

**SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA
V NITRE
TECHNICKÁ FAKULTA**

TF-102467-74247

**IDENTIFIKÁCIA DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ
TERMOČLÁNKOV**

Diplomová práca

2024

Bc. Filip Galko

SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA
V NITRE
TECHNICKÁ FAKULTA

IDENTIFIKÁCIA DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ
TERMOČLÁNKOV

Diplomová práca

Študijný program:	Riadiace systémy vo výrobnéj technike
Študijný odbor:	Strojárstvo
Školiace pracovisko:	Ústav elektrotechniky, automatizácie, informatiky a fyziky
Vedúci záverečnej práce:	doc. Ing. Vladimír Cviklovič, PhD.
Konzultant:	doc. Ing. Vladimír Cviklovič, PhD.

Nitra, 2024

Bc. Filip Galko

Čestné vyhlásenie

Vyhlasujem, že predloženú záverečnú prácu som vypracoval samostatne. Všetky použité literárne zdroje som uviedol v zozname použitej literatúry.

.....

podpis študenta (autora)

Pod'akovanie

Touto cestou by som chcel vysloviť pod'akovanie vedúcemu bakalárskej práce a odbornému konzultantovi doc. Ing. Vladimírovi Cviklovičovi, PhD., za pomoc, odborné vedenie, cenné rady a pripomienky pri vypracovaní mojej práce. Taktiež ďakujem Slavomírovi Kunderlíkovi za odbornú konzultáciu, ochotu, užitočné pripomienky a pomoc pri vypracovaní praktickej časti diplomovej práce.

Abstrakt

Bc. GALKO, Filip: Identifikácia dynamických vlastností termočlánkov. [Diplomová práca]. Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre. Technická fakulta: Ústav elektrotechniky, automatizácie, informatiky a fyziky. Vedúci práce: doc. Ing. Vladimír Cviklovič, PhD. Stupeň odbornej kvalifikácie: Inžinier. Nitra : TF, 2024. Počet strán 107.

Cieľom práce je identifikácia vlastností termočlánkov ako napríklad SP1848-27145, ktoré získa funkčný merací systém. Tento systém riadi ESP32, ktorý je bezdrôtovo ovládaný počítačom. Aplikácia na ovládanie mikrokontroléra je vyvinutá v jazyku C# .net, komunikácia je zabezpečená pomocou Bluetooth serial. Vytvorený systém zaznamenáva podstatné informácie ako generované napätie termočlánkom v rôznych teplotných podmienkach. Napätie sa meria pomocou prevodníka ADS1115, teploty pomocou snímačov DS18B20, prúd a výkon sa počíta. Tieto informácie sa zobrazujú v aplikácii. Odtiaľ je možné exportovať grafy a čisté dáta, v prípade potreby pracovať s nimi ďalej.

Kľúčové slová: Termodiferenciálny článok, mikrokontrolér, meranie, Bluetooth, Seebeckov efekt

Abstract

The work aims to identify the characteristics of thermocouples such as SP1848-27145 to obtain a functional measurement system. This system is controlled by ESP32, wirelessly operated by a computer. The microcontroller control application is developed in C# .NET language, with communication secured via Bluetooth serial. The created system records essential information such as the voltage generated by the thermocouples under various temperature conditions. Voltage is measured using the ADS1115 converter, temperatures using DS18B20 sensors, and current and power are both computed. All information is displayed in the application, from which graphs and raw data can be exported for further processing if needed.

Key words: Thermoelectric module, microcontroller, measurement, Bluetooth, Seebeck effect

Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Názov záverečnej práce: Identifikácia dynamických vlastností termočlánkov

Označenie záverečnej práce: diplomová práca

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský

Anotácia (nepovinné): Cieľom práce bude zmerať a identifikovať dynamické vlastnosti termočlánkov na účely lepšieho pochopenia vplyvu tepelnej kapacity termočlánkov na odozvu snímača. Výstupom budú diferenciálne rovnice opisujúce dynamické vlastnosti v rôznych podmienkach.

