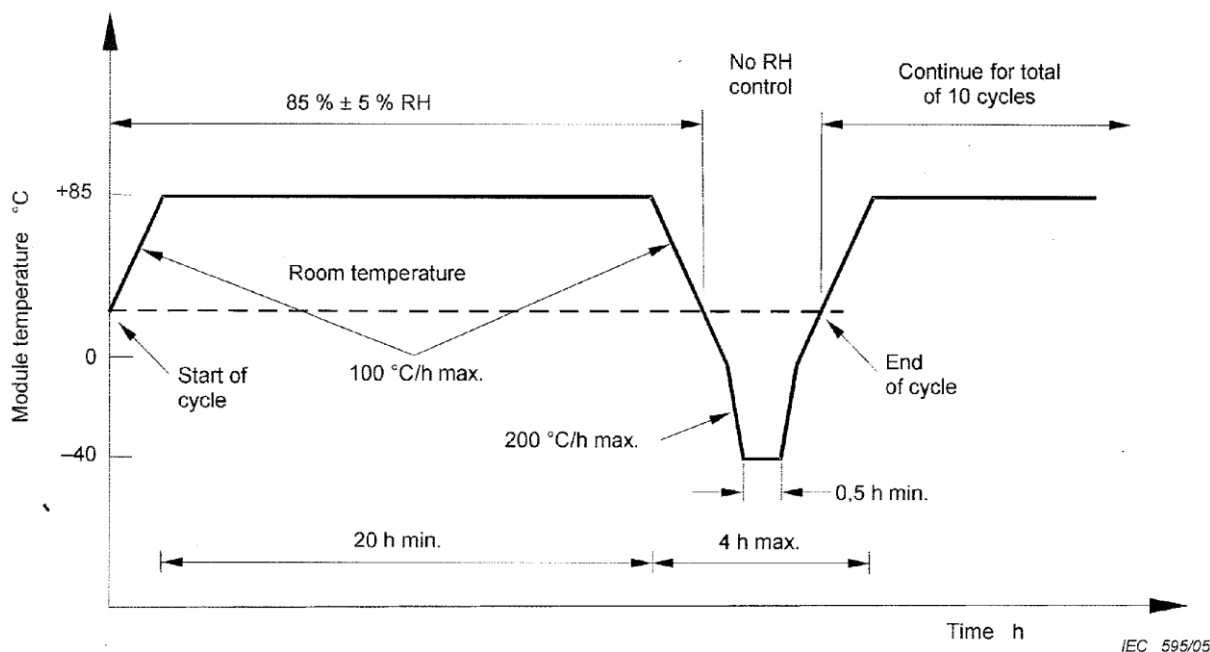
Obrázek 12: Průběh zkoušky teplotním cyklováním

1.4.2 Zkouška vlhkým teplem

Účel zkoušky je zjistit odolnost FV modulu proti pronikání vlhkosti. Testovaný vzorek je po dobu 1000 hodin umístěn v klimatické komoře s teplotou 85°C (+2°C) a relativní vlhkostí 85% (+5%).

1.4.3 Zkouška cyklováním vlhkost-mráz

Účelem zkoušky je zjištění odolnosti FV modulu proti vysoké teplotě a vlhkosti, která následuje po záporných teplotách. Zkouška se skládá z 10 cyklů. Během jednoho cyklu musí být modul vystaven minimálně 20 hodin teplotě 85°C (+2°C) při relativní vlhkosti 85% (+5%) a následně maximálně 4 hodiny teplotě -40°C (+2°C). Rychlost změny teploty nesmí přesáhnout 100°C/hodinu do pokojové teploty a poté 200°C/hodinu. Oproti klasickému teplotnímu cyklování zde dochází při rychlém zchladnutí ke zmrznutí vlhkosti a tím potenciálnímu pronikání vlhkosti do FV modulu.



Obrázek 13: Průběh zkoušky cyklování vlhkostí a mrazem

1.5 Zkoušky baterií

Zkoušení baterií je při vývoji a následné výrobě jedním z kritických parametrů. Má ovšem proti zkouškám fotovoltaiky několik specifík. Nelze přímo doporučit nějakou konkrétní klimatickou komoru, protože existuje celá řada různých baterií. Ty se liší velikostí, hmotností, typem použitých chemikálií a z toho vyplývají i bezpečnostní rizika. Jedním z běžných bezpečnostních rizik při zvýšené teplotě je únik hořlavých plynů z baterie. Je důležité tedy udržovat povrchovou teplotu uvnitř klimatické komory pod hodnotou samovznícení těchto plynů. Dalším rizikem je možnost exploze. K té může dojít pokud se v baterii uvolní příliš velké množství plynu v krátkém čase a tlakový ventil baterie není na tento stav dimenzován.

Existují pak další specifika, která se mohou sledovat. Speciální klimatické komory jsou vybaveny systémy detekce a potlačení ohně, sledováním množství plynů (vodík, kyslík, oxid uhelnatý), vstřikováním dusíku nebo oxidu uhličitého pro potlačení rizika požáru a rychlejšímu odvětrání komory, systémy chlazení, v extrémních případech testování do poruchy je pak celá konstrukce bezpečnostního typu. Ta zaručuje odstínění okolí i v případě exploze.

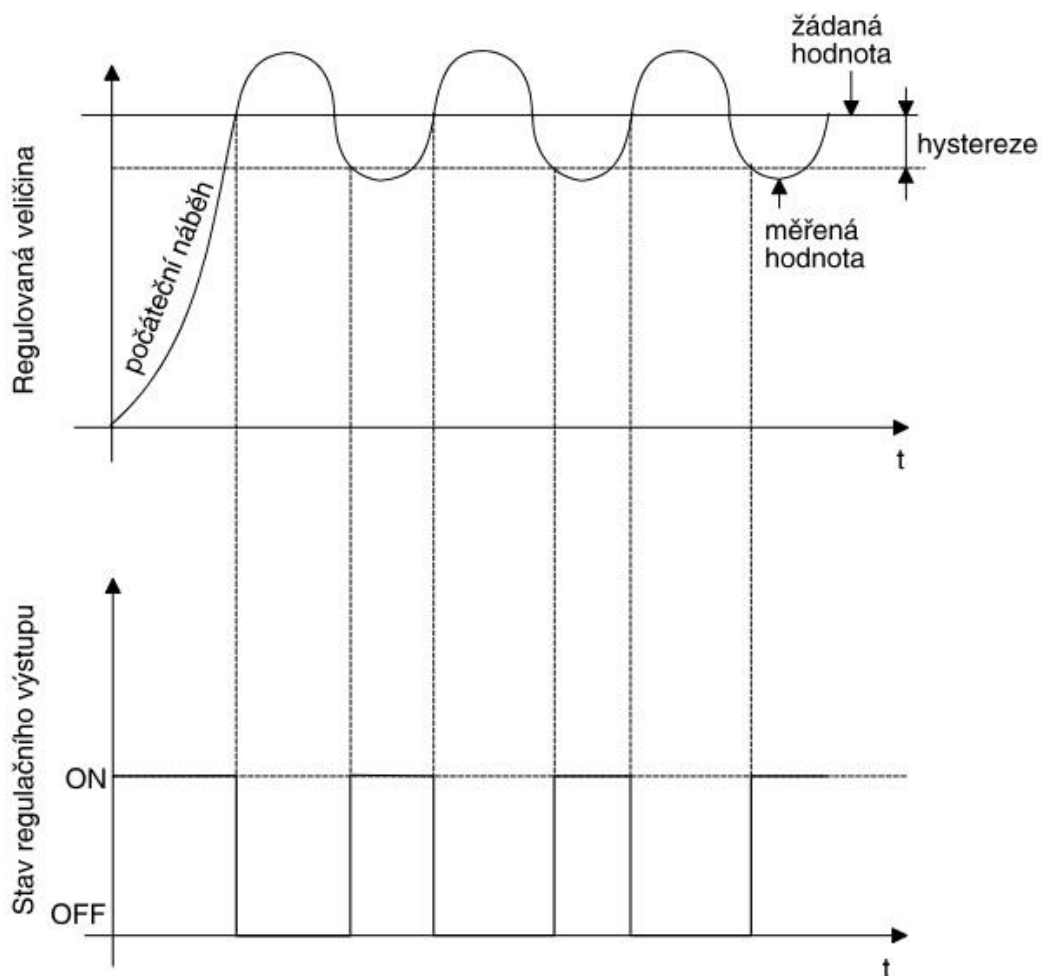
Baterie mohou mít výrazně vyšší hmotnost. Tím je také ovlivněna konstrukce klimatické komory, nebo jiného testovacího zařízení. Ta musí být dostatečně bytelná, aby jí vysoká hmotnost nijak nedeformovala.

