

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2024

Marek Šteinc

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Elektronická jednotka pro testování fotovoltaického panelu
Bakalářská práce

2024

Marek Šteinc

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Marek Šteinc**
Osobní číslo: **I21070**
Studijní program: **B0714A150008 Automatizace**
Téma práce: **Elektronická jednotka pro testování fotovoltaického panelu**
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Cílem bakalářské práce je konstrukce testovací elektronické jednotky pro testování a měření technických parametrů malých fotovoltaických panelů, v rámci provádění laboratorních experimentů. Ke konstrukci jednotky bude použit vybraný typ jednočipového mikropočítače, případně kompletního vývojového kitu (např. modul ESP32, ESP8266 atp.). Jednotka bude disponovat sadou funkcí, které budou umožňovat měření souboru veličin, potřebných ke stanovení charakteristických parametrů fotovoltaického panelu a zajištění příslušných pracovních podmínek měření. Komunikace řídicí jednotky s nadřazeným řídicím systémem, osobním počítačem, bude realizována vybraným typem bezdrátového komunikačního rozhraní, například rozhraním RF, Bluetooth, nebo Wi-Fi.

Teoretická část bude obsahovat rešerši zadaného tématu se zaměřením na hlavní směry konstrukčního řešení srovnatelných technických zařízení a použitých konstrukčních prvků ve vlastním návrhu.

Praktická část bude zaměřena na podrobný popis konstrukce zařízení a jeho testování, včetně příslušného zhodnocení dosažených výsledků. Konstrukční řešení pracoviště bude zpracováno převážně ve formě 3D modelů, ve vybraném typu návrhového 3D software a následně realizováno s využitím technologie 3d tisku. Firmware řídicí jednotky bude navržen a realizován v jazyce C, C++ pro mikrokontrolery (případně jeho klonu).

Nedílnou součástí práce bude i podrobně zpracovaná výrobní dokumentace, zdrojové kódy firmware mikropočítače a uživatelský manuál.

Rozsah pracovní zprávy: **40 – 50 stran A4**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MATOUŠEK, D. Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR-3.díl, edice uP a praxe, 2. vydání, BEN – technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-209-4

ZÁHLAVA, V., Návrh a konstrukce DPS, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4

MAIXNER, L. a kol., Mechatronika, Brno, Computer Press, 2006, ISBN 80-251-1299-3

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Havlíček, Ph.D.**
Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: **15. prosince 2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10. května 2024**

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Daniel Honc, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 12. ledna 2024

Prohlašuji:

Práci s názvem Elektronická jednotka pro testování fotovoltaického panelu jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 10. 05. 2024

Marek Šteinc v. r.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce, Ing. Liboru Havlíčkovi, Ph.D., za odbornou pomoc při zpracovávání podkladů, jeho trpělivosti a věnovanému času.

Také bych rád vyjádřil své upřímné poděkování své rodině, která mě během celého mého studia neustále podporovala a dodávala mi energii.

V Pardubicích dne 10. 5. 2024

Marek Šteinc

ANOTACE

Práce je věnována konstrukci elektronické jednotky pro laboratorní testování fotovoltaických panelů pomocí mikrokontroleru ESP32 a následné zobrazení dat uživateli prostřednictvím webového rozhraní. Systém je navržen tak, aby měření prováděl automaticky v určených krocích a tím ideálně docílil minimální lidské zásahu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mikrokontroler, testovací stanice, ESP32, fotovoltaický panel

TITLE

Electronic unit for photovoltaic panel testing

ANNOTATION

The work is devoted to the construction of an electronic unit for laboratory testing of photovoltaic panels using the ESP32 microcontroller and subsequent display of data to user through a web interface. The system is designed to perform the measurements automatically in defined steps, thus ideally achieving minimal human intervention.

KEYWORDS

Microcontroller, test station, ESP32, photovoltaic panel

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM GRAFŮ	11
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	12
1 Úvod.....	13
2 Fotovoltaický panel.....	14
2.1 Historie fotovoltaických panelů.....	14
2.2 Princip fotovoltaických článků	15
2.3 Struktura fotovoltaických článků.....	16
2.4 Využití fotovoltaických panelů.....	17
2.5 Typy fotovoltaických článků	17
2.5.1 První generace.....	17
2.5.2 Druhá generace	18
2.5.3 Třetí generace	18
2.6 Podstatné parametry fotovoltaických panelů.....	18
2.7 Testovací metody fotovoltaických panelů	20
2.7.1 Vizuální kontrola	21
2.7.2 Luminiscenční metoda.....	21
2.7.3 Flash test	21
2.7.4 Termografie	22
2.7.5 V-A Charakteristika.....	22
3 Řídící elektronika.....	23
3.1 ESP32.....	23
3.2 Komunikační sběrnice	24
3.3 Ostatní komponenty.....	26
4 Praktická část	29
4.1 Popis testovací stanice	29
4.2 Měřené parametry	33

4.3	Blokové schéma.....	34
4.4	Program.....	34
4.5	Výsledky a analýza měření.....	39
5	Závěr.....	45
	POUŽITÁ LITERATURA.....	47
	SEZNAM PŘÍLOH.....	50

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1: Princip FV článku (Skupina ČEZ, 2024)	15
Obrázek 2: Struktura FV článku (Tzbinfo, 2014).....	16
Obrázek 3: Konstrukce FV panelu (CNE, 2024).....	16
Obrázek 4: Typy FV panelů (Remote-LAB GYMKT, 2024)	17
Obrázek 6: V-A charakteristika (Remote-LAB GYMKT, 2024).....	20
Obrázek 7: Výsledek luminiscenčního testování (Asb, 2010).....	21
Obrázek 8: Pohled termokamerou na FV panel (MEKA, 2024)	22
Obrázek 9: ESP32 (ESP32, 2024)	23
Obrázek 10: Komunikační sběrnice I2C (Pico Technology, 2024).....	24
Obrázek 11: Datový rámec I2C (Pico Technology, 2024)	25
Obrázek 12: Komunikační sběrnice OneWire (Zephyr, 2024).....	25
Obrázek 13: Senzor měření proudu a napětí INA3221 (I2C INA3221, 2024).....	26
Obrázek 14: H-můstek L298N (H-můstek L298N, 2024).....	27
Obrázek 15: Teplotní čidlo DS18B20 (Sonda DS18B20, 2024).....	27
Obrázek 16: Solární panel (Fotovoltaický panel, 2024).....	28
Obrázek 17: Popis modelu desky řídicí jednotky	29
Obrázek 18: Popis modelu testovací stanice.....	30
Obrázek 19: Usazení motoru a propojení s trapézovou tyčí.....	30
Obrázek 20: Uchycení spínače a koncové polohy vozíku	31
Obrázek 21: Modelu vozíku	32
Obrázek 22: Konstrukce pro připevnění solárního panelu	33
Obrázek 23: Ukázka naměřených hodnot ve výsledné tabulce	33
Obrázek 24: Blokové schéma	34
Obrázek 25: Popis funkce setMotorPosition().....	36
Obrázek 26: Ukázka programu pro odesílání výsledné matice měření na lokální server.....	36
Obrázek 27: Vývojový diagram.....	38

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehled účinnosti FV článků (Matuška, 2020)	18
Tabulka 2: Důvody ztrát z nominálního výkonu (Tzb-energ, 2024)	20
Tabulka 3: Popis parametrů ESP32	23
Tabulka 4: Popis funkcí knihoven programu ESP32	35
Tabulka 5: Rozdíl výkonů při odlišné teplotě.....	43
Tabulka 6: Parametry měřicí stanice	46

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Poloha portálu přístroje	39
Graf 2: Odchylka dosažené polohy	40
Graf 3: Účinnost fotovoltaického panelu.....	41
Graf 4: Přijímaný výkon FV při změně výkonu LED /d 5 mm/	42
Graf 5: Výkon LED a FV panelu / $t_{ok} 23,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ /	43
Graf 6: Výkon LED a FV panelu / $t_{ok} 11 \text{ }^{\circ}\text{C}$ /	44

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

3D	třírozměrný
FV	fotovoltaický
LED	elektroluminiscenční dioda
PETG	typ filamentu do 3D tiskárny
PWM	pulzně šířková modulace
V-A	volta-ampérová
Wi-Fi	standard pro bezdrátové sítě

1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá laboratorním, automatickým testováním fotovoltaického panelu, s měřením podstatných elektrických parametrů, vzdálenosti a zdroje světla. Měření je automatizované a proces je řízen mikrokontrolerem ESP32, které dále zajišťuje zobrazení dat bezdrátovým komunikačním rozhraním Wi-Fi.

Motivací pro realizaci této bakalářské práce bylo spojení aktuálních trendů v automatizaci v podobě malého mikrokontroleru a bezdrátové komunikace a také fotovoltaických systémů, které tvoří velký zájem na trhu o obnovitelné zdroje a potenciál v rámci výroby elektřiny.

Tato práce otevírá možnosti praktického využití v průmyslu a výrobě fotovoltaických panelů. Díky automatizovanému testování, které využívá aktuální trendy v oblasti řídicích jednotek a bezdrátové komunikace, má potenciál přinést efektivnější sběr dat při výrobě a testování fotovoltaických panelů. Tímto přístupem se otevírají nové možnosti pro optimalizaci procesů v průmyslu, což může vést ke zlepšení kvality výrobků a celkovému zvýšení efektivity využití solární energie. Tím i snížení nákladu pro výrobce nebo spotřebitele.

Stanice je založena na testování panelů v různých vzdálenostech od zdroje světla s proměnnou intenzitou osvětlení v podobě výkonové LED, která slouží k simulaci světelného záření Slunce. Následný sběr dat je realizován pomocí ESP32, který je následně uspořádán do tabulky, což umožňuje další zpracování dat a jejich analýzu.

Cílem této práce je realizovat konstrukci testovací jednotky, která pomocí programového řešení bude měřit technické parametry fotovoltaického panelu. Zpracovaná data pak následně zobrazit pomocí webového rozhraní.

2 FOTOVOLTAICKÝ PANEL

Fotovoltaický panel je elektrické zařízení, které v obvodu slouží jako zdroj elektrické energie. Je složený z fotovoltaických článků, které přeměňují solární energii na elektrickou. Článek je tvořen tzv. PN přechodem, který funguje na principu rekombinace nosičů náboje, za pomoci energie od fotonů. Články uvnitř panelu se spojují do série a tím udávají jmenovité napětí a proud neboli maximální výkon označovaný jako watt-peak [Wp]. Tato hodnota udává maximální výkon při optimálních slunečních podmínkách.

2.1 Historie fotovoltaických panelů

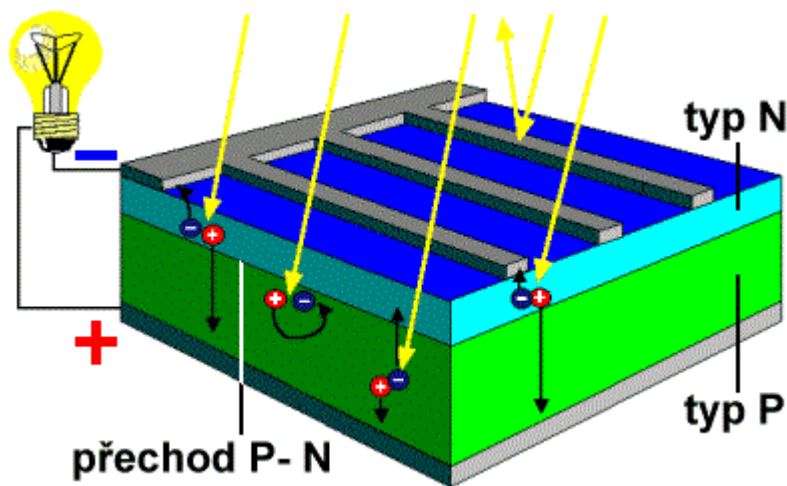
Mezi první konstruktéry fotoelektrického článku patří Charles Fritts, který v roce 1883 potáhnul polovodivý selen velmi tenkou vrstvou zlata a tím vytvořil jednoduchý PN přechod a docílil tím transformace světelné energie na elektrickou. Následně roku 1888 A. G. Stoletov také zjistil, že dopadem světla z obloukové lampy na měděnou desku jsou výsledkem vystupující elektrony. Tyto „články“ však měly velmi malou účinnost, která se pohybovala okolo 1%, ale daly se principem považovat za zakladatele aktuálních fotovoltaických panelů (Urgošík, 1981).

Velkým přínosem do této problematiky fotovoltaických článků byl Albert Einstein, který přispěl svým objasněním fotoelektrického jevu. Pomocí konceptu fotonů, jako nosičů světelné energie, objasnil podstatu tohoto jevu a byl následně oceněn Nobelovou cenou (Remote-LAB GYMKT, 2024).