Študent: Bc. Filip Galko

Fakulta: Technická fakulta

Študijný program: riadiace systémy vo výrobní technike

Študijný odbor: strojárstvo

Školiace pracovisko: Ústav elektrotechniky, automatizácie, informatiky a fyziky (TF)

Fakulta: Technická fakulta

Školiteľ: doc. Ing. Vladimír Cviklovič, PhD.

Konzultant:

Vedúci ústavu: doc. Ing. Ondrej Lukáč, PhD.

Osoba zodpovedná za študijný program: prof. Ing. Zuzana Palková, PhD.

Dátum schválenia: 21. 12. 2022

.....
podpis osoby zodpovednej za študijný program

Obsah

Zoznam skratiek a značiek.....	10
Úvod.....	13
1 Energia a jej vlastnosti.....	14
1.1 Elektrické a neelektrické veličiny.....	15
1.2 Meracie zariadenia.....	23
1.3 Metódy merania elektrických veličín	26
1.4 Mikrokontrolér a mikroprocesor.....	28
1.5 Komunikácia.....	29
2 Cieľ práce.....	36
3 Metodika práce a metódy skúmania	37
3.1 Plánovanie a návrh konštrukcie	37
3.2 Charakteristika použitých prístrojov a materiálov.....	42
4 Výsledky práce	47
4.1 Zhotovenie konštrukcie.....	47
4.2 Osadenie a zapojenie súčiastok.....	53
4.3 Program pre ESP32.....	57
4.4 Počítačový program a aplikácia.....	59
4.5 Nastavenie základných podmienok	62
4.6 Postup pri meraní	68
4.7 Výsledky merania prvého termočlánku pri 50 °C	71
4.8 Výsledky merania prvého termočlánku pri 80 °C	74
4.9 Výsledky merania druhého termočlánku pri 50 °C	76
4.10 Výsledky merania druhého termočlánku pri 80 °C	79
4.11 Výsledky merania tretieho termočlánku pri 50 °C	81

4.12 Výsledky merania tretieho termočlánku pri 80 °C	84
4.13 Výsledky merania neznámeho termočlánku pri 80 °C	86
4.14 Výsledky merania veličín termočlánku pri rozdieloch teplôt	89
5 Diskusia	95
Záver	97
Zoznam použitej literatúry	98
Prílohy.....	104

Zoznam skratiek a značiek

1U	veľkostný typ servera
Ω	jednotka odporu
A	ampér
AD	Analog to digital, prevodník analógového signálu na digitálny
ADS1115	typ AD prevodníka
AOD4184A	doska obsahujúca mosfety
a pod.	a podobne
baud	jednotka pre rýchlosť prenosu dát
baud rate	signálna rýchlosť
bit	základná jednotka informácie
BLE	Bluetooth Low Energy, Bluetooth s nízkou spotrebou energie
C# .NET	programovací jazyk
CPU	central processing unit - procesor
$\cos\varphi$	pomer činného výkonu k zdanlivému výkonu
DC	jednosmerný prúd
DC jack	typ elektrického konektora
DMIPS	Dhrystone Million Instructions Per Second, milión inštrukcií za sekundu
DS18B20	snímač teploty
et al.	a iní
EN	Enable, povoliť alebo zapnúť
ESP32	typ mikrokontroléra
FDM	Fused Deposition Modeling, Modelovanie fúznym ukladaním filamentu
FHSS	Frequency-hopping spread Spectrum, technika bezdrôtovej komunikácie
GHz	jednotka frekvencie
GPS	Global Positioning System, satelitný navigačný systém
I2C	Inter-Integrated Circuit, komunikačný protokol

I	elektrický prúd
IoDPoT	Identification of dynamic properties of thermocouples
J	joul, jednotka napätia
kHz	jednotka frekvencie v kilohertzoch
ρ	merný odpor
l	dĺžka
LED	Light Emitting Diode, dióda emitujúca svetlo
M	merací rozsah
mAH	jednotka kapacity v miliampér-hodinách
ms	milisekunda
M2, M3, M4	veľkostný typ závit
Mbps	Megabit per second, prenosová rýchlosť dát
MG955	Typ servomotora
MHz	jednotka frekvencie v megahertzoch
MISO	Master In Slave Out, výstup z sekundárneho zariadenia a vstup pre hlavné zariadenie
mm	jednotka dĺžky v milimetroch
MOSI	Master Out Slave In, výstup z hlavného zariadenia a vstup pre sekundárne zariadenie
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, tranzistor
mW	jednotka výkonu v miliwattoch
OneWire	typ zbernice určená na komunikáciu
ot/min	otáčky za minútu
P	elektrický výkon
PLA filament	polylactic acid, kyselina polymliečna
Ps	výkon striedavého elektrického prúdu
Q	jalový výkon