1.6 Možnosti regulace

Abychom dosáhli požadovaných klimatických parametrů pro jednotlivá měření umístujeme vzorek do prostoru, kde můžeme tyto parametry monitorovat a zároveň měnit. Běžně se kromě klimatických komor využívají také celé klimatizované místnosti, což jsou vlastně také klimatizované komory velkých rozměrů. V laboratorním prostředí se také využívají takzvaná klimatizovaná okna. Jedná se o prostor který není přímo klimatickou komorou, ale probíhá v něm také monitoring a regulace klimatických podmínek. Může se jednat například o výřez válce, kde je testovaný přípravek umístěn uvnitř. Válec je pak izolován od okolního prostředí podle potřeb daného měření, abychom dosáhli požadovaných podmínek a dokázali je udržovat po dobu měření. Samotná regulace jednotlivých parametrů pak může být také prováděna několika způsoby. Záleží na požadované přesnosti regulované veličiny a také na odezvě systému na regulaci. Dále se budu zabývat jen dvoustavovou regulací a PID regulací. Mezi nimi ale ještě existuje možnost využít regulaci proporcionální (P), což je v podstatě dvoustavová regulace jen s určitou hodnotou zesílení. Dále pak také regulace proporcionálně integrační (PI) a proporcionálně derivační (PD).

1.6.1 Dvoustavová regulace

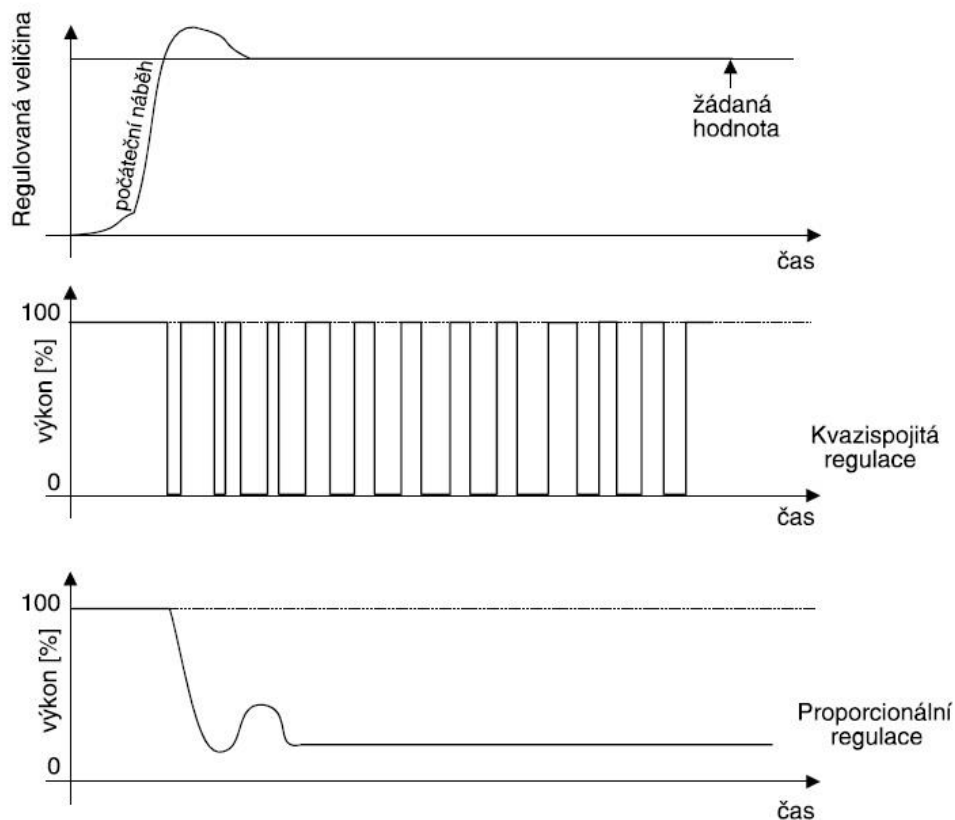
Jedná se o nejjednodušší možnost regulace. Označuje se také zkratkou ON/OFF (zap./vyp.). Využívá se pro aplikace s nižšími nároky, jelikož už z principu nejde dosáhnout nulové regulační odchylky. Typické je kmitání reálné hodnoty regulovaného parametru kolem žádané hodnoty. Snížením hystereze, tedy rozdílu mezi žádanou hodnotou a hodnotou kdy zařízení sepne, získáme nižší regulační odchylku, ale častější spínání může mít nepříznivý vliv na životnost elektromechanických spínačů. Výhodou dvoustavové regulace je její jednoduchost a malé nároky na regulátor (7).



Obrázek 14: Dvoustavová regulace

1.6.2. PID regulace

PID neboli proporcionálně integračně-derivační regulace je nejlepší možností regulace z hlediska přesnosti regulované veličiny. Máme možnost samostatně nastavit každou ze tří složek P, I, D a tím tak dosáhnout minimální regulační odchylky a dobrého dynamického chování regulačního obvodu. Podle typu výkonového spínače je výstupní hodnota plně proporcionální nebo kvaziproporcionální. Nevýhoda PID regulace je složitost správného nastavení PID parametrů. Dále taky není vhodné využívat elektromechanické spínače kvůli jejich častému spínání, kterým by mohla být ovlivněna jejich životnost.



Obrázek 15: PID regulace

Nastavení parametrů P, I, D může být prováděno buď přímo ve fyzikálních jednotkách. Pak se pásmo proporcionality (P_b) uvádí v jednotkách regulované veličiny, například $^{\circ}\text{C}$. Integrační čas (I_t) a derivační čas (dE_r) v sekundách. Tento způsob má výhody snadného vyjádření pásma proporcionality. Je proto běžněji využíván v otopných soustavách. Druhou možností je využít přenosové funkce.

2. Popis výchozího stavu

Jak již bylo uvedeno výše, tak mojí diplomovou prací jsem navazoval na původní projekt Aparatura pro měření teplotní závislosti temných charakteristik fotovoltaických článků, který vypracoval Bc. Ondřej Červený.

2.1 Aparatura

Základem měřicí aparatury je KEG sud o objemu 50 litrů. Do toho jsou vyříznuté dva otvory, jeden z boku u dna sudu pro cirkulaci vody. Druhý v horní části sudu, kde normálně bývá ventil. Títmo otvorem jsou dovnitř zavedeny dvě trubky jedna pro oběh vody zkratkou přes kohout a druhá pro oběh přes termofofor. Dále je ještě horním otvorem zavedena jímka s topnou spirálou. Jedná se o topení z pračky o výkonu 1700 W. Na kovové liště je připevněno oběhové čerpadlo EASY-OMIS UPS 25-40 180, které zajišťuje cirkulaci vody. Jeho parametry jsou v následující tabulce.

Napájecí napětí	230V/50Hz
Krytí	IP 44
Maximální výška	H max: 4m
Maximální průtok	Q max: 40l/min
Maximální teplota média	T max: 120 °C
Maximální tlak média	Tlak max: 10 bar
Příkon čerpadla na Stupeň I	40 W
Příkon čerpadla na Stupeň II	62 W
Příkon čerpadla na Stupeň III	88 W
Provozní teplota okolí	+2 °C až +40°C
Rozteč připojení	180 mm

Tabulka 1: Parametry oběhového čerpadla



Obrázek 16: Čerpadlo EASY-OMIS UPS 25-40

Dále je na kovové liště instalován elektrický rozvaděč. V něm je osazen proudový chránič Noark Ex9L-N. Jedná se o 2 pólovou verzi. Jeho parametry jsou v následující tabulce.

Podmíněná zkratová odolnost	6 kA
Jmenovitý proud	25 A
Jmenovitý reziduální proud	30 mA
Zpoždění (necitlivost)	0 ms

Tabulka 2: Proudový chránič



Obrázek 17: Proudový chránič

Dále jsou v rozvaděči dvě solid state relé (SSR) Fotek SSR-25 DA. Výhoda využití polovodičových relé proti klasickým elektromagnetickým, je možnost vyšší frekvence spínání a díky eliminaci pohyblivých částí nehrozí opotřebení častým spínáním. Jejich parametry jsou v tabulce.