Dalším významným přispěvatelem na trh s fotovoltaickými panely byla společnost Bell Labs, která v roce 1954 vydala jejich první křemíkový článek s účinností 6%, který sloužil pro napájení telekomunikačních zařízení pro farmáře, kteří žili mimo civilizaci. Později následovaly roky 1973, kdy při ropné krizi společnost více investovala do výzkumu se solární technikou, 1977 kdy americké ministerstvo spustilo Výzkumný ústav solární energie a 1980, kdy společnost ARCO Solar přinesla první křemíkové panely, nikoliv články, s vyšším výstupním výkonem a účinností a realizovali první fotovoltaickou elektrárnu s výkonem 1MW/rok. (Fotovoltaický článek, 2024)

2.2 Princip fotovoltaických článků

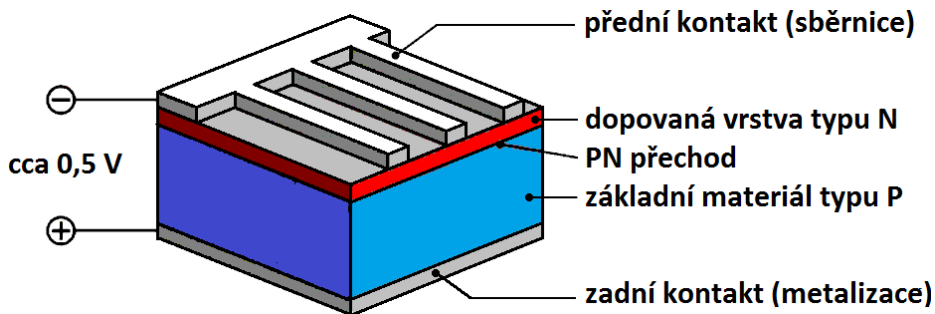
Fotovoltaické články využívají fotovoltaický jev, který je založen na fotoelektrickém jevu. Při fotoelektrickém jevu dopadá foton s dostatečnou energií na polovodičový materiál, který je schopen uvolnit elektron z valenčního pásu do vodivostního pásu (tzv. vnitřní fotoelektrický jev) nebo také emitovat elektron ven z tělesa (tzv. vnější fotoelektrický jev). Pokud se elektron přesune z valenčního do vodivostního pásu, tak vznikne díra, což je kladně nabitá oblast na místě původního elektronu. Pokud je v polovodičovém materiálu vytvořen PN přechod, elektrony a díry se začnou pohybovat směrem k elektrodám se stejnou polaritou. Když jsou následně elektrody propojeny vnějším elektrickým obvodem, elektrony putují k opačné elektrodě, kde se spojí s dírami, což vede k rekombinaci, a důsledkem tohoto pohybu vzniká elektrický proud (Photoelectric effect, 2024).



Obrázek 1: Princip FV článku (Skupina ČEZ, 2024)

2.3 Struktura fotovoltaických článků

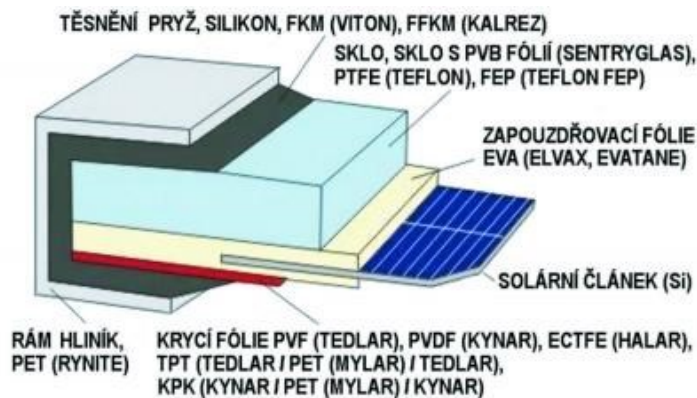
Základem panelu je článek, což je plocha absorpčního materiálu, která přeměňuje fotonovou energii na elektrickou. Články se konstruují na bázi polovodičů (křemíku, germanium), ale aktuálně se vyvíjí další možné typy jako organické a perovskitovské.



Obrázek 2: Struktura FV článku (Tzbinfo, 2014)

Struktura fotovoltaických panelů je přizpůsobená tak, aby odolala okolním podmínkám jako je déšť, vítr, mechanické poškození, koroze, oteplování a dalším nežádoucím vnějším vlivům, ale také měla ideálně co nejvyšší účinnost. Životnost je tedy převážně dána jejich konstrukcí a kvalitou článků. Typická životnost fotovoltaických panelů z krystalického křemíku se pohybuje v rozmezí 20 až 35 let. V průběhu let však dochází k degradaci materiálu, jak článků, tak i konstrukce, a panely ztrácí účinnost přibližně 0,3%-0,5%/rok.

Panel je zapouzdřen v hliníkové konstrukci a umístěn do tvrzeného skla společně s fólií a zespodu opatřen vysoce pevnou plastovou krycí fólií. Díky konstrukci tak není zapotřebí panel aktivně chladit pomocí ventilátorů či chladících soustav, ale jsou přirozeně chlazeny díky okolní teplotě vzduchu. Pro dosažení ideální teploty a účinnosti se proto panely umísťují na nosnou konstrukci, která zajistí stabilní a pevnou podporu a docílí pasivního chlazení (Kopunec, 2011).



Obrázek 3: Konstrukce FV panelu (CNE, 2024)

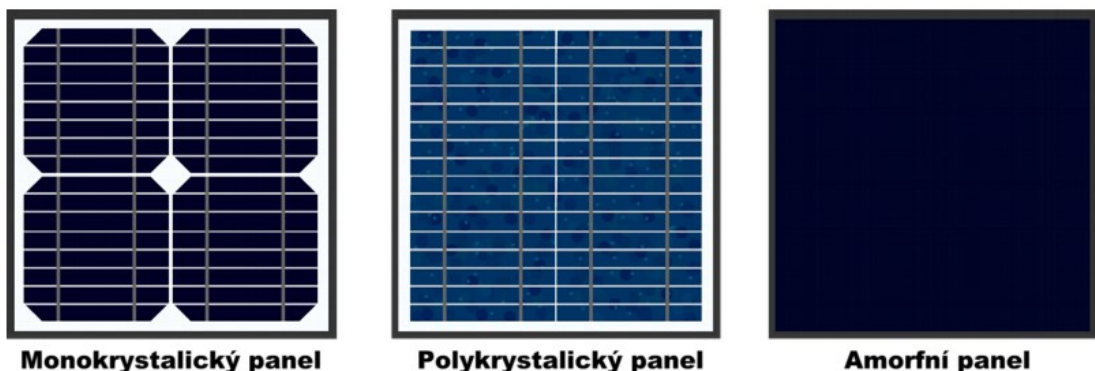
2.4 Využití fotovoltaických panelů

Ačkoliv fotovoltaické panely stále nejsou nejúčinnější zdroje elektrické energie, tak jejich uplatnění stále roste, a to díky pokroku v technologiích a snižování nákladů na výrobu. Světlo je jedním ze „zelených“ zdrojů energie a na rozdíl od vodní či větrné, nejsou na ni kladeny velké podmínky na lokaci a náročnost instalace. Fotovoltaické elektrárny je možné využít k výrobě lokální elektřiny, jako jsou domácnosti, firmy a další menší spotřebitele, nebo k centrální výrobě, jako jsou vesnice, města, a velká fotovoltaická pole. Jednou z jejich hlavních výhod je schopnost fungovat v tzv. „off-grid“ systému, který nevyžaduje připojení do rozvodné sítě a díky tomu je možné je využívat v odlehlých a často nedostupných místech. Dnes již ale většina spotřebitelů využívá „on-grid“, popřípadě „hybrid“ instalace, které umožňují spotřebiteli svobodně hospodařit s vyrobenou elektrickou energií.

Fotovoltaické panely a fotovoltaické elektrárny tedy primárně slouží k nezávislosti na fosilních palivech, snížení nákladů na elektrickou energii, k regulaci lokálních emisí a schopnost vytvoření nezávislého elektrického zdroje.

2.5 Typy fotovoltaických článků

Základním společným prvkem dnešních panelů je křemen (až 95% objemu produkce), který je technologickým postupem vybroušen do podoby čistého křemíku. Dříve typu P, dnes se již přechází na typ N. Tato technologie je typická nejvíce pro první a druhou generaci solárních článků, které jsou tvořeny buď z monokrystalického nebo polykrystalického článku. Jednotlivé generace představují nové výrobní metody, jiné účinnosti a nové konstrukční materiály.



Obrázek 4: Typy FV panelů (Remote-LAB GYMKT, 2024)

2.5.1 První generace

První generace FV panelů využívá monokrystalického nebo polykrystalického křemíku v nichž je tvořen velký P-N přechod. Dosahují dlouhodobé stability, životnosti a výkonem.

Proces výroby je technologicky i finančně náročný a je realizován tažením válcového monokrystalu. Účinnost článků první generace je v rozmezí 15-18% (MATUŠKA, 2020).

2.5.2 Druhá generace

Následující druhá generace využívá nové postupy při výrobě, jako jsou tenkovrstvé solární články, které jsou ohýbatelné, tenké, a proto spotřebují méně materiálu. Pro výrobu se využívá amorfni křemík a Copper-Indium-diSelenid. Tyto články mají znatelně nižší účinnost, která se pohybuje v rozmezí 5-7% (MATUŠKA, 2020).

2.5.3 Třetí generace

Třetí generace poskytla nové technologické metody (více-přechodové články), které obsahují 2 popřípadě 3 PN přechody. Jsou relativně jednodušší na výrobu oproti předešlým generacím, jsou ohebné a jejich výroba vzniká napařováním několika tenkých vrstev křemíku s příměsí germania. Díky složení a konstrukci využívají větší energii spektra záření, proto se jejich účinnost pohybuje od 20-30% (MATUŠKA, 2020).

Tabulka 1: Přehled účinnosti FV článků (Matuska, 2020)

Typ materiálu	Běžná účinnost (%)	Laboratorní účinnost (%)	Životnost (rok)	Podíl na trhu (%)
Monokrystalický křemík	16 –18	24	25-30	42
Polykrystalický křemík	12 –16	18	10-25	42
Amorfni křemík	5–7	12	10	12
Telurid kadmia (CdTe)	8 –10	16	-	<1
Galium arsenid (GaAs)	20	30	20	<1
CIS články	12	19	-	<1
CIGS články	10	18	-	<1

2.6 Podstatné parametry fotovoltaických panelů

MPP

Bod maximálního výkonu (maximum power point), je parametr, který je dán díky V-A charakteristice. A udává, při jakém proudu a napětí nám článek poskytne co největší výkon. Tedy i jeho nejvyšší účinnost.

Napětí U_{MP}

Představuje napětí, které fotovoltaický článek vyrobí při provozu na maximální výkon. Je dán bodem MPP na V-A charakteristice.

Proud I_{MP}

Zkratový proud je maximální proud, který dokáže článek poskytnout. Při této hodnotě tedy dodává panel maximální výkon P_{MAX} . Hodnota zkratového proudu závisí na velikosti plochy článku a použité technologii.

Napětí naprázdno U_0

Je napětí, při kterém obvodem neprotéká žádný proud. Je to maximální napětí, které fotovoltaický článek může poskytnout, pokud zdroj není zatížen žádným spotřebičem.

Vnitřní odpor R_i

Vnitřní odpor solárního článku, který je dán v Ohmech. Ten je dán konstrukcí a výrobním postupem.

$$R_i = \frac{U_{MP}}{I_{MP}} \quad (1)$$

Maximální výkon P_M

Maximální výkon je hodnota, která udává, kolik může solární článek maximálně vyrobit elektrické energie. Jednotka je watt-peak

$$P_M = I_{MP} * U_{MP} \quad (2)$$

Účinnost

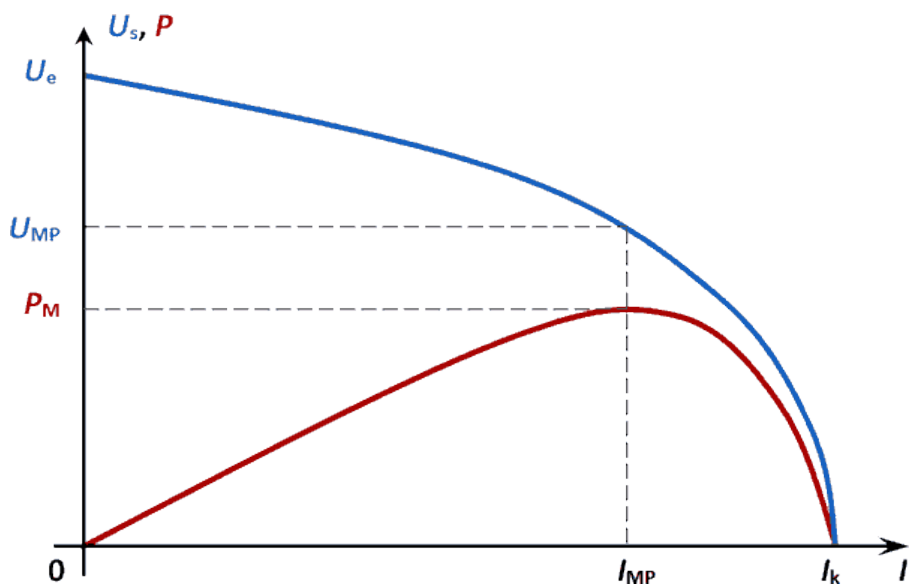
Účinnost je definována jako podíl maximálního výstupního výkonu (P_M) a vstupního výkonu (P_{IN}). Měří se v procentech (%), což znamená, že toto procento vstupního výkonu slunečního záření se přemění na elektrický výkon. Účinnost je dána strukturou a výrobní technologií solárního článku.

$$\eta = \frac{P_M}{P_{IN}} \quad (3)$$

V-A charakteristika

Jde o základní charakteristiku, která udává podstatné parametry solárního článku. Je to grafické zobrazení závislosti napětí a proudu. Udává informace o zkratovém proudu, napětí naprázdno, zobrazuje křivku výkonu a určuje maximální výkonový bod MPP při určitých

podmínkách. Nejpodstatnějším bodem je PM, což udává maximální výkon fotovoltaického článku (Kopunec, 2011).