R	elektrický odpor
RAM resp.	Random Access Memory - operačná pamäť respektíve
ROM	Read Only Memory - permanentná pamäť
s.	strana
S	prierez
Sústava SI	medzinárodný štandard jednotiek
SCL	sériová hodinová linka
SCLK	Serial Clock, sériové hodiny
SDA	sériová dátová linka
$\sin\varphi$	sínus fázového posunu
SPI	Serial Peripheral Interface, sériové periférne rozhranie
SS	Slave select, výber sekundárneho zariadenia
TEC	termoelektrický chladič
TEG	termoelektrický generátor
TEM	termoelektrický modul
T-slot	drážka profilu v tvare písmena T
U	elektrické napätie
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter protokol
USB	Universal Serial Bus, Univerzálna sériová zbernica
USB-C	konektorový štandard USB
V	volt
VA	voltampér
VAr	reaktančný voltampér
W	watt
Wi-Fi	Wireless Fidelity, bezdrôtová internetová sieť
WLAN	Wireless Local Area Network, bezdrôtová lokálna sieť
WPAN	Wireless Personal Area Network, bezdrôtová osobná sieť

Úvod

Meranie ako proces s následným vyhodnotením je súčasťou vedy a techniky v mnohých oblastiach. Vznikol nám priestor inšpirovaný snahou a motiváciou prostredníctvom vlastného zariadenia a výskumného merania prispieť k získaniu špecifickejších informácií, ktoré výrobca neuvádza. Svoju pozornosť sme zamerali na oblasť elektroniky, presnejšie skúmanie termočlánkov a ich vlastností. Inšpirovali sme sa našou predchádzajúcou bakalárskou prácou, v ktorej sme rozobrali základy spomenutej problematiky. V porovnaní so súčasným cieľom sme vtedy merali výkon termočlánkov pri nízkych teplotách, ktoré sa nám nepodarilo zaznamenávať. Nemali sme vhodne prispôsobenú konštrukciu a absentovali snímače teploty. Preto nás v súčasnom výskume viedla snaha posunúť sa v skúmanej oblasti k presnejším záverom vďaka informáciám a poznatkom získaným počas štúdia, čím sme dospeli k možným vylepšeniam.

Prvotnou myšlienkou bol “akýsi” merací systém, ktorý by dokázal zaznamenávať hodnoty termočlánkov. Od začiatku bola veľmi malá možnosť oprieť sa pri konštruovaní meracieho systému o voľne dostupný návod alebo postup, ako taký systém navrhnúť a skonštruovať. Našou motiváciou bola vízia, ktorú sme chceli naplniť. Túto myšlienku sme rozvinuli a pokúsili sme sa zložiť variabilnejší systém, ktorý by bol praktický a použiteľný pre náš výskum. **Cieľom práce** sa teda stal merací systém, jednoduchý svojím ovládaním, pričom by spĺňal naše kritériá. Stanovili sme si, že hodnoty a veličiny by mali byť presne merané aj pri vyšších teplotách. Podmienkou možnej efektivity a variability bol prvok praktického vloženia a vybratia termoelektrického článku bez demontáže celého meracieho systému; zároveň by sme stále zachovali možnosť toto meracie zariadenie demontovať. **Význam** tejto práce a celého nášho výskumu možno vložiť do snahy získať informácie o reálnom výkone termočlánkov pri určitej statickej záťaži. Pri zachovaní rovnakých podmienok merania sa budeme snažiť o výstupné množstvo dát, ktoré by malo byť rovnaké (unifikované), i keď predpokladáme, že priebehy meraní ukážu odlišnosť medzi jednotlivými článkami.

Vychádzajúc z výroku, že “*zlepšiť možno iba to, čo sa dá **merat***” môžeme uviesť, že pri použití presnejšieho meracieho systému vieme ponúknuť lepší prehľad dynamických vlastností termoelektrických článkov.