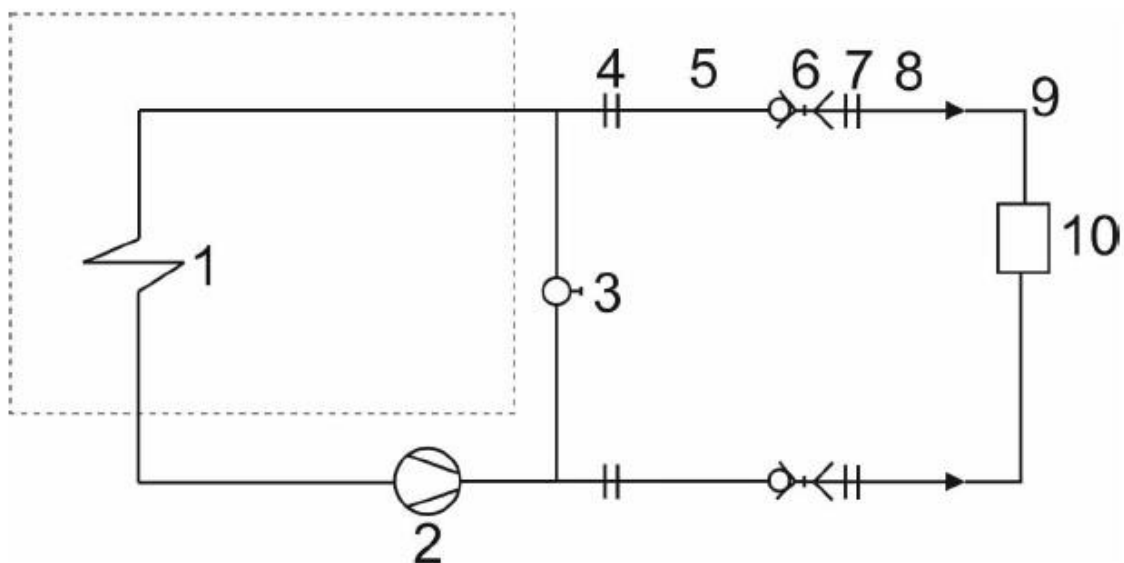
Provozní napětí (výstup)	24 – 380 VAC
Řídicí napětí (vstup)	3 – 32 VDC
Maximální proudové zatížení (výstup)	25 A
Proud řídicí (vstup)	4,5 – 20 mA
Reakční doba (vstup)	<10 ms
Provozní teplota	-30 až +80 °C

Tabulka 3: Solid state relé



Obrázek 18: SSR

Celkové schéma aparatury je na následujícím obrázku. Hranice sudu je zde naznačena šrafovanou čarou (8).



Obrázek 19: Původní schéma aparatury

Ve schématu jednotlivá čísla představují:

- 1 Topná spirála
- 2 Čerpadlo
- 3 Kohout
- 4 Šroubení a hadicový trn
- 5 Hadice o průměru 13 mm a délce 3 m
- 6 Rychlospojka
- 7 Šroubení a hadicový trn
- 8 Hadice o průměru 9 mm a délce 1 m
- 9 Hadice o průměru 5 mm a délce 0,5 m
- 10 Termofofor

Během původního experimentálního ověřování parametrů aparatury bylo zjištěno, že v silikonovém termofoforu se vytvářel příliš vysoký tlak. Z důvodu rizika prasknutí termofoforu bylo tedy měření prováděno pouze s hadicí kterou se uzavřel okruh. Měření bylo prováděno s přibližně 40 litry vody. Počáteční teplota vody 25 °C. Za 140 minut bylo dosaženo teploty 90 °C a měření bylo ukončeno.



Obrázek 20: Původní stav aparatury

3. Zprovoznění zařízení

První věcí, kterou bylo třeba udělat, bylo otestovat, zda zařízení po roce nepoužívání stále funguje tak, jako při posledním testování. Po zapojení do elektrické sítě, jsme neúmyslně vyzkoušeli funkci proudového chrániče. Jímka s topným tělesem byla vyrobena z nevhodného materiálu a za rok zrezla natolik, že se dostala voda k přívodům. Pravděpodobně kvůli využití více druhů kovů došlo ke vzniku galvanického článku, který výrazně urychlil proces koroze.

3.1 Konstrukční úpravy aparatury

Zařízení tedy nebylo provozu schopné. Bylo nutné demontovat jímku s topícím tělesem, vypustit znečištěnou vodu a sud vyčistit. Aby bylo pro příště zamezeno vzniku galvanického článku, rozhodl jsem se instalovat topení přímo do stěny sudu. Na boku byl prostřížen otvor, kterým se vyvedli napájecí přívody od topného tělesa. Průniku vody zabraňují gumová těsnění. Další otvor byl prostřížen v horní části sudu, tím byla provedena trubka se závitem, do které se později zapojí hadice vracející vodu z chladiče. Díky těmto úpravám mohla být odstraněna kovová lišta, která vedla příčně přes horní část sudu a sloužila jako ukotvení právě pro jímku a vratnou trubku. Výsledkem je mnohem čistější vzhled zařízení a zároveň i větší bytelnost. Celá aparatura je postavená na vozíku, který umožňuje snadnou manipulaci i když je zařízení napuštěné vodou a má tedy vysokou hmotnost. Pro zajištění pozice na vozíku, jsem instaloval malé zarážky, které zabraňují pohybu sudu po dřevěné desce. Finální konstrukční podoba zařízení je vidět na následující fotografii.



Obrázek 21: *Finální konstrukční podoba*

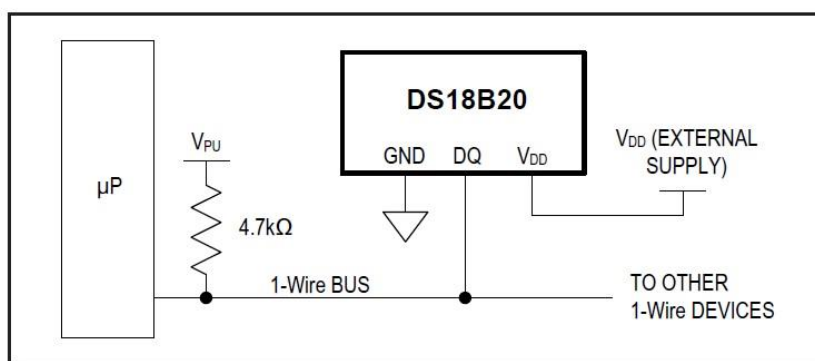
3.2 Chladič

Vzhledem k tomu, že u původní aparatury nebyl využit žádný chladič a kvůli problémům s tlakem nakonec ani termofoř, bylo potřeba pořídit chladič nový. Vzhledem k ceně a dostupnosti jsem zvolil využití chladiče automobilového. Konkrétně jsem vybral tepelný výměník Maxgear AC519990, který je instalován ve voze Škoda Fabia jako výměník pro topení do vnitřní části automobilu. Svými rozměry 180 x 180 mm a výškou 32 mm mi vyhovoval. Do výstupů z chladiče jsem přímo připevnil koncovky na rychlospojky, tím pádem je zapojení do vodního okruhu jednoduchou záležitostí. Vzhledem ke konstrukci žebrování chladiče je možné lehké vzorky měřit přímo položené na povrchu chladiče. U hmotnějších vzorků by bylo třeba provést krycí opláštění, aby se žebra nepoškodila. Další možností, jak využít chladič u hmotnějších vzorků, je jeho instalace do klimatizovaného měřicího okna, kde nebude v přímém kontaktu s měřeným vzorkem, ale bude řídit teplotu celého prostoru.