Obrázek 5: V-A charakteristika (Remote-LAB GYMKT, 2024)

2.7 Testovací metody fotovoltaických panelů

Z důvodu udržení potřebných elektrických parametrů a zachování bezpečnosti se fotovoltaické panely podrobují důkladným testům, které zajistí dlouhodobou účinnou funkčnost. Tyto testy mohou probíhat po instalaci panelů, při průběžné ověřování funkčnosti, ale také ve finální výrobní zkoušce předtím, než se dodají spotřebiteli. Kromě toho se také často provádějí odolnostní testy vůči nepříznivým povětrnostním podmínkám, okolním teplotám a jiné další specifické testy, které zajišťují kvalitu a spolehlivost panelů po celou dobu jejich životnosti. Tyto testy jsou tedy velmi potřebné pro dosažení co nejvyšší účinnosti panelů. Jelikož se nejčastěji udává účinnost FV panelů v rozmezí 18–25 %, je každé zachované procento potřebné pro transformaci světelné na elektrickou energii a tím i ověření funkčnosti ideálně každé části panelu. Zde je přehled častých závad snižujících výkon elektráren. (Kopunec, 2011)

Tabulka 2: Důvody ztrát z nominálního výkonu (Tzb-energ, 2024)

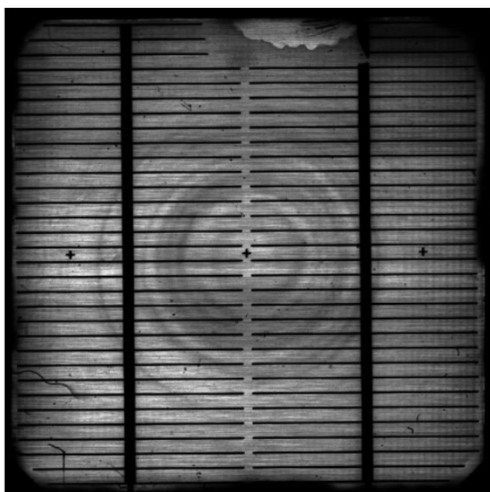
FVE - nejčastější ztráty z deklarovaného nominálního výkonu	
Ztráty vlivem teploty podle typu použité technologie	6 - 10 %
Úhlová odrazivost	3 - 3,5 %
Kabeláž	4 - 6,5 %
Střídač	5 - 6,5 %
Skryté vady FV panelů	1 - 3,5 %

2.7.1 Vizuální kontrola

Základní vizuální kontrola slouží k identifikaci viditelných vad lidským okem. Nejčastěji jde o poškozený rám, stav ochranného skla, jednotlivých článků nebo propojovacího konektoru a vodičů.

2.7.2 Luminiscenční metoda

Luminiscenční metoda je jedna z nejlepších identifikátorů mechanických vad článku. Dokáže odhalit skryté chyby, které jsou ostatními metodami velmi těžko zjistitelné (flash test, V/A charakteristika, termokamera). Obecně fungují na principu luminiscence neboli vyzařování světelným zářením, kdy na fotovoltaický panel je připojen zdroj a tím články protéká proud. Pomocí kamer, které zaznamenávají záření na této vlnové délce se poté zaznamenávají snímky článků a pomocí vyzařené energie udávají jejich stav. Pokud se na snímku objeví tmavá oblast, znamená to, že článek nevyzařuje energii a neprochází jím proud. Pokud je na snímku oblast světle šedá, znamená to, že panel je v pořádku a vyzařuje tedy světelnou energii. Stav je tedy udáván odstínem šedé barvy (Publi, 2024).



Obrázek 6: Výsledek luminiscenčního testování (Asb, 2010)

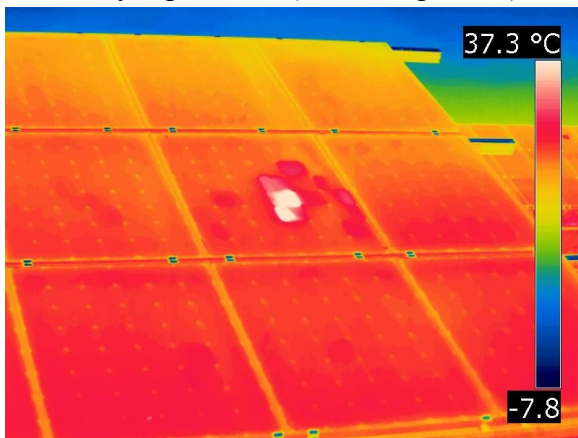
2.7.3 Flash test

FLASH test je prováděn při laboratorních podmínkách a simuluje ideální světelné i tepelné podmínky a na přesných měřicích přístrojích porovnává skutečné naměřené výkony s parametry, které udává výrobce. Panely jsou testovány za standardních specifických podmínek, většinou při osvětlení s intenzitou 1000W/m^2 a se spektrálním nastavením AM 1.5 (Publi, 2024).

2.7.4 Termografie

Jde o nejrychlejší způsob hledání závad fotovoltaických panelů. Kontrola panelu se provádí pomocí termokamery při zatížení. Kamera změří povrchovou teplotu těles a následně ji zobrazí na displeji jako barevnou vizualizaci.

Zobrazení barevných polí usnadňuje hledání defektů elektrických komponent, jako jsou by-pass diody, elektrické propoje nebo špatně konstruované články. Ty při závadě vyzařují větší množství infračerveného záření, které je způsobeno zahříváním v důsledku průchodu elektrickým proudem (Tzb-energ, 2024).



Obrázek 7: Pohled termokamerou na FV panel (MEKA, 2024)

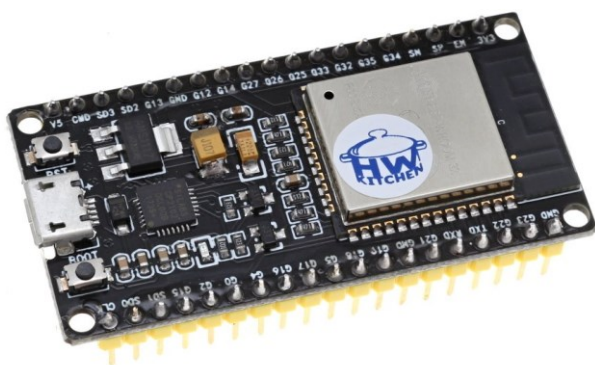
2.7.5 V-A Charakteristika

Jedním z možností je také V-A charakteristika. Tento test je možné provádět pouze za svitu slunce a je možné ho realizovat ve venkovních podmínkách. Měření je provedeno speciálním přístrojem zvaným „analyzátor fotovoltaických panelů“. Přístroj provede automatický zátěžový test a poté vykreslí průběh V-A charakteristiky. Přístroj také posoudí, zdali měřené hodnoty (maximální výkon, napětí naprázdno, napětí pro maximální výkon, zkratový proud, maximální výkon a účinnost) odpovídají jmenovitým hodnotám panelu (test musí probíhat za standardních podmínek) (Tzbinfo, 2024).

3 ŘÍDÍCÍ ELEKTRONIKA

3.1 ESP32

ESP32-WROOM-32 je mikrokontrolér využívaný v elektronice pro komunikaci, řízení a sledování vybraných fyzikálních veličin. Hojně je využíván mezi bastlíři, ale také v průmyslové elektronice díky své kompaktnosti, spolehlivosti, malému výkonu a velkému počtu komunikačních možností. Jednotka je řízena dvoujádrovým procesorem Xtensa 32-bit, který disponuje 34 tzv. GPIO neboli „General purpose input/output“, což jsou fyzické piny, které slouží pro komunikaci s vnějšími periferiemi. Jeho výhodou je rychlost procesoru a také dostupnost všech známých a dostupných rozhraní, využívaných v nízkonapěťové elektronice, jako jsou Wi-Fi, I2C, SPI, OneWire, Bluetooth, Bluetooth Low Energy, UART, atd (ESP32-WROOM-32, 2023).



Obrázek 8: ESP32 (ESP32, 2024)

Parametry ESP32

Tabulka 3: Popis parametrů ESP32

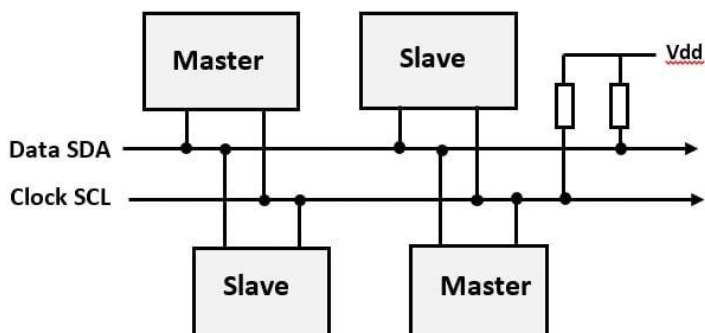
Procesor	Xtensa 2 jádrový, 32-bit, 240MHz
Napájecí napětí	2,3 až 3,6 VDC (micro USB)
Flash paměť	4 MB
RAM	520 kB
Rozhraní modulu	Bluetooth (BLE), Wi-Fi, I2C, SPI, UART, SDIO, LED PWM, MOTOR PWM, IR, PWM, ADC, DAC, SDcard, kapacitní „touch“ senzor

3.2 Komunikační sběrnice

Komunikační sběrnice umožňují řídicímu mikrokontroleru být ve spojení s vnějšími periferiemi. ESP32 má již předdefinovaná rozhraní pro tyto typy rozhraní, tudíž není zapotřebí definovat jednotlivé komunikační piny a psát vlastní kód pro jejich funkčnost. Rozhraní využívají sériovou komunikaci, která funguje na principu převážně jednoho až dvou datových vodičů společně se zemí a napájením.

I2C

Inter-Integrated Circuit (I2C) je synchronní, multi-master, multi-slave polo-duplexní komunikační sběrnice, často využívaná pro krátké vzdálenosti v komunikaci mezi řídicí jednotkou a externími periferiemi v rámci embedded systémů. Zařízení jsou propojena pomocí datových vodičů SDA (Serial Data) a SCL (Serial Clock), kde SDA slouží jako datový vodič a SCL jako synchronizační časový vodič. Princip komunikace je založen na "open-collector" obvodech a pull-up rezistorech, které udržují linku v ustáleném stavu logické 1 a pro komunikaci se využívá aktivního stavu logické 0.

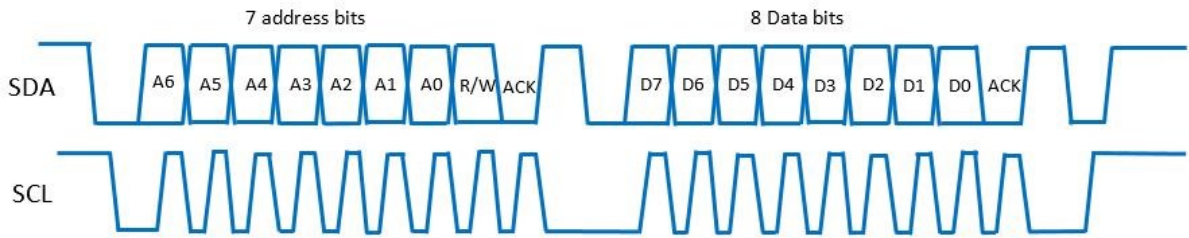


Obrázek 9: Komunikační sběrnice I2C (Pico Technology, 2024)

Maximální počet je omezen na 128 zařízení v síti, přičemž každé zařízení obvykle disponuje adresou přidělenou výrobcem. Některé adresy jsou rezervovány pro speciální účely, například pro broadcast komunikaci.

Komunikace začíná odesláním 7 bitové adresy, začínající s nejvýznamnějším bitem (MSb). Bit R/W=1 označuje čtení od kontroléru, zatímco R/W=0 označuje zápis od kontroléru (master). Potvrzení (acknowledge bit) signalizuje, že zařízení je připraveno přijímat nebo odesílat data. Následně se odesílají data po bitech, začínající s nejvýznamnějším bitem. Datový

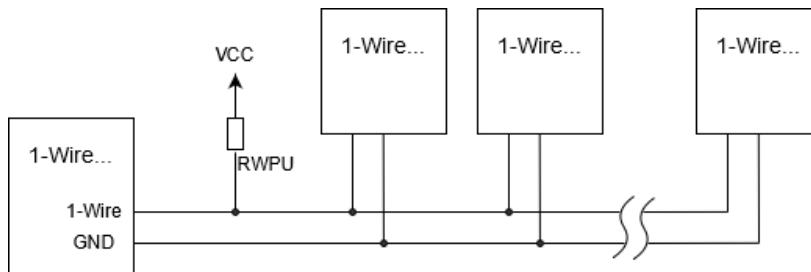
přenos probíhá po jednom bytu (8 bitech). Po dokončení přenosu se potvrzení nastaví na logickou 0, což symbolizuje odeslání datového rámce (Pico Technology, 2024).



Obrázek 10: Datový rámec I2C (Pico Technology, 2024)

OneWire

OneWire je polo duplexní single-masterová asynchronní sériová sběrnice, kde je pouze jeden řídicí MASTER, což snižuje možnost kolizí na sběrnici. Tato sběrnice využívá jediný signálový vodič, který může sloužit i jako zdroj napájení pro slave zařízení. Master má hlavní úlohu v komunikaci. Řídí směr přenosu dat mezi Masterem a Slavem. Každé zařízení má 64bitové unikátní ID uložené v ROM (nevolatilní paměti), a tudíž nelze mít dvě zařízení se stejnou adresou (nastává kolize). K správné funkci sběrnice je zapotřebí pull-up rezistor, který pomáhá udržovat logickou hodnotu na sběrnici.



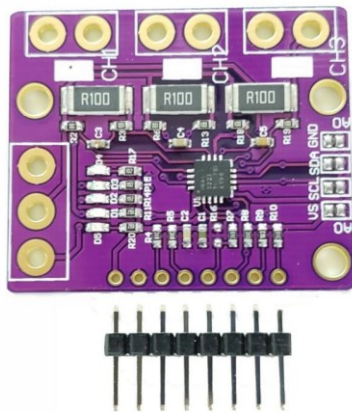
Obrázek 11: Komunikační sběrnice OneWire (Zephyr, 2024)

OneWire sběrnice využívá tzv. open collector/drain zapojení pomocí MOSFETů. Maximální rychlost této sběrnice je 15,4 Kb/s. Již zmíněný datový vodič může být použit jako napájení, jde o tzv. parazitní mód, kdy je slave zařízení neaktivní během nekomunikace s MASTER, což znamená, že nepřijímá ani neposílá data, a pracuje pouze v napájecím módu. Jakmile je slave zařízení připraveno k přenosu dat, přepne se do režimu komunikace a využívá napájení pomocí kondenzátoru, který udržuje potřebný náboj pro napájení během komunikace (Zephyr, 2024).