1 Energia a jej vlastnosti

Energiu definuje energetický slovník ako schopnosť vykonávať prácu (Javys.sk). Takmer také isté vysvetlenie tohto termínu uvádza aj Slovník cudzích slov, ktorý hovorí o schopnosti vykonávať určitú prácu (Aktuality.sk).

Energia môže mať rôznu **formu**, čiže môže byť napr. kinetická, potenciálna, tepelná, jadrová, elektrická a iná. Medzinárodnou **jednotkou** energie je joule [J].

Energia má význam nielen v spojení s elektrotechnikou ale aj fyzikou, mechanikou a mnohými ďalšími oblasťami. Vybíral (2016) ju opisuje ako jednu z najvýznamnejších skalárnych veličín. Do fyziky sa tento pojem dostal neskôr. Stalo sa to až vtedy, keď v prvej polovici 19. storočia významným spôsobom prispeli k rozvoju termodynamiky vedecké poznatky. V roku 1842 zostavil prvú všeobecnú formuláciu zákona o zachovaní energie lekár Julius Robert von Mayer, ktorá ale bola široká, nepresná a neurčitá. Až experiment J.P. Joula v roku 1845, spájajúci tepelnú fyziku a mechaniku, začal formovať zákon o zachovaní energie. Zákon zachovania energie nám hovorí, že energiu nemožno vyrobiť ani zničiť, dá sa iba premeniť na iný druh energie (Zdráhal, 2015).

Primárna energia je forma energie, ktorá je prirodzene dostupná v prírode. Energia je neviditeľná, ale prejavuje sa pôsobením napr. vetra alebo svetla. Vlastnosti energie sa môžu meniť v závislosti od hmotnosti, rýchlosti, polohy, tvaru a pod.

Poznáme dva hlavné **druhy energie**,

- a) *kinetická* - je energiou objektu, relatívna k iným objektom v okolí, mení sa polohou objektu
- b) *potenciálna* - uložená v akomkoľvek objekte alebo systéme vzhľadom k polohe, nie je ovplyvnená vzduchom alebo výškou.

Môžu sa navzájom premieňať (Just Energy, 2020).

Existujú však aj rôzne **formy energie**, ktoré môžu byť premenené na iné formy. Patrí sem

- a) chemická
- b) elektrická
- c) mechanická

- d) termálna
- e) jadrová
- f) gravitačná

Energiu podľa **zdroja** delíme na dva typy:

- a) obnoviteľná
- b) neobnoviteľná

1.1 Elektrické a neelektrické veličiny

Fyzikálne veličiny sú definované špecifickými číselnými hodnotami spolu s príslušnými jednotkami, ktoré im dodávajú konkrétny význam v rámci daného merného systému. Tieto jednotky čerpajú zo širokej palety fyzikálnych vlastností, ako je dĺžka, hmotnosť, čas, teplo, energia a mnohé ďalšie. Pri pohľade na proces merania a dôkladnú analýzu týchto veličín je možné ich zaradiť do rôznych skupín: napätie, prúd, odpor, výkon a teplota.

Elektrická energia a **energia** vo forme iných fyzikálnych veličín predstavuje dva odlišné fyzikálne koncepty, ktoré sa líšia svojimi charakteristikami a povahou. Tieto pojmy zohrávajú kľúčovú úlohu pri vysvetľovaní a popise rôznych javov a vzťahov medzi nimi. Nadobúdajú význam v kontexte presných meraní, podrobných analýz a hlbšieho pochopenia prírodných či umelých systémov.

Medzinárodná sústava jednotiek SI je desatinná sústava váh a mier, ktorá je odvodená z metrického systému a rozširuje ho. Pozostáva zo siedmich základných jednotiek: sekunda, meter, kilogram, ampér, kelvin, mól, kandela.