3.3 Teplotní senzory

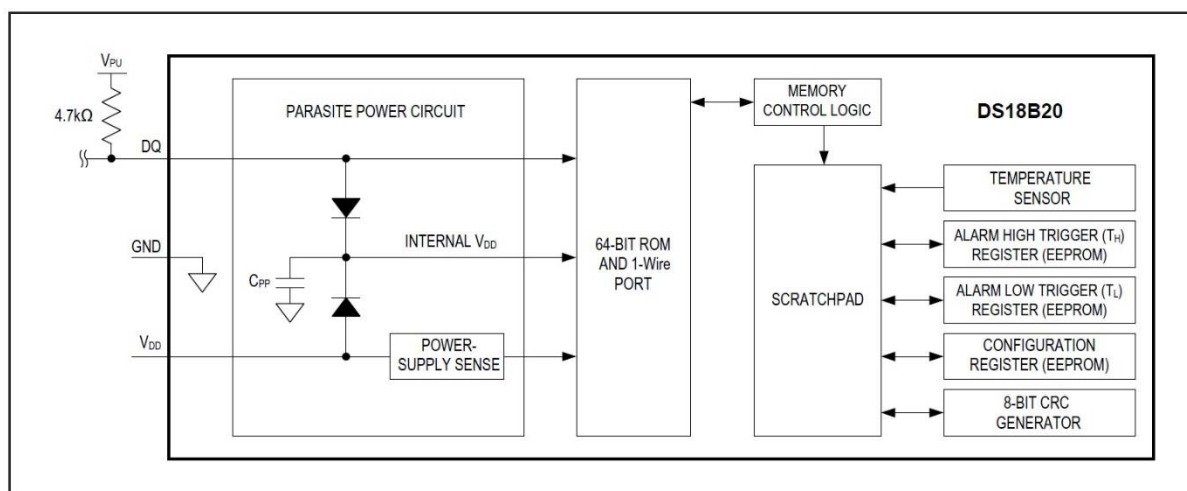
Pro měření teploty byl zvolen digitální teploměr Dallas DS18B20 v pouzdře typu TO92. Tento teploměr zajišťuje od 9 bitového po 12 bitové měření teploty. Komunikace probíhá přes jeden datový vodič, takzvaný One-Wire bus. Každý senzor má svůj vlastní unikátní 64 bitový

sériový kód, který umožňuje zapojit více senzorů paralelně. Přestože jsou pak teplotní senzory rozmístěny na větším prostoru, je možné je monitorovat jedním mikroprocesorem. Další dva výstupy z pouzdra jsou napájení a zemní vodič. Teoreticky je možné zapojit teploměr jen přes dva piny kdy se využije možnosti parazitního napájení a datový vodič je společný s napájecím. V mé práci ale využívám spolehlivější zapojení přes 3 výstupy, jeho schéma je na následujícím obrázku.



Obrázek 22: Zapojení DS18B20

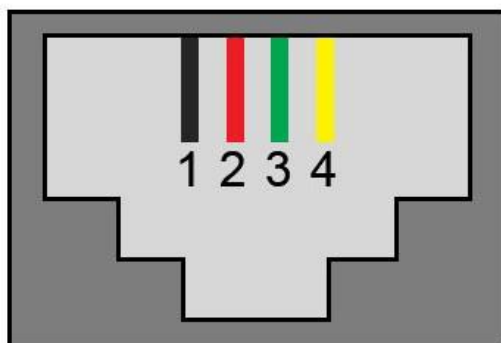
Teplotní čidlo měří v rozsahu $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$, v rozsahu $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ pak s přesností $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na následujícím obrázku je blokové schéma každého senzoru DS18B20.



Obrázek 23: Blokové schéma DS18B20

Jedno čidlo je napevno přilepné k vnější straně sudu, tím se monitoruje teplota vody. Dále je na rozvaděči zásuvka pro konektor RJ-11, obvykle využívaná pro telefony. Ten má 4 žíly, ale zapojené jsou jen tři. Schéma zapojení je shodné s ostatními čidly používanými v laboratoři

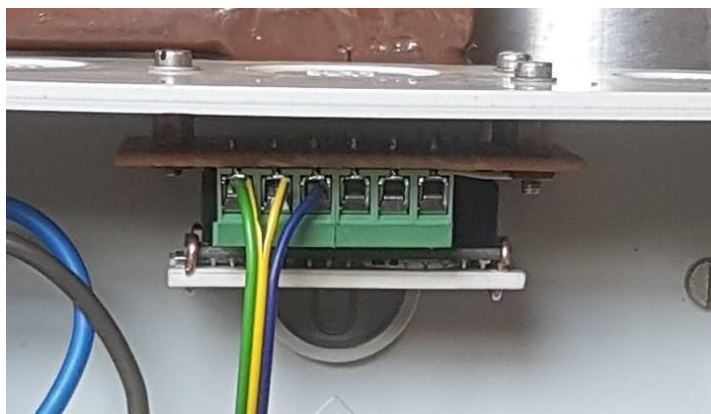
pro vzájemnou zaměnitelnost. Podle následujícího schématu zapojení zůstal černý vodič nezapojený, červený je zemní vodič, zelený je One-Wire datový vodič a žlutý napájecí vodič.



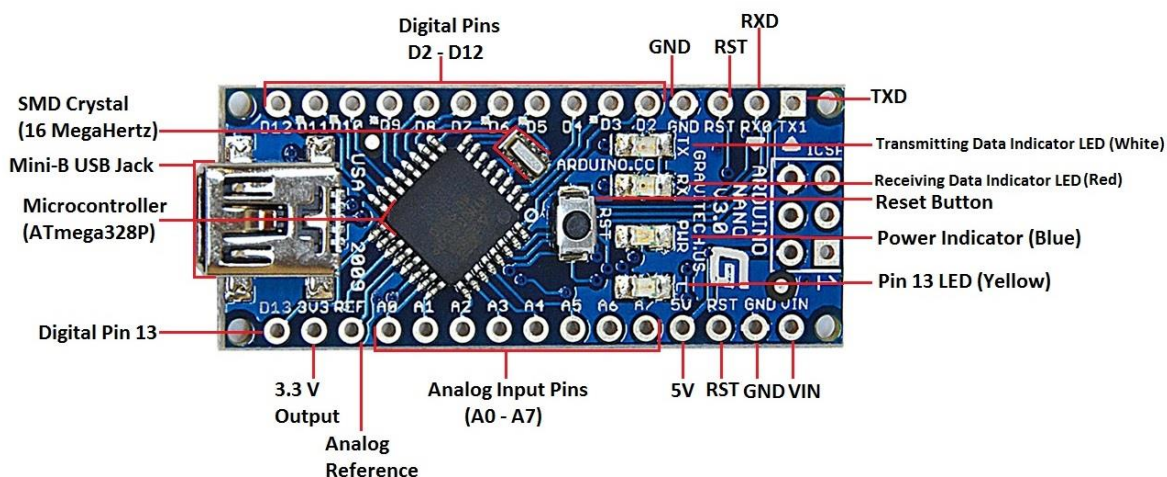
Obrázek 24: Zapojení zdířky RJ-11

3.2 Řídicí jednotka

Jako řídicí jednotka bylo zvoleno Arduino Nano. Jedná se o vývojovou desku obsahující mikrokontroler Atmega 328 od firmy Atmel. Dále je na desce mini USB port a sada pinů pro napájení, analogové vstupy a digitální vstupy a výstupy. Arduino bylo zvoleno protože svou funkcí bude vyhovovat potřebám zařízení, navíc je jeho programovací jazyk poměrně jednoduchý. Vyrobil jsem desku, která je přes distanční sloupky připevněna v rozvaděči. Na této desce je připojena kolíková lišta do které je zapojeno Arduino, dále potom svorkovnice pro snadné připojení periferií a odpor o velikosti 4,7 k Ω potřebný pro zapojení teplotního čidla. V rozvaděči je dále instalován kabel zapojený do mini USB portu na Arduino s druhou koncovkou USB typ A samec provedenou vně rozvaděče pro jednoduchou uživatelskou obsluhu. Do svorkovnice je při pohledu zepředu zleva doprava zapojeno relé ovládající čerpadlo, relé ovládající topnou spirálu, společný záporný pól obou relé, napájení teplotního senzoru, datový vodič a zemní vodič teplotního senzoru. Jednotlivé vstupy jsou pak zavedeny na piny D11, D9, GND, 5V, D3 a GND na desce Arduina.