3.3 Ostatní komponenty

Senzor měření proudu a napětí

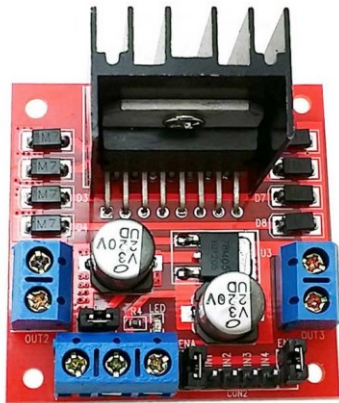
Senzor určený k měření aktuálního proudu a napětí slouží jako ukazatel vysílaného a přijímaného výkonu. Obsahuje 3 kanály, kdy každý z nich je paralelně připojen na měřicí rezistor v hodnotě 0,1 Ohm. Je řízen integrovaným čipem INA3221 a napájen pomocí 3,3V a komunikace probíhá díky integrovanému I2C rozhraní. Modul umožňuje připojit vlastní napájení 0-26 VDC, které je sdíleno na všechny měřicí kanály, nebo měřit pouze rozdíl napětí na rezistoru a protékající proud bez potřeby vstupního napájení. Pro fungování analogově-digitálního převodníku a komunikace je zapotřebí připojit 3,3-5 VDC pro napájení integrovaného čipu.



Obrázek 12: Senzor měření proudu a napětí INA3221 (I2C INA3221, 2024)

H-Můstek

H-můstek je elektronický obvod, který slouží k přepínání polaroty napětí motorů a tím mění jejich směr. Můstek je obecně tvořen 4 spínači, které jsou nakonfigurované tak, aby vždy spínaly jeden směr. V tomto případě je využit modul s integrovaným čipem L298N, který slouží pro ovládání dvou motorů anebo ovládání jednoho krokového motoru. Díky jeho možnostem je možné ovládat DC motor klasickým spínáním jednotlivých spínačů můstku nebo také měnit výstupní výkon pomocí PWM. PWM umožňuje ovládat výstupní prvek pomocí šířky pulzů vyslaného z řídicí jednotky.



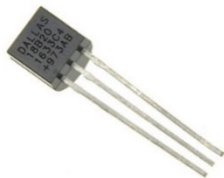
Obrázek 13: H-můstek L298N (H-můstek L298N, 2024)

Zdroj světla

Zdroj světla pro FV panel, který simuluje sluneční svit, je tvořen výkonovou diodou emitující světlo. Dioda má výkon 10 W a je ovládaná pomocí pulzně-šířkové modulace (PWM) přes H-můstek. Pro dosažení vyšší spolehlivosti a funkčnosti byl přidělán pasivní chladič na zadní část LED.

Snímání okolní teploty

Teplotní čidlo slouží k zaznamenání okolních podmínek. Teplota má zásadní vliv na funkci PN přechodu, proto je měření tohoto parametru podstatné pro dosažení kvalitnějších výsledků. DS18B20 je typ teplotního čidla, které využívá rozhraní OneWire pro komunikaci. Jeho výstupní hodnota je reprezentována v digitální podobě a je dostupná na pinu označeném jako DQ. Čidlo poskytuje rozlišení měření od 9-12 bit, a napájení 3,3 až 5 V. S vyšší kvalitou rozlišení zpracování teploty se také prodlužuje čas konverze, proto je dobré zvolit optimální rozlišení.



Obrázek 14: Teplotní čidlo DS18B20 (Sonda DS18B20, 2024)

Motor

Pohon pro ovládání posuvu je realizován stejnosměrným motorem s převodovkou. Motor má jmenovité napětí 12VDC a maximální proud 0,5 A. Jeho vysoký točivý moment 130 N*cm zajišťuje plynulý pohyb a maximální rychlost je 60 otáček za minutu.

Rotační enkodér

Rotační enkodér je podstatným prvkem pro nastavení a čtení aktuální polohy. Vstupní napětí enkodéru je 3,3-5VDC, je dán rozlišením 20 pulzů na otáčku obsahuje zabudované tlačítko a disponuje RC filtrem, který odstraňuje nežádoucí okolní šum.

Fotovoltaický panel

Jde o polykrystalický solární panel o rozměrech 90x70mm, který je tvořen dvěma solárními články. Jeho jmenovitá hodnota výstupního napětí je 5V a proudu 150 mA.



Obrázek 15: Solární panel (Fotovoltaický panel, 2024)

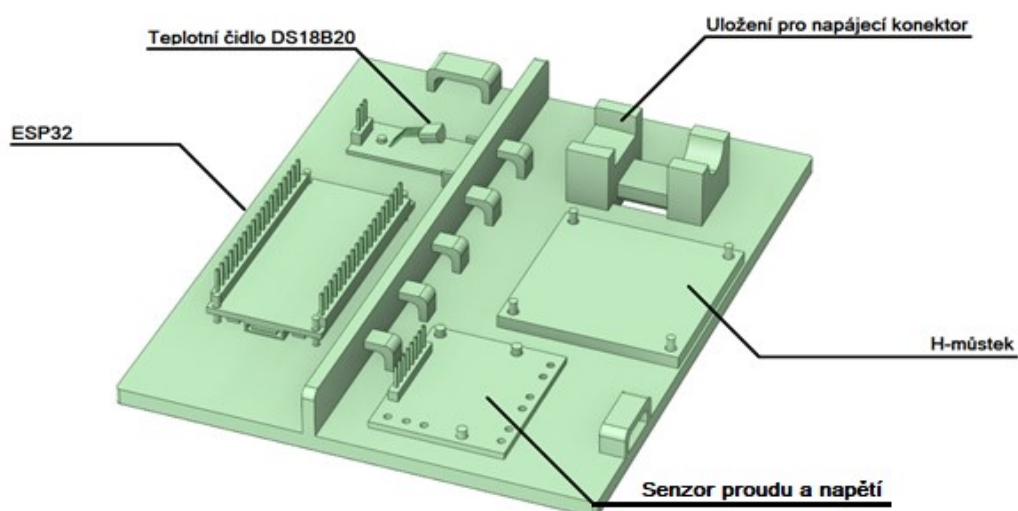
4 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části bakalářské práce je ukázka skutečného modelu testovací stanice pomocí 3D modelu a následné fyzické realizace pomocí 3D tisku. Dále je zde popsán program a webové rozhraní a dosažené výsledky měření. Tato část práce se tedy zaměřuje na popis struktury a funkčnosti testovací stanice, včetně měření parametrů a jejich analýzy.

4.1 Popis testovací stanice

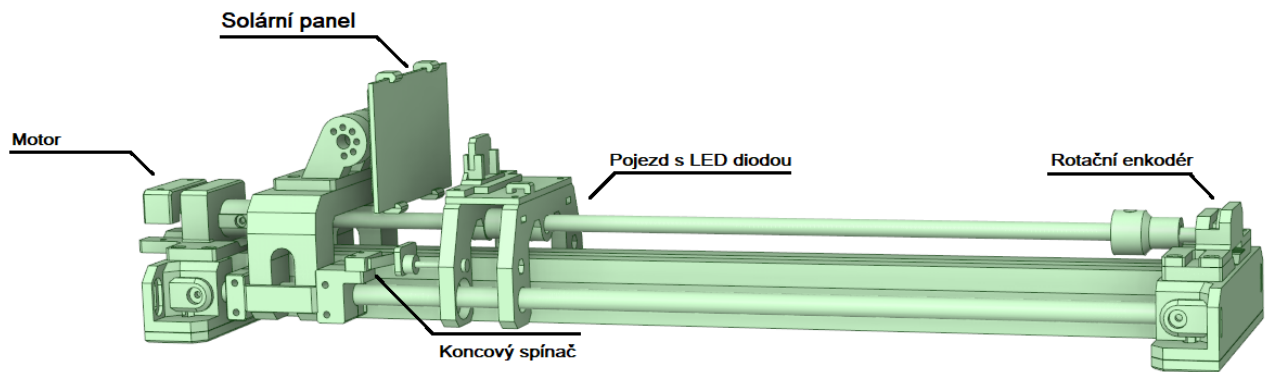
Měřicí stanice byla realizována prostřednictvím 3D modelu, který byl následně převeden do fyzické podoby pomocí technologie 3D tisku. Pro vytisknutí jednotlivých částí modelu byl použit materiál PETG, který je vhodný pro technické modely různých měřítek, ať už menších či větších. PETG je filament s výbornými teplotními vlastnostmi, houževnatostí a relativní pružností, což z něj činí ideální materiál pro výrobu technických komponent. Veškeré části byly tisknuty při teplotě 230 °C a s výplní 50 %, což zajišťuje vyšší odolnost a stabilitu výrobku.

První část modelu je reprezentována deskou s řídicí elektronikou, kde se nachází mikrokontroler a senzory, které mikroprocesor využívá k získání nezbytných dat pro zpracování. Pro napájení elektroniky slouží 12 VDC zdroj připojený pomocí konektoru 2,1 x 5,5 mm. ESP32 má oddělený napájecí zdroj, který je realizován micro USB. Na této desce se nachází ESP32 mikroprocesor, teplotní čidlo DS18B20, H-můstek pro řízení motoru a senzor pro měření proudu a napětí. Pro lepší usazení součástek jsou na desce vytvořeny modelované sloupky, které zajistí pevné držení součástek na svém místě, a kanály pro uspořádání vodičů.



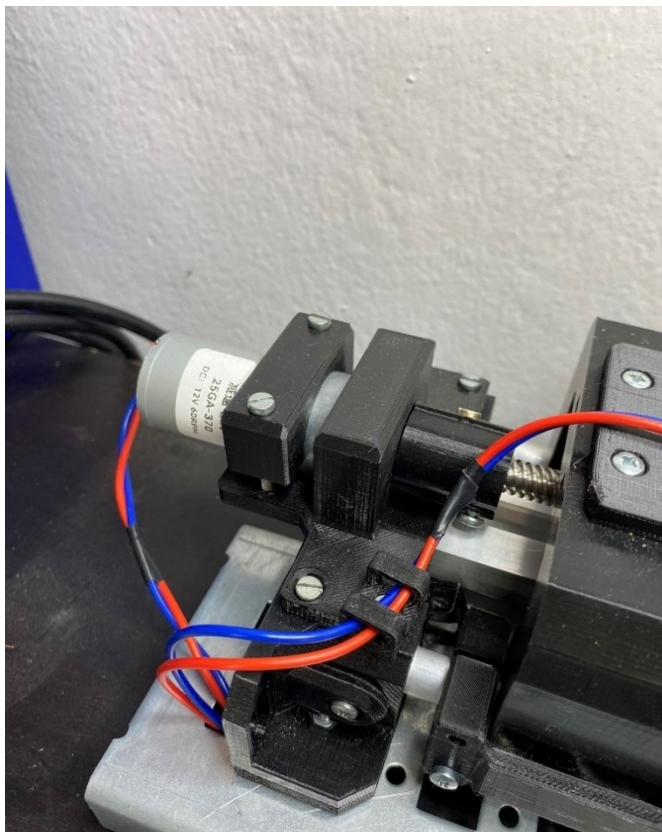
Obrázek 16: Popis modelu desky řídicí jednotky

Druhá část je mechanická konstrukce samotné měřicí stanice. Ta je tvořena nastavovacím posuvným mechanismem, solárním článkem, zdrojem světla a konstrukčními prvky pro zpevnění. Je modelována tak, aby bylo možné díly jednoduše a rychle vyměnit, případně přidat dle svého výběru. Pro spojení jednotlivých částí jsou využity šrouby o rozměru M3, které zajišťují vyšší odolnost spojů a zvyšují kvalitu celé konstrukce.



Obrázek 17: Popis modelu testovací stanice

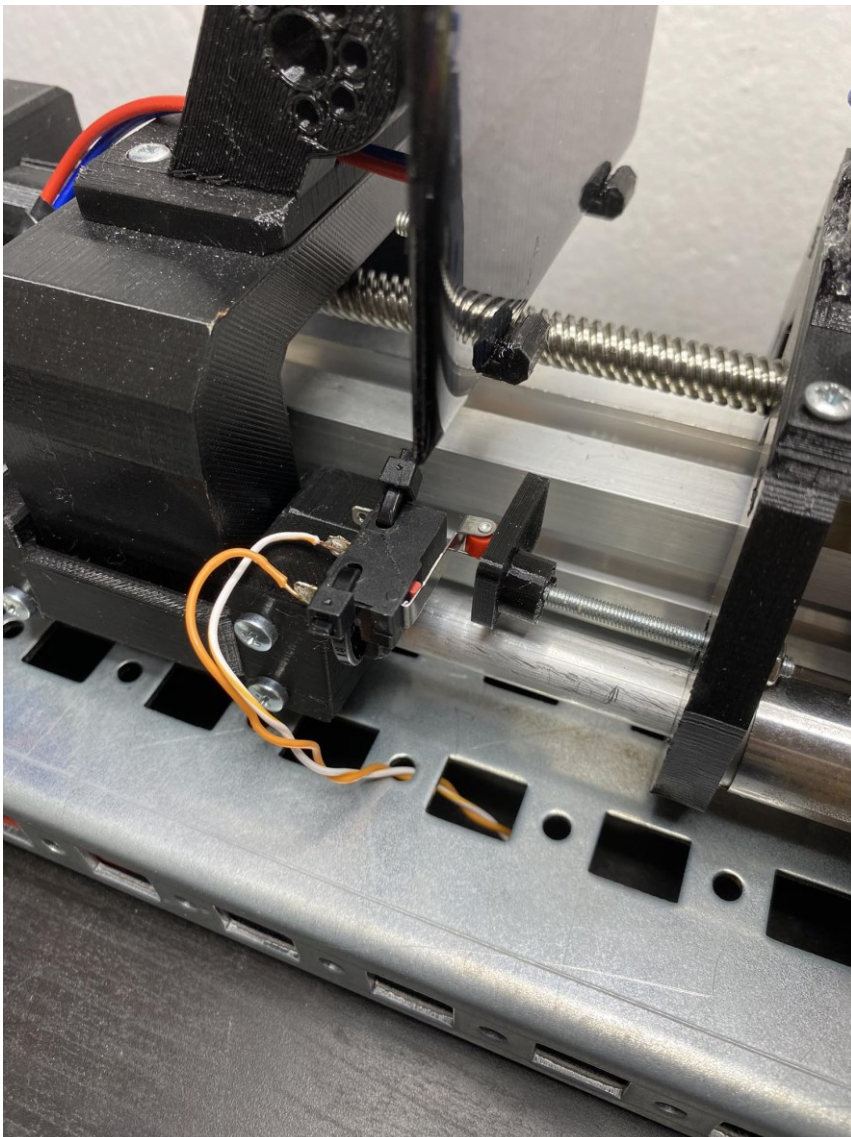
Mechanismus posuvu je tvořen stejnosměrným motorem, trapézovou tyčí a rotačním enkodérem. Motor je řízen h-můstkem, „ON-OFF“ (přepínáním směrů) regulací s hysterezí a ovládá tak celkový pohyb. Pro dosažení požadované polohy je použit jako zpětná vazba rotační