Obrázek 25: Zapojení svorkovnice



Obrázek 26: Schéma zapojení Arduino Nano

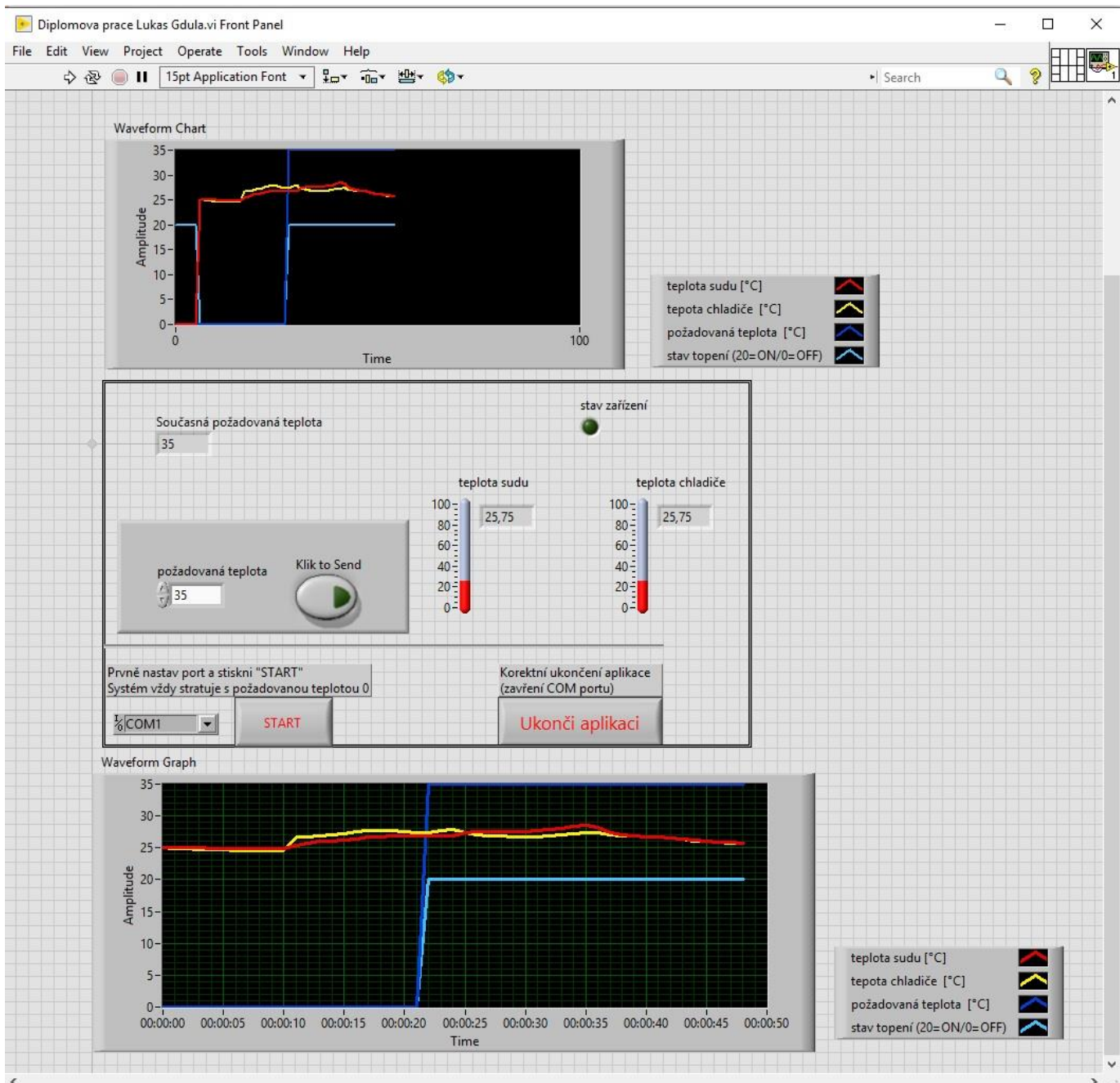
Pomocí programu Arduino (IDE) jsem napsal kód, který je nahraný v paměti Arduina. Zároveň ho příkládám k diplomové práci. Využil jsem již vytvořené knihovny pro načítání teplot z senzorů. Další popis funkce programu nechám do další kapitoly komunikace s uživatelským rozhraním.

3.3 Uživatelské rozhraní

Jako uživatelské rozhraní bylo zvoleno grafické vývojové prostředí LabVIEW of firmy National Instruments. To nám umožní udělat ovládací okno, které má podobu přístrojové desky, pro řízení a monitoring celého systému. Konečnou verzi souboru ve formátu *.vi příkládám také k diplomové práci.

3.3.1 Ovládání aparatury

Program v LabVIEW se startuje zmáčknutím šipky na horní liště. Po nastartování programu je nutné zvolit správný sériový port, ve kterém je Arduino zapojeno. Po zmáčknutí tlačítka start se zahájí komunikace po sériové lince. Zařízení je nastaveno tak, že startuje s výplým čerpadlem a topnou spirálou. Výchozí požadovaná teplota je na hodnotě 0 °C. Na horním grafu se začnou vykreslovat živě jednotlivé hodnoty teploty sudu, teploty chladiče a požadované teploty, vše ve stupních Celsia. Dále se zde vykresluje stav topení, pro přehlednost je nastaveno tak, že 0 značí vyplé topení a 20 zapnuté. V prostředním okně jsou na dvou teploměrech aktuální teploty v digitální formě i v podobě klasického teploměru. Indikátor stavu zařízení svítí zeleně pokud je teplota reálná vyšší než požadovaná a je tedy možné provádět potřebná měření. Současná požadovaná teplota ukazuje hodnotu teploty, která je momentálně nahraná v Arduinu a na kterou se snaží korigovat teplotu. Zapsáním hodnoty do pole požadovaná teplota a zmáčknutím tlačítka Send dojde k odeslání nové hodnoty do Arduina. Po ukončení měření, je nutné zmáčknout tlačítko Ukonči aplikaci, tím dojde ke správnému ukončení komunikace po sériové lince. V dolním okně se nám poté vykreslí graf z celé doby měření. Pro lepší představu je na dalším obrázku vzorová ukázka, jak program vypadá.

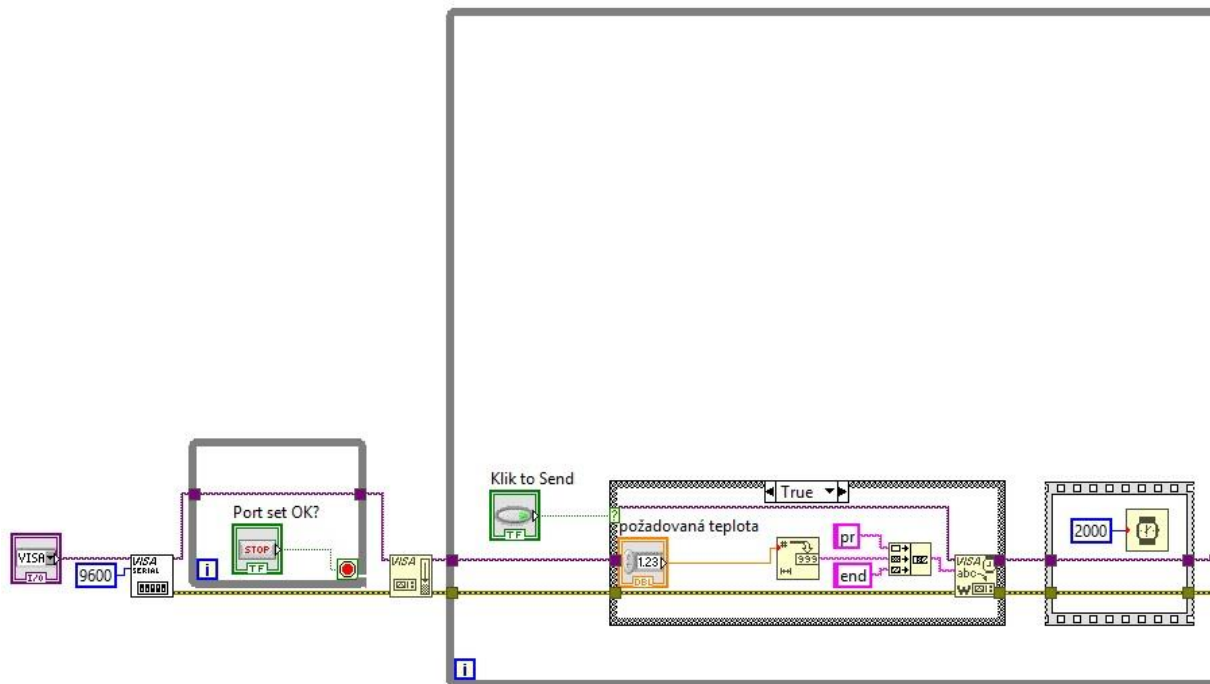


Obrázek 27: Vzorová ukázka programu LabVIEW

3.3.2 Blokové schéma

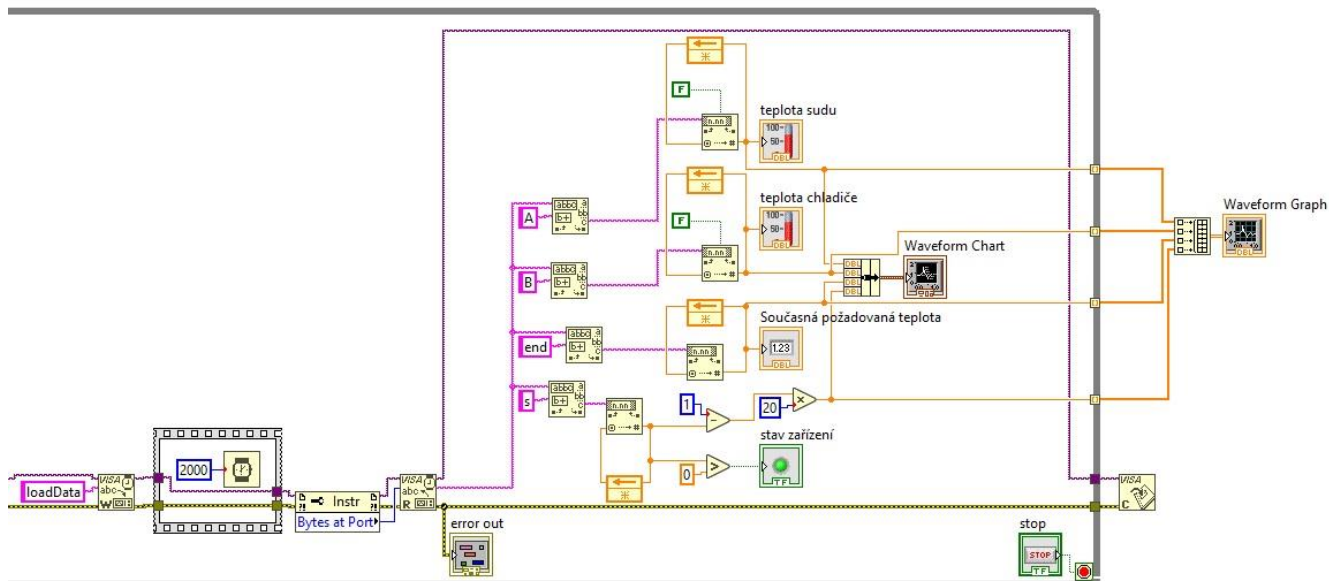
Program LabVIEW se principiálně dělí na dvě části, první je takzvaný Front Panel. Ten slouží k snadné interpretaci a ovládání i nezasvěceným uživatelem. Jeho komponenty jsou popsány výše. Druhou částí je Block Diagram, kde je grafickým blokovým způsobem naprogramován samotný běh programu. Pro přehlednost jsem blokové schéma rozdělil na dvě

části. V první je vidět nastavení sériové komunikace, odesílání požadované teploty do Arduina, pokud se žádná hodnota neodesílá tento krok se přeskakuje, a zpožďovací člen.



Obrázek 28: Blokové schéma LabVIEW část 1

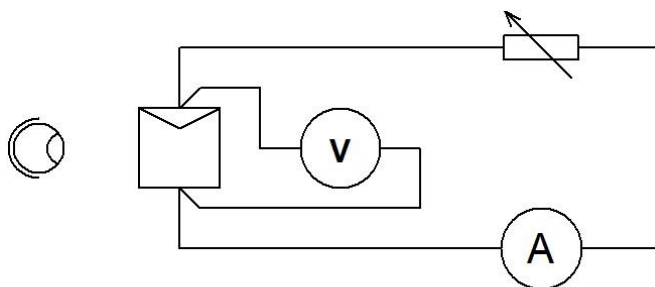
Na první část navazuje přímo část druhá, v té se nejprve odešle přes sériovou linku do Arduina povel „loadData“. Díky němu Arduino zpět posílá potřebné hodnoty. Následuje další zpožďovací člen, poté se přečtou data na sériové lince a jsou rozložena na potřebné části řetězce. Za písmenem „A“ se nachází teplota na sudu, za písmenem „B“ teplota chladiče, za „end“ současná požadovaná teplota a za „s“ stav zařízení. Všechny data jsou vykreslována do živého grafu Waveform Chart. Po stisknutí tlačítka na ukončení aplikace se zakončí běh této smyčky a dojde k vykreslení celkového grafu Waveform Graph, jak již bylo popsáno výše.



Obrázek 29: Blokové schéma LabVIEW část 2

4. Měření a vyhodnocení výsledků

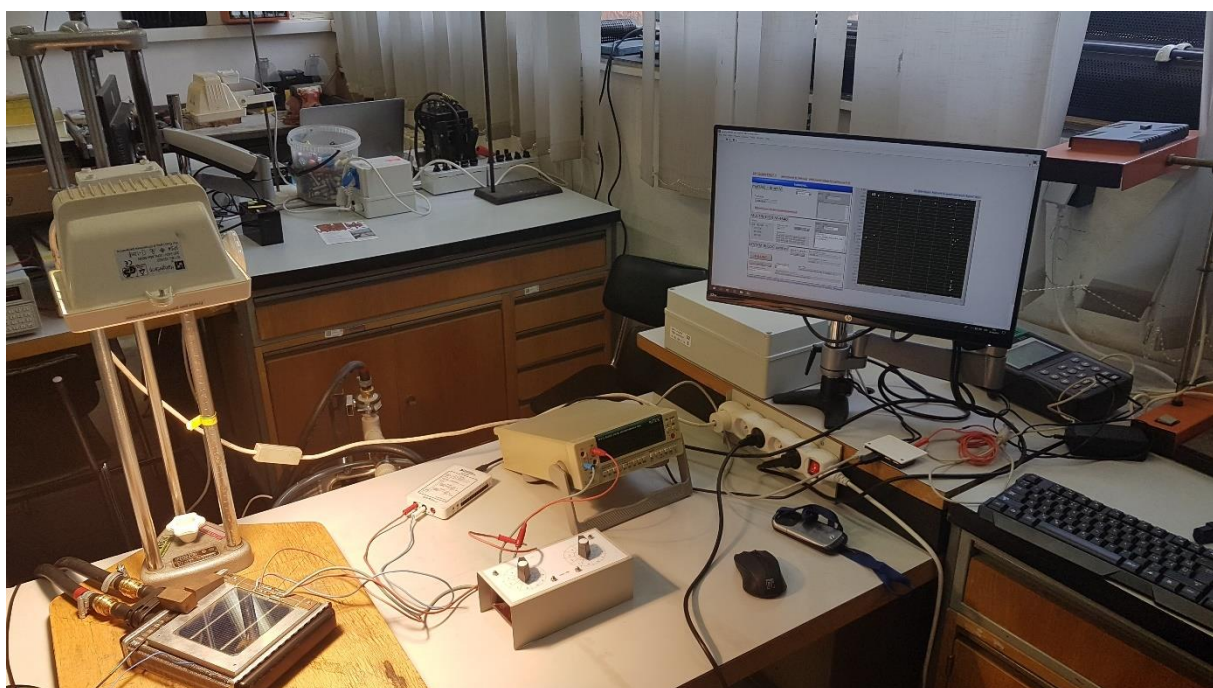
Měřicí aparatura byla otestována, zda těsní vodní okruh a fungují všechny komponenty. Test proběhl úspěšně, takže jsem mohl přejít k provedení vzorového měření. Bylo zvoleno měření volt-ampérových charakteristik jednoho fotovoltaického článku při rozdílných teplotách. Schéma zapojení měření je na dalším obrázku.



Obrázek 30: Schéma zapojení pro měření VA char. FV článků

4.1 Měřicí sestava

Jako zdroj světla byla použita halogenová lampa GT1B-L300/500 o maximálním výkonu 500W. Lampa je umístěna ve vzdálenosti 45 cm od fotovoltaického článku. Jelikož nám půjde ve výsledku o změnu měřených parametrů, ne o jejich absolutní hodnotu, není tolik podstatná velikost intenzity záření a světelné spektrum. Důležité je zachování konstantních parametrů po celou dobu měření. Fotovoltaický článek z monokrystalického křemíku byl umístěn přímo na chladič. Jako voltmetr jsem použil multifunkční kartu NI myDAQ. Jako ampérmetr pak digitální multimetr MXD-4660A od firmy METEX. Díky tomu jsem mohl využít pro ukládání dat ve formátu CSV program LabVIEW. Jako zátěž byla použita odporová dekáda.