Obrázek 18: Usazení motoru a propojení s trapézovou tyčí

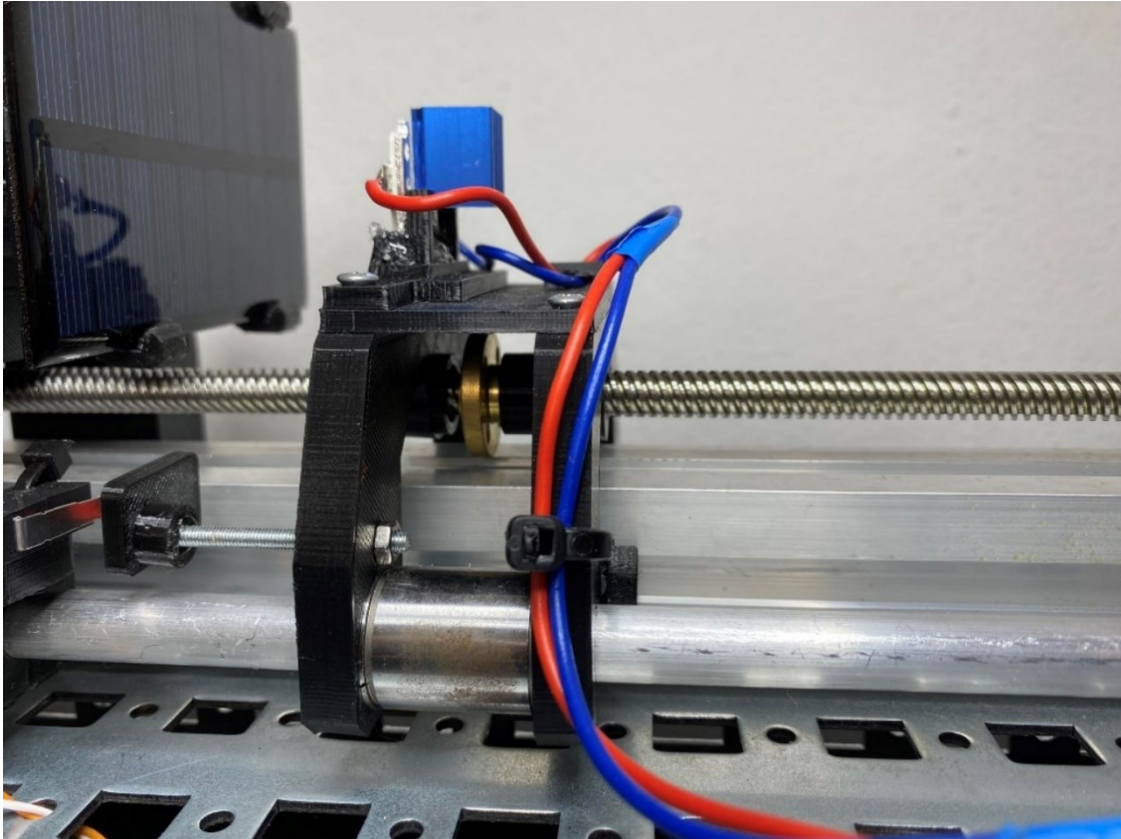
enkodér, který je přímo spojen spojku s trapézovou tyčí a udává tak informaci o aktuální poloze.

Počáteční bod měření je určen koncovým spínačem, který se inicializuje při každém spuštění programu. Inicializace poskytuje systému informaci, kde se vozík aktuálně nachází, což znamená, že je stanovena jeho absolutní poloha. Díky této funkci není nutné využívat paměť EEPROM pro ukládání aktuální polohy. Integrací těchto prvků společně s motorem a rotačním enkodérem je pak programově zajištěno nastavení požadované polohy vozíku se světelným zdrojem.



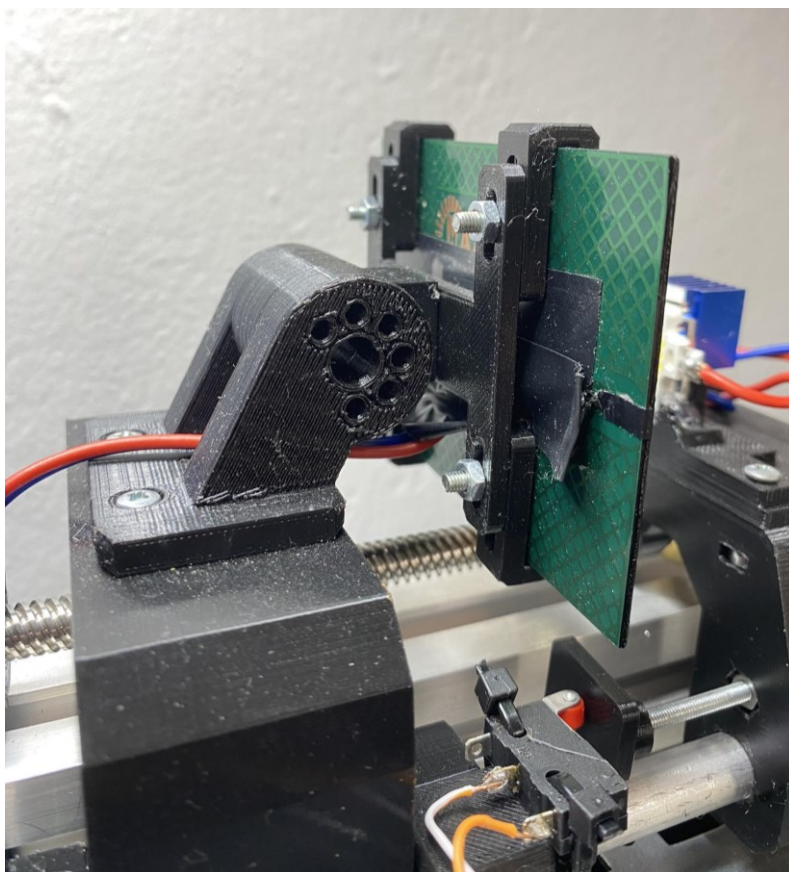
Obrázek 19: Uchycení spínače a koncové polohy vozíku

Vozík s LED je připojen pomocí trapézové matice k trapézové otáčivé tyči. Pojezd je opatřen dvěma lineárními ložisky a vodícími tyčemi, aby byl pohyb plynulý a nedocházelo ke nevyžádané změně dráhy. Na vozíku je umístěna destička, v podobě adaptéru, která je snadno vyměnitelná, a umožňuje tak snadno měnit uchycení a zdroj světla.



Obrázek 20: Modelu vozíku

Panel je připevněn na konstrukci, která jej drží pevně na místě ve směru osy posuvu. Pro naklonění panelu jsou k dispozici aretační šrouby. Jednotlivé aretační zarážky jsou posunuty o 45° , což umožňuje naklonění panelu až o úhel 135° . Tato funkce umožňuje měření intenzity světla (dopadajícího výkonu) pod různými úhly. Konstrukce je navržena tak, aby umožňovala la připevnění panelu o šířce až 75 mm.



Obrázek 21: Konstrukce pro připevnění solárního panelu

4.2 Měřené parametry

Měřené elektrické parametry je nezbytné definovat a pochopit klíčové veličiny, které ovlivňují měření a funkčnost zařízení. Mezi tyto parametry patří napětí U_{FV} a I_{FV} , což je elektrické napětí a proud panelu při dané vzdálenosti a intenzitě světla (přijatý výkon). Dále U_{LED} , I_{LED} což je vyzářený výkon LED. Výsledné výkony jak fotovoltaického panelu, tak LED se dopočítají díky napětí a proudu, který snímá senzor. Okolní teplota je dalším důležitým faktorem, který ovlivňuje jak samotnou elektroniku, tak i životnost zařízení. Důvodem snímání teploty je také PN přechod, kterým je tvořena LED a fotovoltaický panel, protože snižuje svou vodivost se snižující se teplotou a tím značně ovlivňuje měření. Vzdálenost LED od článku, která má vliv na účinnost přenosu světelné energie mezi komponentami. A nakonec účinnost, která je kritickým ukazatelem výkonnosti celého systému.

Setpoint [mm]	Dosažená pozice [mm]	Napětí LED [V]	Proud LED [mA]	Výkon LED [W]	Napětí FV [V]	Proud FV [mA]	Výkon FV [W]	Účinnost [%]	Teplota [°C]
5.000	4.712	10.571	914.000	9.662	5.807	147.200	0.855	8.846	23.250
20.000	20.420	10.564	918.400	9.702	5.695	145.600	0.829	8.546	23.250

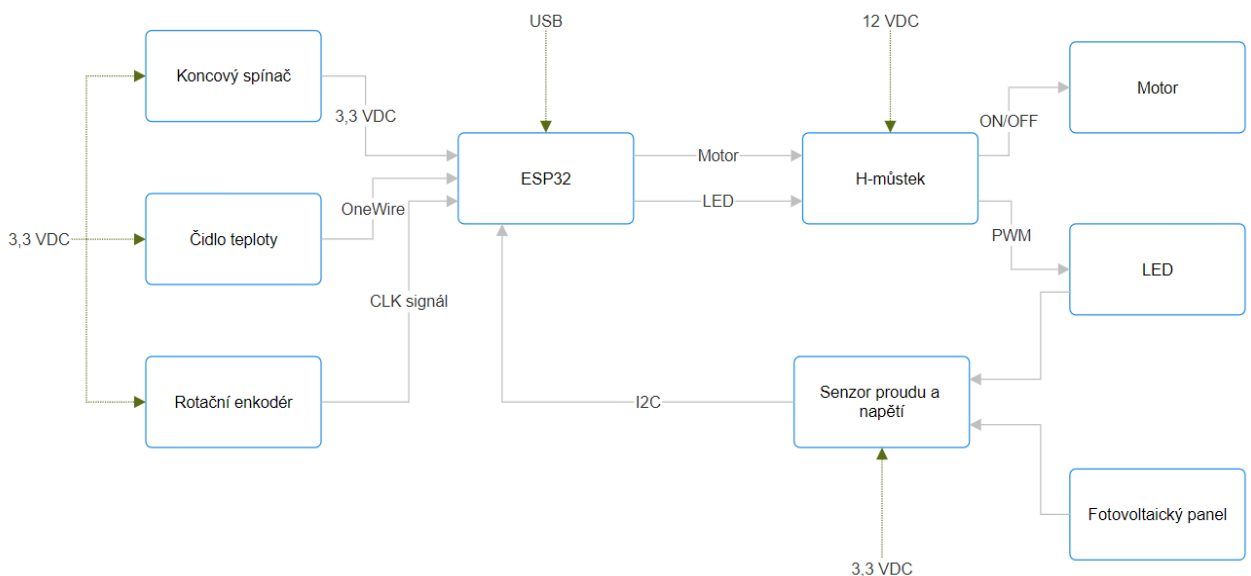
Obrázek 22: Ukázka naměřených hodnot ve výsledné tabulce

4.3 Blokové schéma

Blokové schéma zjednodušeně popisuje způsob směr komunikace a zapojení mezi jednotlivými prvky. Podrobnější popis jednotlivých zapojení je zobrazen v elektrickém schéma viz příloha F a G.

Z blokového schéma jasně vyplývá, že prvky ESP fungují buď jako vstupní nebo výstupní. Jediným výstupním prvkem je h-můstek, který ovládá LED a stejnosměrný motor. Řízení motoru probíhá pomocí dvou vstupů, které spínají jednotlivé části h-můstku. LED je regulována pomocí PWM, kdy nejprve dojde k nastavení polarity napětí prostřednictvím dvou vstupů a poté řízení intenzity svitu pomocí třetího signálu PWM.

Naopak teplotní čidlo, rotační enkodér, koncový spínač a senzor napětí a proudu slouží jako vstupní prvky. Teplotní čidlo komunikuje přes sběrnici OneWire, rotační enkodér poskytuje posun obdélníkového signálu do ESP, senzor napětí komunikuje přes I2C a poskytuje aktuální data o napětí z LED a solárního panelu, a nakonec je zde koncový spínač, který je nastaven jako digitální vstup.



Obrázek 23: Blokové schéma

4.4 Program

Tento blok je zaměřen na hlavní smyčku programu, popisu webového rozhraní a vývojový diagram. Program byl vytvořen v prostředí "Arduino IDE" a napsán v programovacím jazyce C. Je strukturován do hlavní smyčky `loop()`, inicializační smyčky `setup()`, a funkce potřebných pro jeho běh. Důležité inicializační parametry, včetně proměnných, knihoven, tříd a konstant,

jsou definovány v počáteční části programu. Tabulka 4 obsahuje seznam knihoven, které jsou nezbytné pro správný chod programu.