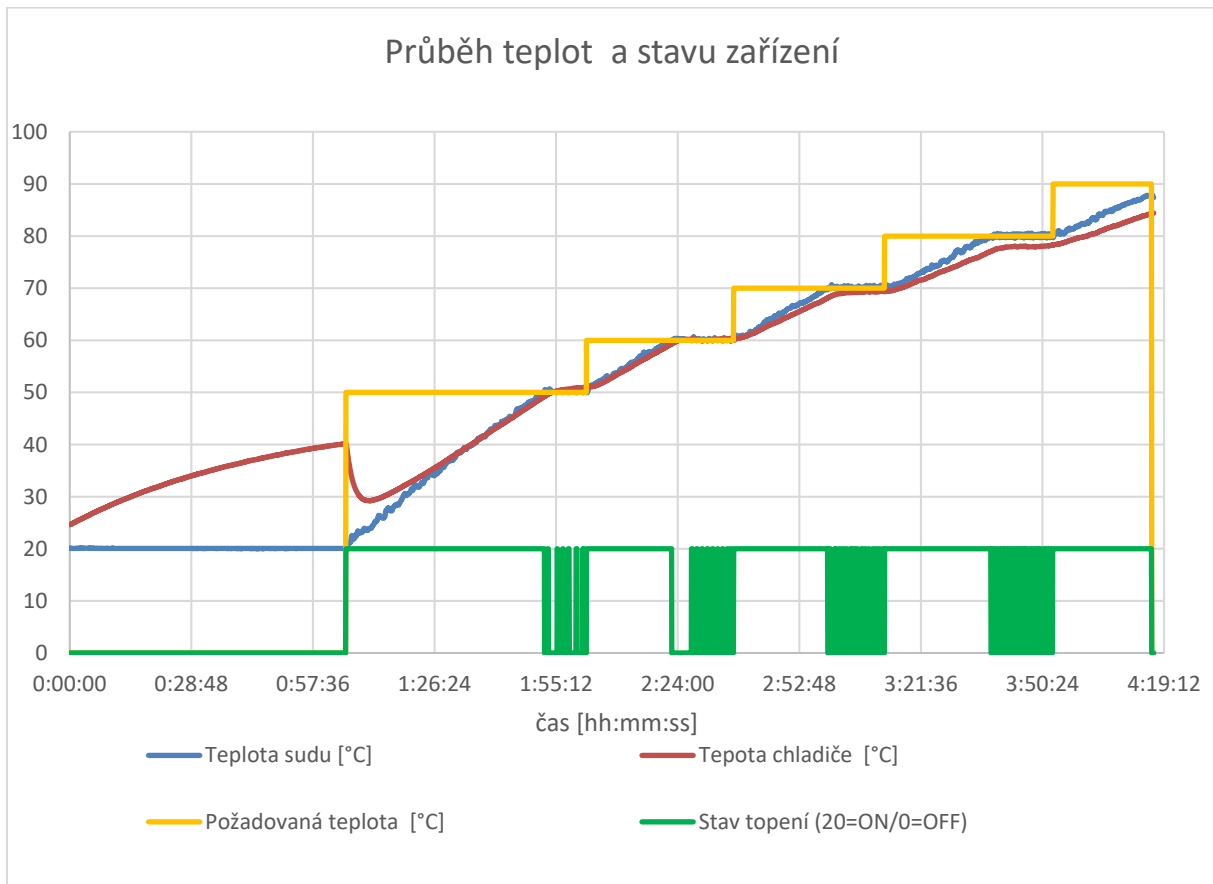


Obrázek 31: Měřicí sestava

4.2 Průběh měření

Zapojil jsem celou měřicí sestavu. Jedním počítačem jsem ovládal a monitoroval aparaturu pro ohřev a na druhém počítači jsem ukládal data z voltmetru a ampérmetru. Proměření bodů potřebných pro sestavení VA charakteristiky trvá určitou chvíli, po kterou je žádoucí mít konstantní teplotu na fotovoltaickém článku. První měření jsem tedy prováděl s vypnutou aparaturou pro ohřev. Musel jsem ale vyčkat na ustálení teploty způsobené ohřevem halogenovou lampou, které trvalo téměř hodinu. Po změření první VA charakteristiky

jsem nastavoval další teploty s krokem 10 °C a po ustálení teploty na požadované hodnotě měřil příslušné VA charakteristiky. Měření jsem ukončil po 4 hodinách a 20 minutách s tím, že poslední požadované teploty 90 °C jsem nedosáhl.



Graf 1: Průběh teplot a stavu zařízení

V grafu můžeme vidět, že první hodinu měření bylo topení vypnuté, teplota sudu byla ustálená na hodnotě 20 °C, což odpovídá teplotě okolí. Teplota chladiče, respektive teplota fotovoltaického článku, narůstala ohřevem halogenovou lampou. Při hodnotě 40 °C, se nárůst teploty snížil natolik, že bylo možné provést měření VA charakteristiky za teploty, kterou lze považovat za konstantní. Poté byla nastavena požadovaná teplota na 50 °C, na aparatuře se zapnula topná spirála a oběhové čerpadlo. Teplota chladiče klesla vlivem cirkulace studené vody ze sudu. Za hodinu došlo k ustálení teploty sudu i chladiče na požadované hodnotě. Čerpadlo je nastaveno tak, že se během celého měření nevypíná a voda neustále cirkuluje okruhem. Tím je zamezeno poklesu teploty chladiče proti sudu. Ovládání topení je dvoustavové, pokud tedy teplota sudu klesne pod požadovanou dochází k sepnutí topení a

pokud vzroste nad požadovanou dochází k vypnutí topného tělesa. Teplota tedy určitým způsobem kmitá kolem požadované hodnoty.

požadovaná teplota [°C]	teplota sudu [°C]		teplota chladiče [°C]	
	1. překmit	ustálené kmity	1.překmit	ustálená teplota
50	50,56	49,94-50,31	49,25	51,00
60	60,38	59,38-60,38	59,38	60,38
70	70,13	69,81-70,56	68,13	69,38
80	80,06	79,69-80,43	77,13	78,31
90	-	87,00	-	84,44

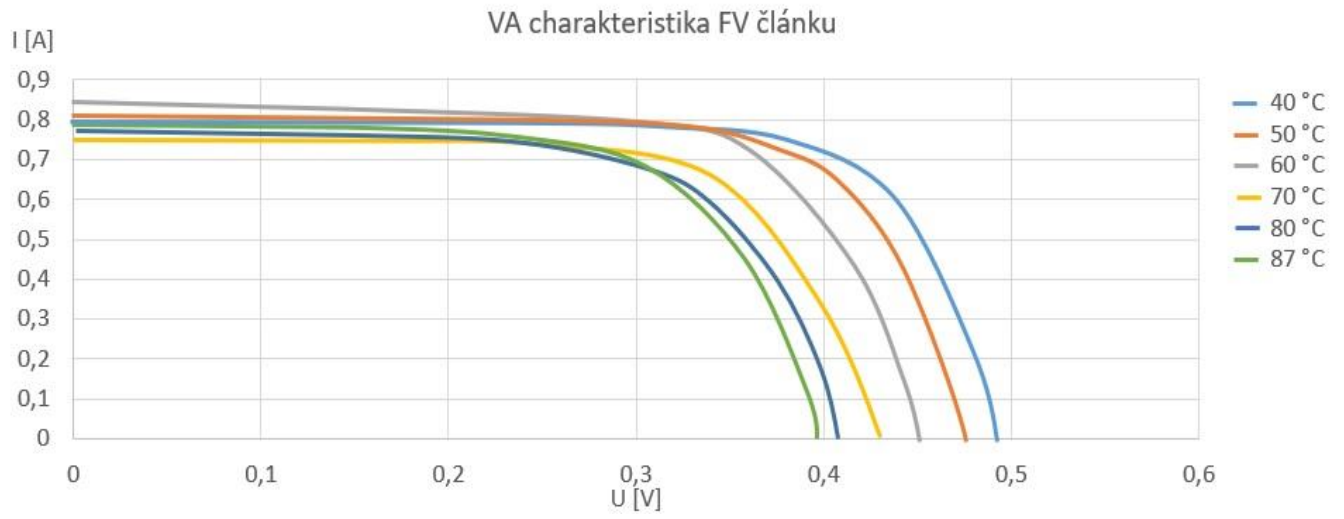
Tabulka 4: Reálné teploty během měření

V tabulce jsou mimo požadované teploty uvedeny teploty sudu, které reprezentují teplotu vody a teploty chladiče, které jsou shodné s teplotou měřeného objektu. Hodnoty prvního překmitu ukazují teploty na kterou vystoupá voda v sudu po vypnutí dlouhého natápěcího cyklu a k tomu aktuální teplotu na chladiči. Je patrné, že první překmit není nijak výrazný a s rostoucí teplotou se ještě zmenšuje. To je dané velkým objemem vody v aparatuře. Teplota na chladiči je v době prvního překmitu nižší, je tedy vhodné s měřením počkat a provádět ho až po nějaké chvíli, kdy se teploty více srovnají. Ustálené kmity jsou pak vzhledem k přesnosti s jakou teplotní čidla měří zanedbatelně malé. Ustálená teplota na chladiči je pro nižší teploty vyšší než požadovaná, to může být způsobeno dohříváním fotovoltaického článku světelným zdrojem. Pro vyšší teploty je pak o 2 °C nižší než teplota sudu, to je způsobeno tepelnými ztrátami na chladiči a reprezentuje rozdíl vstupní a výstupní teploty vody. Při posledním měření nebylo dosaženo požadované teploty, ale měřil jsem při teplotách uvedených v tabulce.

4.3. Naměřené hodnoty na fotovoltaickém článku

Pro každou z výše uvedených teplot bylo provedeno měření VA charakteristiky. Měření bylo prováděno od hodnoty nakrátko, tedy zkratovaných vodičů, reprezentujících minimální odpor. Z toho jsme získali hodnotu proudu nakrátko. Dále byl postupně odpor navyšován pomocí odporové dekády. Finální hodnotu napětí naprázdno jsme měřili s rozpojenými vodiči, reprezentujícími nekonečný odpor. Jak je patrné z následujícího grafu, průběhy VA charakteristik vyšly podle teoretických předpokladů. S rostoucí teplotou poměrně výrazně klesá napětí naprázdno, klesají i hodnoty MPP a FF. Naopak hodnota proudu nakrátko lehce vzrůstá. Mezi 60 °C a 70 °C dojde k poklesu proudu nakrátko, poté opět hodnota proudu

nakrátko s rostoucí teplotou roste. Tento pokles může být způsoben zvýšením sériového odporu.



Graf 2: VA charakteristika FV článku

5.Závěr

Hlavním účelem diplomové práce bylo vytvořit funkční systém řízení mikroprostředí v laboratorním prostředí pro diagnostiku FV systémů. Sestrojená aparatura splňuje požadavky na řízení teploty, jak bylo ověřeno vzorovým měřením. Řízení teploty je prováděno, jak je již popsáno výše, dvoustavově. Z tabulky 4 je patrné, že experimentálně získané hodnoty kolísání teploty kolem hodnoty požadované jsou minimální ve srovnání s přesností měření teplotním čidlem DS18B20. Poměrně velký objem vody v systému, až 50 litrů a vysoká tepelná kapacita vody nám tedy umožní ponechat řízení jako jednoduché dvoustavové. V rámci programování řídicí jednotky, bylo zvoleno, že oběhové čerpadlo po prvním sepnutí běží neustále, až do ukončení programu. Vypíná a zapíná se pouze topná spirála. Tím se zajistí neustálá cirkulace vody v okruhu a předejde se tím možnosti rychlejšího chladnutí vody v chladiči než v sudu. Rozsah teplot spolehlivě dosažitelných pro měření je od teploty okolí, po teplotu 85 °C. Pokud bychom chtěli dosáhnout vyšších teplot, bylo by nutné použít izolaci na sud, hadice i chladič. S přihlédnutím k teplotní odolnosti jednotlivých komponent, by stejně nebylo rozumné zařízení při vyšších teplotách provozovat delší dobu, potřebnou pro uskutečnění měření.

Díky vytvořenému souboru stačí pro ovládání aparatury jakýkoliv počítač s USB vstupem a nainstalovaným programem LabVIEW. Ovládání je uděláno jednoduše, takže umožňuje měření jakékoliv nezasvěcené osobě.

Konstrukce zařízení je provedena tak, že dovoluje být s aparaturou mobilní. Zároveň je dostatečně bytelná, aby vydržela funkční, za předpokladu rozumného zacházení.

6. Přílohy

Obrázek 1: Stolová komora ESPEC řady SH/SU.....	13
Obrázek 2: Velkoobjemová klimatická komora ClimeEvent	14
Obrázek 3: Drive-in klimatická komora.....	14
Obrázek 4: Peltierův článek	17
Obrázek 5: Detail Peltierova článku	17
Obrázek 6: Kompresorové chlazení	18
Obrázek 7: VA charakteristika.....	20
Obrázek 8: Spektrální hustota dopadajícího výkonu	22
Obrázek 9: VA charakteristika při rozdílných teplotách.....	23
Obrázek 10: Termovizní diagnostika.....	25
Obrázek 11: Záznam CCD kamery - elektroluminiscence	26
Obrázek 12: Průběh zkoušky teplotním cyklováním	27
Obrázek 13: Průběh zkoušky cyklování vlhkostí a mrazem	28
Obrázek 14: Dvoustavová regulace	30
Obrázek 15: PID regulace	31
Obrázek 16: Čerpadlo EASY-OMIS UPS 25-40.....	33
Obrázek 17: Proudový chránič.....	33
Obrázek 18: SSR	34
Obrázek 20: Původní stav aparatury.....	36
Obrázek 21: Finální konstrukční podoba.....	38
Obrázek 22: Zapojení DS18B20	39
Obrázek 23: Blokové schéma DS18B20	39
Obrázek 24: Zapojení zdířky RJ-11.....	40
Obrázek 25: Zapojení svorkovnice.....	41
Obrázek 26: Schéma zapojení Arduino Nano	41

Obrázek 27: Vzorová ukázka programu LabVIEW	43
Obrázek 28: Blokové schéma LabVIEW část 1	44
Obrázek 29: Blokové schéma LabVIEW část 2	45
Obrázek 30: Schéma zapojení pro měření VA char. FV článků	45
Obrázek 31: Měřicí sestava	46
Rovnice 1: Množství tepla	15
Rovnice 2: Jednotkové odvození převodu z J na Wh	15
Rovnice 3: Měrná tepelná kapacita	15
Rovnice 4: Potřeba energie	16
Rovnice 5: Fill factor	21
Rovnice 6: Účinnost FV článku	21
Rovnice 7: Koeficient atmosferické masy	21
Rovnice 8: Shockleyho rovnice	23
Rovnice 9: Difúzní proud	23
Rovnice 10: Intrinzická koncentrace	24
Rovnice 11: Vliv teploty na FF a účinnost	24
Tabulka 1: Parametry oběhového čerpadla	32
Tabulka 2: Proudový chránič	33
Tabulka 3: Solid state relé	34
Tabulka 4: Reálné teploty během měření	48
Graf 1: Průběh teplot a stavu zařízení	47
Graf 2: VA charakteristika FV článku	49

7. Zdroje

1. **Novák, Petr.** *Konstrukce klimatické komory.* 2014.
2. **Dr. M. Textor, Dipl.-Phys. J. Timm, Dipl.-Ing. P. Néma, J. Timm.** *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. Volume 26.* 1995, stránky 318-326.
3. **Reinberk, Ing. Zdeněk.** www.tzb-info.cz. [Online] <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/97-vypocet-doby-ohrevu-teple-vody>.
4. **Parajňák, Ing. Adrian.** <http://www.energoekonom.cz>. [Online] <http://www.energoekonom.cz/magazin-chlazení-prumyslovych-kapalin-detail-1532>.
5. **ČSN EN 61215 ed.2 Fotovoltaické (FV) moduly z krystalického křemíku pro pozemní použití - Posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu.**
6. **Ing. Pavel Hrzina, Ph.D. přednášky z předmětu ASS.** 2017.
7. **www.hotset.cz.** [Online] 2019. <https://www.hotset.cz/home/>.
8. **Červený, Bc. Ondřej. Aparatura pro měření teplotní závislosti temných charakteristik fotovoltaických článků.** 2018.
9. -. **www.pveducation.org.** [Online] 2019. <https://www.pveducation.org/>.
10. **Ing. Ladislava Černá, Ph.D. Diagnostika fotovoltaických článků z krystalického křemíku.** 2010.

8. Kontaktní adresa

Lukáš Gdula

Smetanova 23

Hrochův Týnec, 538 62