Tabulka 4: Popis funkcí knihoven programu ESP32

Název	Funkce knihovny	Verze
ESP32Encoder	Poskytuje funkce pro čtení impulzního enkodéru pomocí ESP32.	0.11.6
OneWire	Umožňuje komunikaci s periferiemi přes jediný datový vodič.	2.3.7
Wire	Knihovna pro komunikaci pomocí I2C sběrnice.	2.1.0
INA3221	Specifická implementace knihovny pro čip INA3221 pro použití s Arduinem	0.0.1
SDL_Arduino_INA3221	Poskytuje funkce pro I2C komunikaci s čipem INA3221 a ADC převodníku pro určení proudu a napětí.	1.1
WiFi	Poskytuje funkce pro práci s Wi-Fi připojením.	1.2.7
ESPAsyncWebServer	Vytváří asynchronních webových serverů na platformě ESP32.	3.1.0

Hlavní smyčka

Hlavní smyčka *loop()* obsahuje cykly *for()*, které zajišťují požadovaný počet opakování při měření. V hlavní smyčce jsou volány funkce *initMotor()*, *setCount()*, *getEncoderPosition()*, *setMotorPosition()*, *getTempDS18B20* a *LEDcontrol()*. Dále je popsána funkce hlavního programu.

Po spuštění programu se jako první vykoná funkce *initMotor()*, která slouží k inicializaci motoru pomocí koncového spínače. Funkce je volána pouze v případě, že se vozík nenachází na počáteční pozici (při stisknutém koncovém spínači). Pokud tomu tak není, motor zasahuje přesunem vozíku ke směru FV panelu do chvíle, kdy se koncový spínač, který je programově ošetřen „pull down“ rezistorem nesepe na *true* a funkce na *false* a poté následuje *setCount()* což je funkce z knihovny *ESP32Encoder*, která nastaví hodnotu enkodéru na 0.

Po dosažení inicializace se vyvolá první opakování ve *for* cyklu a s tím i *setMotorPosition()*. Tato funkce má jako vstupní parametr požadovanou polohu a aktuální polohu. Motor zasahuje podle aktuální polohy vozíku, zdali je poloha větší či menší nežli nastavovaná. Funkce je také ošetřena hysterezí z důvodu rychlosti akčního zásahu ESP32. Po dosažení polohy funkce vrátí -4096, což zde symbolizuje stav dosažení požadované polohy. Vstupním parametrem této funkce je další funkce *getEncoderPosition()*, která přepočítá

pomocí aktuálních hodnot pulzů enkodéru na hodnotu v milimetrech pro následné pohodlnější nastavení vzdálenosti.

```
float setMotorPosition(float setPoint, float actualValue) {
    Serial.print("Pozadovana pozice: ");
    Serial.println(setPoint);
    Serial.print("Aktualni pozice: ");
    Serial.println(actualValue);
    posledniSetpoint=setPoint;

    if (setPoint > actualValue + hysterese) {
        motorControl(1); // Posunout motor vpřed
        return actualValue;
    }
    else if (setPoint < actualValue - hysterese) {
        motorControl(2); // Posunout motor vzad
        return actualValue;
    }
    else {
        motorControl(3); // Zastavit motor
        posledniPozice = actualValue;
        return -4096;
    }
}
```

Obrázek 24: Popis funkce `setMotorPosition()`

`LEDcontrol()` je funkce, která se vykoná po nastavení požadované pozice a ovládá výkon LED pomocí PWM. Její vstupní parametr je výkon s rozlišením 8 bitů a funkce vrací -4096 po dokončení nastavení výkonu. Ve funkci se nachází vnořená funkce `ledcWrite()`, která slouží pro ovládání výstupního signálu PWM a dále `getVoltage()`, `getCurrent()`, které pracují s hodnotami ze senzoru měření proudu a napětí a následně `getPower()`, `getEfficiency()`, které z nich dopočítají výkon a účinnost.

Na konci každého cyklu jsou změřené parametry zapsány do proměnné `vyslednaMatice`. Velikost této matice je dána počtem měření a počtem měřených parametrů. Do matice se запиše 10 hodnot (požadovaná pozice, aktuální pozice, napětí LED, proud LED, výkon LED, napětí FV panelu, proud FV panelu, výkon FV panelu, účinnost a okolní teplota).

Naměřená data z proměnné `vyslednaMatice` se poté vypíší v podobě tabulky na lokální server pomocí statické stránky HTML.

```
for(int i = 0; i < velikostVzdalenost; i++) {
    matrixHtml += "<tr>";
    for(int j = 0; j < pocetMerParametru; j++) {
        matrixHtml += "<td>" + String(vyslednaMatice[i][j], desMista) + "</td>";
    }
    matrixHtml += "</tr>";
}
matrixHtml += "</table>";
```

Obrázek 25: Ukázka programu pro odesílání výsledné matice měření na lokální server

Konec programu je zakončen voláním funkce *setMotorPosition()*, kde je nastaven vstupní parametr *setPoint* na 0, tudíž na počáteční polohu, kterou trvale udržuje do startu dalšího měření.

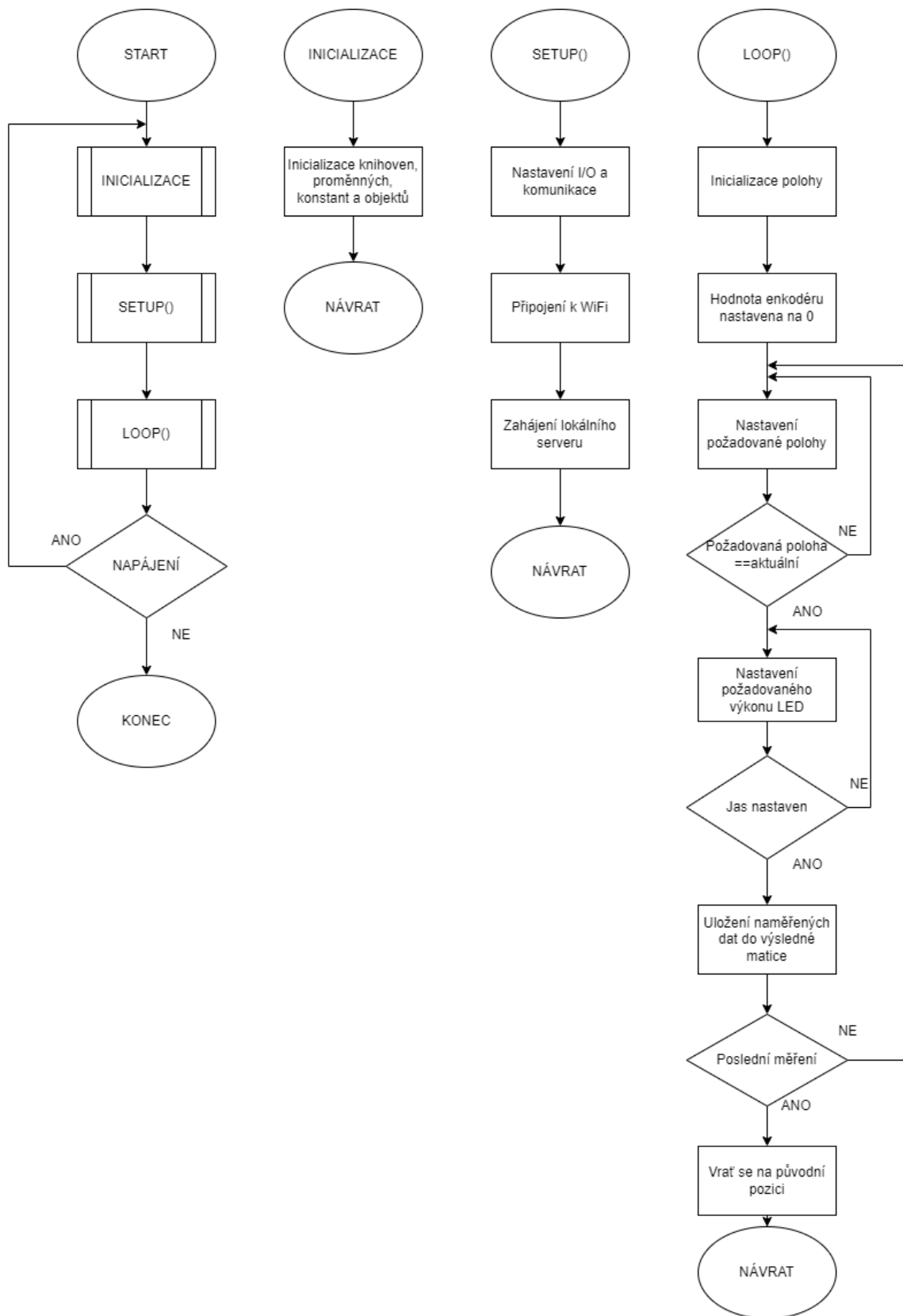
Webové rozhraní

Grafické webové rozhraní má dvě hlavní sekce. Horní sekce slouží k poskytování informací. Zobrazuje aktuální teplotu, což umožňuje uživateli sledovat stabilitu připojení. Taktéž je zde požadovaná pozice vozíku, která signalizuje, ve které části se program aktuálně vykonává. Spodní část je poté tvořena tabulkou s výsledky měření. Tato tabulka s vypsányými hodnotami se vždy zobrazí po dokončení všech měření viz. příloha H.

Funkčnost grafického rozhraní je možné jednoduše popsat ve třech krocích. ESP32 se v síti chová jako klient, tudíž je zapotřebí znát ssid a heslo pro připojení do sítě. Z pohledu klienta připojeného pomocí webového prohlížeče na IP adresu ESP32, je to server. Tento server běží asynchronně. Díky tomu umožňuje asynchronně zpracovávat HTTP požadavky. To znamená, že server může současně obsluhovat více požadavků a neblokovat hlavní smyčku programu.

1. **Definice HTML stránky:** Funkce *server.on("/", HTTP_GET, [...])* definuje, co se má stát, když uživatel navštíví základní URL (například `http://192.168.1.2/`). V těchto funkcích je definováno HTML rozhraní, které bude zobrazeno uživateli. Data, jako je teplota a požadovaná pozice, jsou získána z příslušných funkcí (např. *getTempDS18B20()*) a vložena přímo do HTML stránky pomocí proměnných.
2. **Odeslání HTML stránky:** Když uživatel navštíví stránku, server odešle vygenerované HTML zpět klientovi (v tomto případě webový prohlížeč). To se děje na řádku *request->send(200, "text/html", html)*.
3. **Periodické obnovení stránky:** V HTML je nastavené automatické obnovení stránky každé 3 sekundy pomocí meta tagu s atributem *http-equiv="refresh"* a hodnotou *content="3"*. Tato aktualizace je prováděna pravidelně, avšak není možné jí upravit tak, aby se spouštěla pouze po každé změně hodnot, aby nedocházelo k nepřetržitému obnovování.

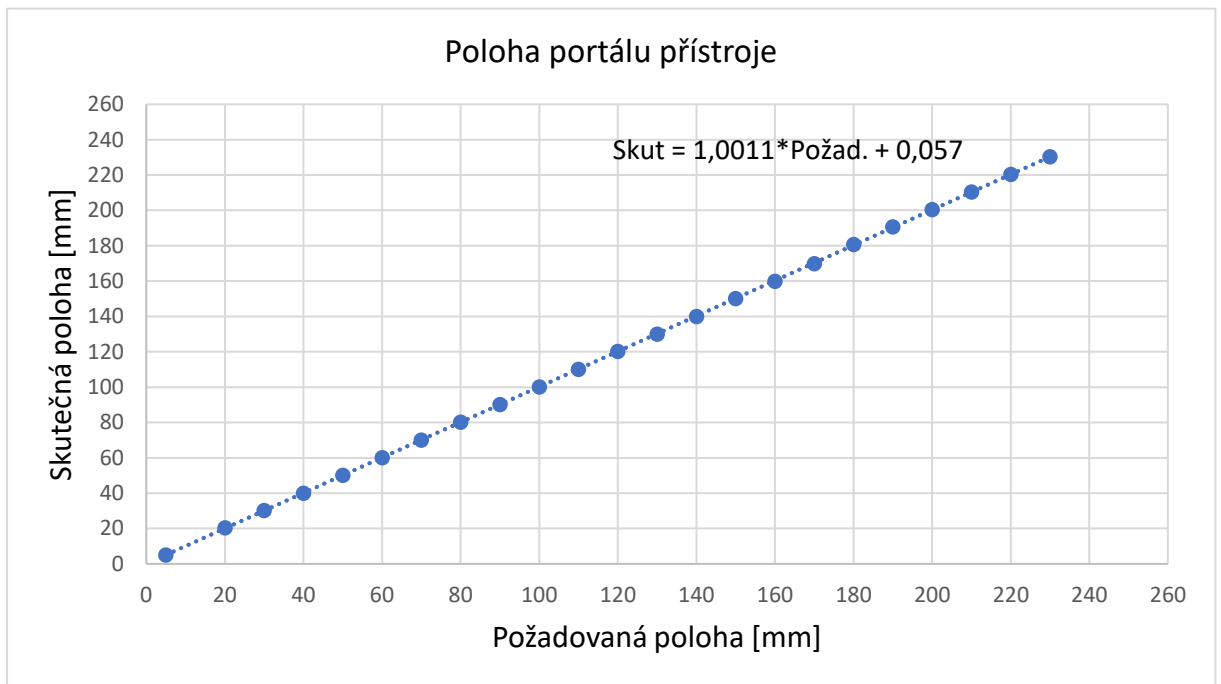
Vývojový diagram programu



Obrázek 26: Vývojový diagram

4.5 Výsledky a analýza měření

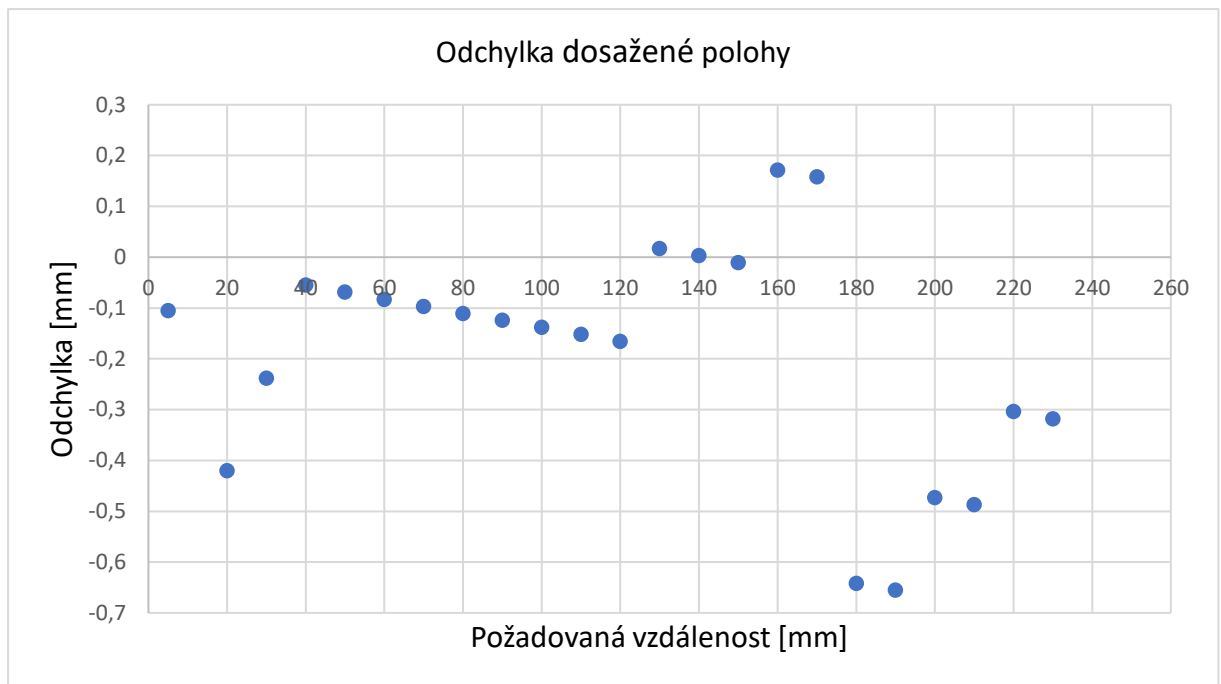
Testovací stanice má možnost provést měření až na vzdálenost 240 mm. Preciznost nastavení polohy, která je dána přesností enkodéru (počet pulzů na otáčku) je 0,4 mm. Dále je v programu zavedena hystereze motoru 0,5 mm, a to z důvodu včasné reakce mikrokontroleru pro vypnutí motoru. Maximální přípustná odchylka měření je tedy 0,9 mm na požadovanou vzdálenost. Maximální jmenovitý výkon LED je 10W a FV panelu 0,75 W.



Graf 1: Poloha portálu přístroje

Určení maximální odchylky nastavením vzdálenosti motorem lze porovnat pomocí rovnice 4. Rovnice popisuje velikost odchylky e_M v milimetrech a w představuje požadovanou vzdálenost a y dosaženou vzdálenost v milimetrech.

$$e_M = w - y \quad (4)$$



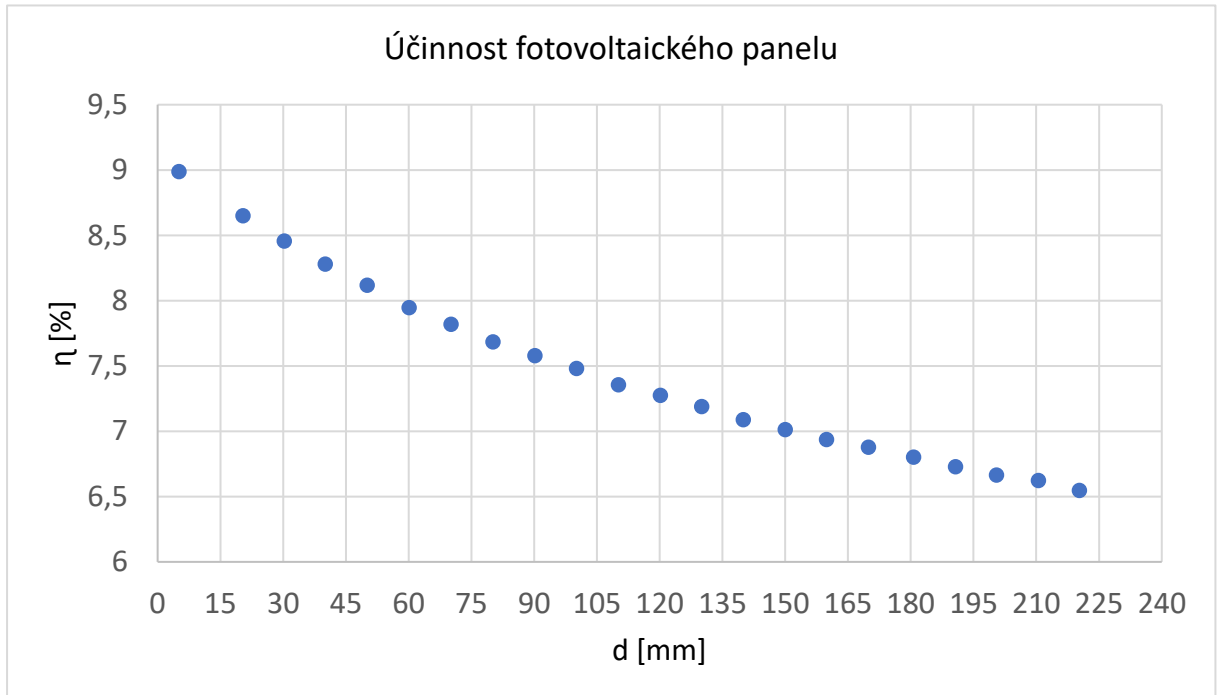
Graf 2: Odchylka dosažené polohy

Z grafu vyplývá, že nastavovací mechanismus po 23 měření způsobil maximální odchylku v hodnotě 0,655 milimetrů, což je stále v souladu s maximální přípustnou odchylkou 0,9 mm.

V grafu „Závislost účinnosti na vzdálenosti“ je vynesena průběh, který je podstatou těchto měření. Jde o závislost účinnosti na vzdálenosti, tudíž jak moc vzdálenost ovlivní dopadající výkon a kolik z vysílaného výkonu LED opravdu panel pohltí. Je potřeba zahrnout, že měření je ovlivněno vnějším osvětlením jiných umělých světelných zdrojů, ale také slunečním zářením.

Měření je realizováno při maximálním výkonu LED, což je přibližně 10 W ($U_{LED} = 10,564$ a $I_{LED} = 924,8$ mA). Počáteční účinnost panelu při 9% se rovná 0,9 W ($U_{FV} = 5,791$ V a $I_{FV} = 151$ mA) při 23 °C. Konečná účinnost 6,5% odpovídá 0,67 W ($U_{FV} = 4,854$ V a $I_{FV} = 138,4$ mA)

Z měření vyplývá, že posuv pouze o 10 mm zapříčiní velký pokles účinnosti, který se sníží přibližně o 0,3%. Při vzdálenosti 225 mm pak účinnost klesá o 2,5%.



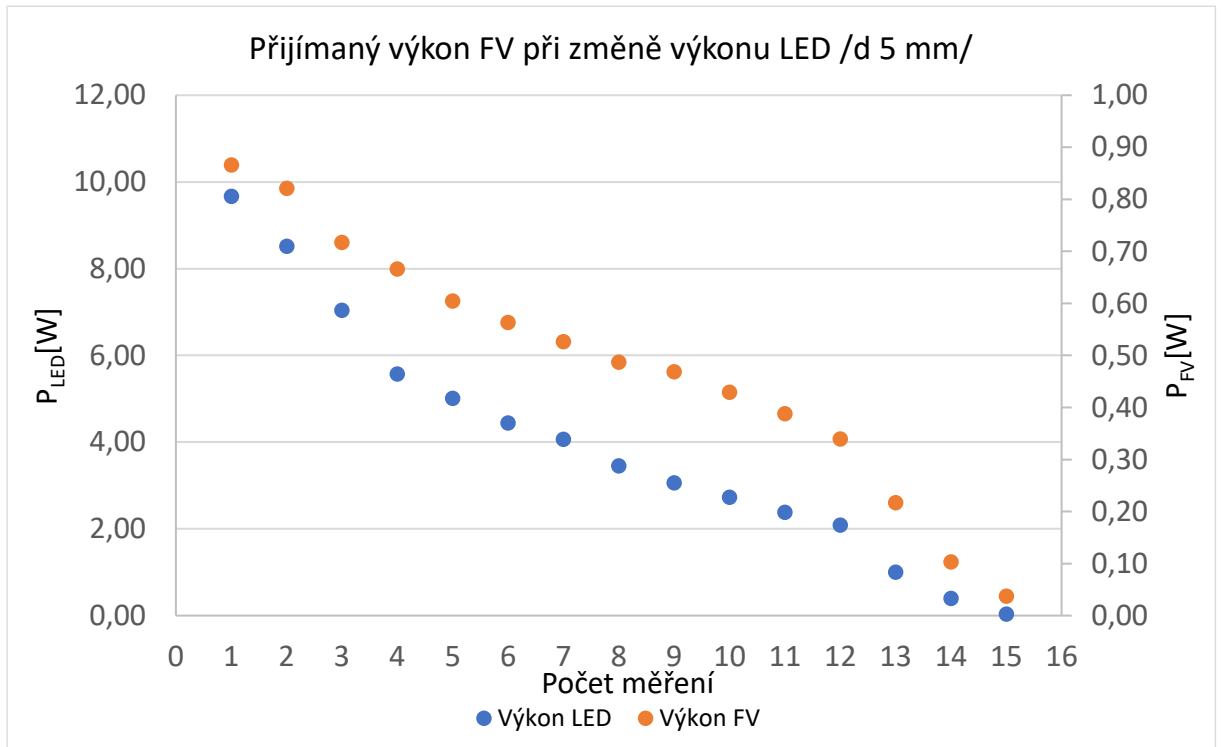
Graf 3: Účinnost fotovoltaického panelu

Pro získání reálného vlivu LED zdroje na FV panel bylo zapotřebí realizovat měření výkonu FV panelu a změně výkonu LED při vzdálenosti 5 mm a okolní teplotě 23,5 °C. Pro určení účinnosti samotného panelu je zapotřebí znát jeho nominální výkon (0,75W). První měření ukazuje, že účinnost panelu je 116% ($U_{FV} = 5,82$ V, $I_{FV} = 148$ mA) a to při maximálním výkonu LED (9,7 W a vzdálenosti 5 mm). Ačkoliv jmenovitý výkon výrobcem je dán pouze 0,75. To může být ovlivněno kvalitou součástek a okolní teplotou při měření.

$$\text{Účinnost} = \left(\frac{\text{Aktuální výkon}}{\text{Jmenovitý výkon}} \right) \times 100 \quad (5)$$

Ztráta výkonu FV panelu je nejvíce viditelná v rozmezí 3 (7,04 W) a 12 měření (2,08 W). Zde dochází k rozdílu výkonu LED o 5 W, tudíž o 50%. Rozdíl výkonu panelu je 0,38 W a dojde k poklesu o 52,78%.

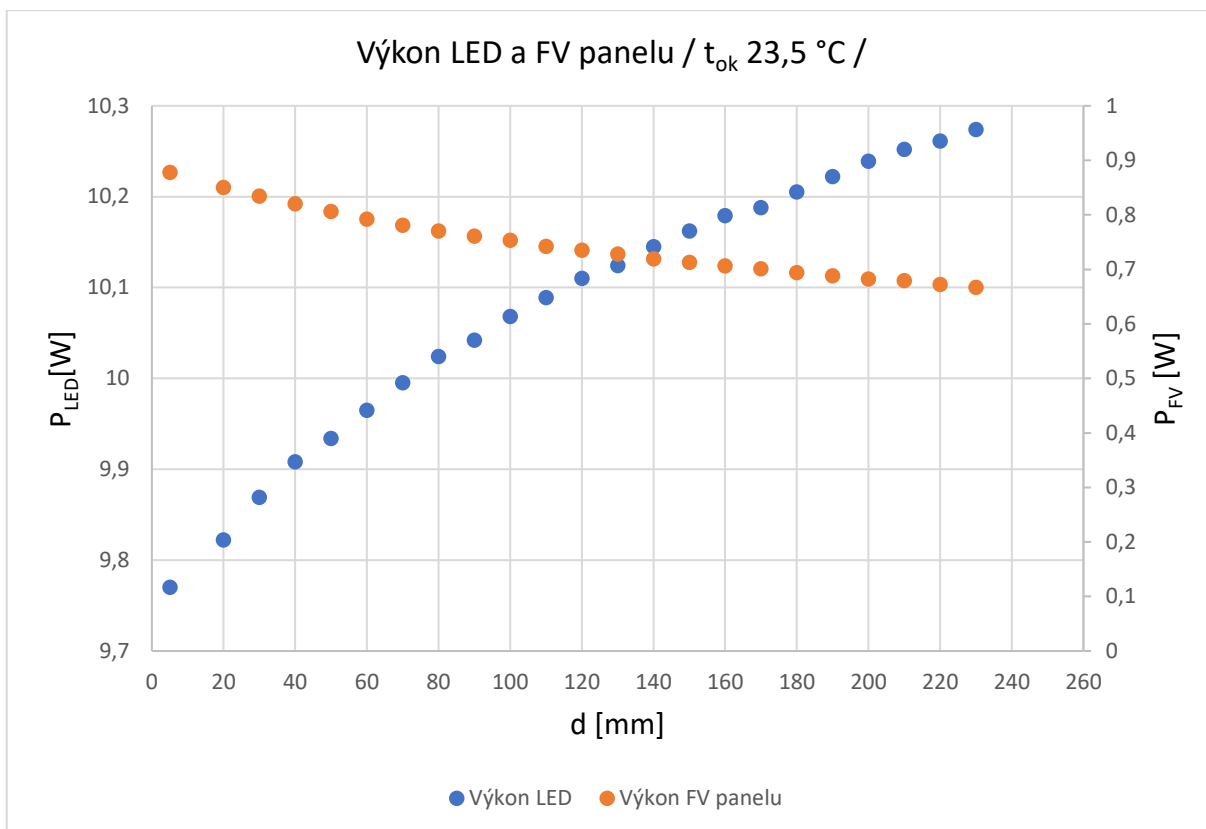
Měření 15 zobrazuje výkon FV panelu při vypnuté LED. Výkon dosahuje 0,04 W, a to díky intenzitě světla okolního prostředí. Proto je možné říci, že okolní prostředí ovlivní měřený výkon FV panelu pouze minimálně.



Graf 4: Přijímaný výkon FV při změně výkonu LED /d 5 mm/

Dalším podstatným měřením byla analýza vztahu mezi výkonem solárního panelu a okolní teplotou. Při proměnlivé okolní teplotě dochází k změnám vodivosti P-N přechodů uvnitř solárních článků. Tato vodivost se zvyšuje s rostoucí teplotou a snižuje s klesající teplotou. Taková změna vodivosti může významně ovlivnit výkon FV panelu a tím i jeho efektivitu. Měření této závislosti je důležité pro pochopení chování solárního systému v různých klimatických podmínkách a pro optimalizaci jeho výkonu a účinnosti. Pro zjištění výsledku měření bylo první měření realizováno při pokojových teplotách 23,5 °C a druhé při 11 °C. Rozdíl teplot tedy byl 12,5 °C.

Z měření realizovaném při okolní teplotě 23,5 °C je zřetelné, že jednotlivé křivky výkonů jsou posunuty na osách y nahoru. Tedy výkon je vyšší (vyšší vodivost), nežli při okolní teplotě 11 °C. Pro porovnání dat je zde ukázka výsledných rozdílů výkonu.



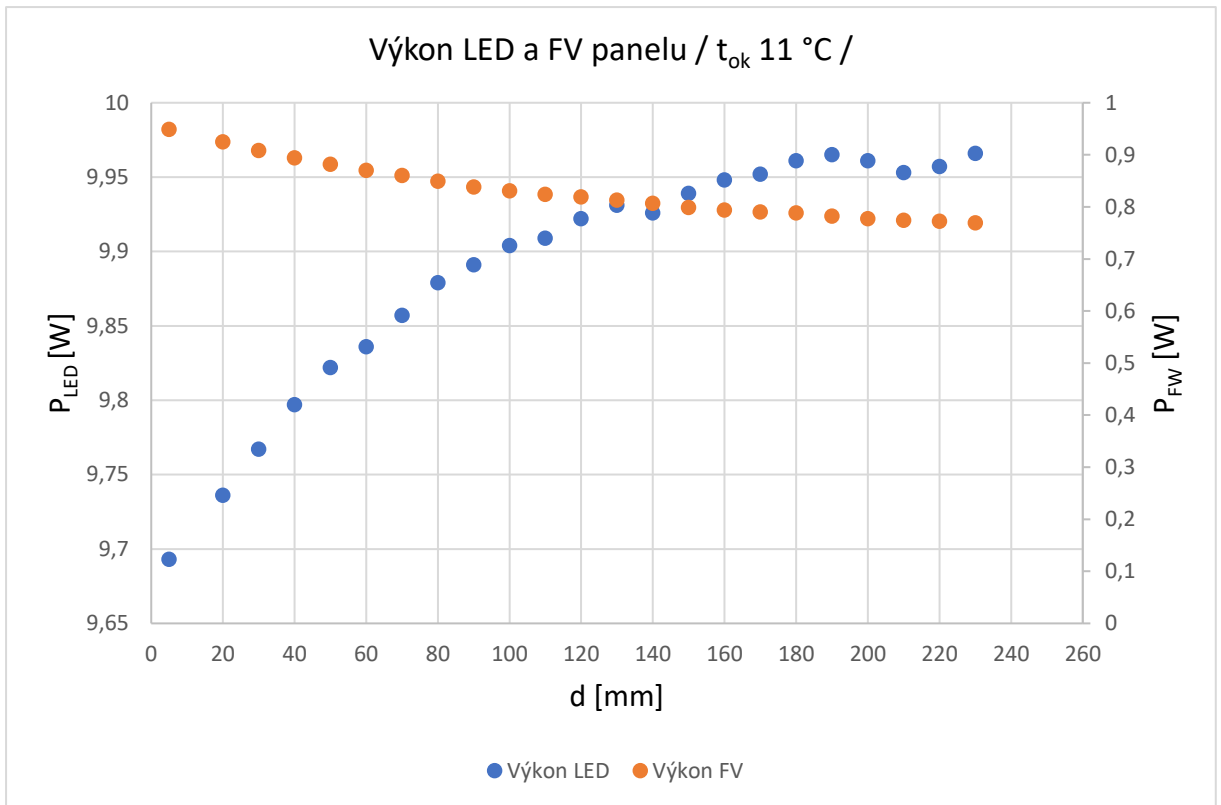
Graf 5: Výkon LED a FV panelu / $t_{ok} 23,5 \text{ °C}$ /

Tabulka 5: Rozdíl výkonů při odlišné teplotě

Setpoint [mm]	80	90	100	110	120	130	140	150	160
Rozdíl [W]	0,145	0,151	0,164	0,18	0,188	0,193	0,219	0,223	0,231

Z tabulky je patrné, že rozdíl okolní teploty způsobí velký propad účinnosti panelu. Průměr rozdílů výkonů při 23 měření je 0,190271 W, které vychází z rovnice 6.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^n x(j)}{n} \quad (6)$$



Graf 6: Výkon LED a FV panelu / t_{ok} 11 °C /

5 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo realizovat měřicí elektronickou jednotku pro testování a měření technických parametrů malých fotovoltaických panelů, v rámci provádění laboratorních experimentů.

3D model měřicího přístroje byl realizován v 3D software "Designspark Mechanical 6.0", na jehož základě byla realizována konstrukce v reálné podobě s podporou 3D tisku. Při realizaci 3D tisku byl použit materiál PETG, který je určen pro výrobu technických modelů, díky svým vlastnostem. Testovací stanice se skládá z řídicí elektroniky s mikroprocesorem, z konstrukce posuvného mechanismu ovládaného stejnosměrným motorem, fotovoltaickým panelem a zdrojem světla.

Program byl vyvinut v prostředí "Arduino IDE" a sestaven v programovacím jazyce C. Tento program běží na mikrokontroléru ESP32, který provádí celkový sběr dat, řízení komunikace, ovládání motoru a světelného zdroje LED. Dále umožňuje přístup k datům přes lokální webový server a zajišťuje jeho programovou obsluhu.

Mezi hlavní měřené parametry byly vybrány elektrické vlastnosti fotovoltaického panelu, napětí a proud fotovoltaického panelu, napětí a proud LED, dále je měřena okolní teplota panelu a vzdálenost mezi LED a fotovoltaickým panelem. Na základě naměřených hodnot proudu a napětí je následně vypočten výkon LED a fotovoltaického panelu, který slouží k výpočtu účinnosti stanice.

Výsledky měření ukázaly, že měřicí stanice je schopna provádět měření, a to s maximální odchylkou $\pm 0,9$ mm na požadovanou vzdálenost. Časový interval měření při vzdálenostech 10-100 mm odpovídá 48 sekundám. Vozík s posuvným mechanismem se pohybuje rychlostí 6,6 mm/s a zvládne realizovat měření až do 240 mm. Jas LED je možné programově ovládat pomocí PWM s rozlišením 8 bitů.

Celkově lze konstatovat, že testovací stanice splňuje požadavky na provádění laboratorních experimentů zaměřených na základní parametry fotovoltaických panelů.

Budoucí modifikace laboratorního přístroje

V hardwarové oblasti by bylo vhodné implementovat mechanismus pro automatické měření náklonu panelu pomocí motoru a enkodéru. Dále je možné zvýšit množství získaných dat vytvořením odporové zatěžovací jednotky pro získání V-A charakteristiky. A následně upravit uspořádání elektroniky a případně vytvořit ochrannou krabičku, což by mohlo posílit spolehlivost celého systému.

U softwaru je možná optimalizace lokálního serveru, aby umožňoval automatické obnovení stránky po obnovení dat (nevyužíval 3s pevně nastavený interval). Vylepšení grafického designu a organizace informací by také přispělo k atraktivnosti uživatelského rozhraní. Dále by mohla být přidána funkce exportu dat ve formě strukturovaného textu, tabulky, což by případným uživatelům usnadnilo ukládání a manipulaci s naměřenými daty, pro další analýzu, nebo prezentaci.

Tabulka 6: Parametry měřicí stanice

Parametry měřicí stanice	
Rozměry celkem (V x Š x H)	140 x 720 x 150 mm
Rozměry měřicí stanice (V x Š x H)	123 x 505 x 126 mm
Rozměry destičky pro řídicí elektroniku (V x Š x H)	15 x 114 x 108 mm
Rozpětí měření	240 mm
Čas 1 měření (24 mm)	11 s
Maximální šířka FV panelu	75 mm
Čas 10 měření (10 - 100 mm)	48 s
Rychlost pojezdu	6,6 mm/s
Přesnost dosažení pozice	+/- 0,9 mm
Napájecí napětí	12 VDC
Řídicí napětí	3,3 VDC
Příkon	20 W
Regulace jasu	8 bit
Použité komunikační rozhraní	I2C, OneWire, WiFi
Materiál 3D modelů	PETG
Celkové parametry	Napětí FV panelu, proud FV panelu, napětí LED, proud LED, výkon FV panelu, výkon LED, účinnost, teplota
Použitá elektronika	ESP32, rotační enkodér, stejnosměrný motor, LED, teplotní čidlo, H-můstek, senzor napětí a proudu

POUŽITÁ LITERATURA

ASB, 2010. *Diagnostické metody fotovoltaických článků*. [online]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/fotovoltaika/diagnosticke-metody-fotovoltaickych-clanku>. [cit. 2024-05-14].

CNE, 2024. *Fotovoltaičné systémy pro výrobu elektřiny*. [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.cne.cz/fotovoltaične-systemy/uvod-do-fv-systemu/>.

ESP32, 2024 [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.hwkitchen.cz/esp32-devkitc-38pin-espwroom32-wifi-bt/>

ESP32-WROOM-32, 2023. [online]. [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf

Fotovoltaičný článek. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaičný_článek. [cit. 2024-05-14].

Fotovoltaičný panel [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: https://www.hadex.cz/g970d-fotovoltaičky-solarni-panel-mini-5v185ma-90x70mm/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=17937749015&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw88yxBhBWEiwA7cm6pUjQ6hs44sftBIwCYy134sQAW8DeCafJP10MY2CvRwUIC1FqTlksoBoCesUQ

H-můstek L298N. [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/877-arduino-h-mustek-pro-krokovy-motor-l298n-dual-h-most-dc.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw_e2wBhAEEiwAyFFFoxNhH2i7QpQjeymly1O5FLXbZHKpy12R0-tpx7C3e8Fv4Nxz1SkHdRoC7u8QAvD_BwE.

I2C INA3221 senzor napětí a proudu. [online] [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/3080-i2c-senzor-napeti-a-proudu-3kanalovy-ina3221.html>.

KOPUNEC, Vít, 2011. *Analytické metody solárních panelů a systémů*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie.

MATUŠKA, Tomáš, 2020. *Fotovoltaika - základy*. [online]. Dostupné z: https://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2020/04/AZE2-P6_FV_technologie.pdf. [cit. 2024-05-14].

MEKA, 2024. *TERMOGRAFIE FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN*. [online]. Dostupné z: <https://www.meka-chocen.cz/termografie-fotovoltaickych-elektraren.html>. [cit. 2024-05-14].

Photoelectric effect. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect. [cit. 2024-05-14].

Pico Technology, 2024. *I2C serial bus decoding*. [online]. Dostupné z: <https://www.picotech.com/library/oscilloscopes/serial-protocol-decoding-i2c>. [cit. 2024-05-14].

PUBLI, 2024. *Testování životnosti fotovoltaických systémů*. [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/05.html>. [cit. 2024-05-15].

REMOTE-LAB GYMKT, 2024. *Zatěžovací charakteristika solárního článku*. [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <http://remote-lab.fyzika.net/experiment/10/experiment-10-teorie.php?lng=cs>.

SKUPINA ČEZ, 2024. *Solární (fotovoltaické) články*. [online]. [cit. 2024-05-14]. ČEZ, A. S. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>.

Sonda DS18B20 [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://pajtech.cz/sonda-ds18b20-maxim-teplotn-idlo-kryt-to92-p-8812.html>.

TZB-ENERG, 2024. *Měření fotovoltaiky kamerou*. [online]. Dostupné z: <https://www.tzb-energ.cz/mereni-fotovoltaiky.html>. [cit. 2024-05-14].

TZBINFO, 2014. *Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaice*. [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaice>.

TZBINFO, 2024. *Detekce vad u fotovoltaických panelů*. Online. EICERO S.R.O. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/18366-detekce-vad-u-fotovoltaickych-panelu>. [cit. 2024-05-15].

URGOŠÍK, Bohuš, 1981, *Fyzika / Bohuš Uργοšík. 1. vyd.* Praha : Státní nakladatelství technické literatury. 291 s. : il., tab., grafy (Polytechnická knihnice II. řada Příručky ;) ISBN:(váz.).

Zephyr, 2024. *I-Wire Bus.* [online]. Dostupné z: <https://docs.zephyrproject.org/latest/hardware/peripherals/w1.html>. [cit. 2024-05-14].

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A 3D Model stanice

Příloha B 3D Model stanice-pohled zezadu

Příloha C 3D Model desky pro řídicí elektroniku

Příloha D Popis modelu měřicí stanice

Příloha E Popis modelu desky řídicí jednotky

Příloha F Elektrické schéma senzoru napětí a proudu

Příloha G Elektrické schéma h-můstku, čidla teploty a enkodéru

Příloha H Ukázka grafického webového rozhraní

Příloha I Závislost dosažené polohy na požadované

Příloha J Graf – odchylka dosažené polohy

Příloha K Graf – závislost účinnosti na vzdálenosti

Příloha L Graf – přijímaný výkon FV při změně výkonu LED a vzdálenosti 5 mm

Příloha M Graf – průběhu výkonu LED a FV panelu při okolní teplotě 23,5 °C

Příloha N Graf – průběhu výkonu LED a FV panelu při okolní teplotě 11 °C

Příloha O Seznam dílů