Elektrické napätie, tiež označované ako rozdiel potenciálov medzi dvoma bodmi (Vobecký, Záhlava, 2005), reprezentuje určitý druh elektrického tlaku, ktorý usmerňuje pohyb elektrického náboja vo vodiči. Saini (2022) definuje napätie ako prácu alebo energiu, ktorá *“je potrebná na presun jednotkového náboja z jedného miesta na druhé v elektrickom obvode.”* To znamená, že napätie vyjadruje mieru potenciálnej energie, ktorá sa transformuje na kinetickú energiu náboja a umožňuje tak jeho pohyb cez vodič smerom k nižšiemu potenciálu.

Elektrický prúd je pohyb nosičov elektrického náboja, ktorý tvoria rôzne nabité častice, ako napríklad elektróny so záporným nábojom, protóny s kladným nábojom, ióny alebo diery (Javys.sk).

Určenie prúdu spočíva v riadenom pohybe nosičov náboja pod vplyvom elektrického poľa. Podľa Vobecký, Záhlava (2005) ide o to, koľko náboja prejde určitým prierezom za jednotku času. Tradične sa smer elektrického prúdu vedenia od miesta s vyšším potenciálom (kladný pól) k miestu s nižším potenciálom (záporný pól). No skutočný smer tohto prúdu je v skutočnosti určený smerom pohybu elektrónov, ktoré sa hýbu z oblasti s negatívnym nábojom smerom k oblasti s pozitívnym nábojom.

Elektrický odpor je vlastnosť látky, ktorá bráni voľnému toku elektrického prúdu. Keď sa elektróny pohybujú, dochádza k interakciám medzi elektrónmi a pevnými časticami, čo vedie k premene elektrickej energie na teplo. Teplota má tendenciu zvyšovať odpor v danej súčiastke alebo objekte. V praxi môžeme vytvoriť odpor pomocou zariadenia nazývaného rezistor. V diele Elektronika Vobecký, Záhlava (2005) spomína, že pre odpor vodiča platí vzťah:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} [\Omega] \quad (1)$$

Kde: l je dĺžka vodiča

ρ je merný elektrický odpor vodiča z homogénneho materiálu

S je prierez

Z tohto vzťahu vyplýva, že “odpor R sa zväčšuje s rastúcim merným odporom ρ a dĺžkou l a s klesajúcim prierezom S .” (Vobecký, Záhlava, 2005, s. 49).



Obrázok 1 odpor vodiča, zdroj informácií: Vobecký, Záhlava (2005)

V článku Resistance od Britannica autor uvádza, že “Prevrátená hodnota odporu, $1/R$, sa nazýva vodivosť a vyjadruje sa v jednotkách recipročných ohmov, nazývaných mho” (Curley, 2024).

Elektrický, jalový a činný výkon

“Pretože napätie (U) udáva prácu na náboj a prúd (I) udáva náboj za čas, je výsledkom súčinu napätia a prúdu **výkon**” (Vobecký, Záhlava, 2005, s. 29).

Elektrický výkon jednosmerného elektrického prúdu a napätia pri súhlasne zvolených kladných smeroch elektrického napätia U a elektrického prúdu I je daný vzťahom $P = U \cdot I$. Základnou jednotkou elektrického (jednosmerného) výkonu je jeden watt [W] (Javys.sk).

Elektrický výkon striedavého elektrického prúdu a napätia je daný vzťahom

$$P_s = U \cdot I \cdot \cos \varphi + \varphi \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

kde prvá časť vzťahu predstavuje tzv. činný výkon [W], druhá časť je tzv. jalový výkon [VAr] a celkový elektrický výkon sa tiež označuje ako zdanlivý výkon [VA] (Elektrolab, 2023).

Jalový elektrický výkon je jednou zo zložiek zdanlivého výkonu. Jeho jednotkou je reaktančný voltampér [VAr] a je to výkon, ktorý sa zúčastňuje na vytváraní magnetického poľa. Vypočítame ho podľa vzorca:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (3)$$

kde je Q [VAr] jalový výkon, U [V] elektrické napätie, I [A] intenzita elektrického prúdu a $\sin \varphi$ sínus fázového posunu medzi efektívnymi hodnotami prúdu a napätia (Javy.sk).

Činný elektrický výkon je ďalšou zo zložiek zdanlivého výkonu. Jeho jednotkou je watt [W] a je to výkon, ktorý sa nevratne premení na inú užitočnú formu energie alebo tepla. Vypočítame ho podľa vzorca:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (4)$$

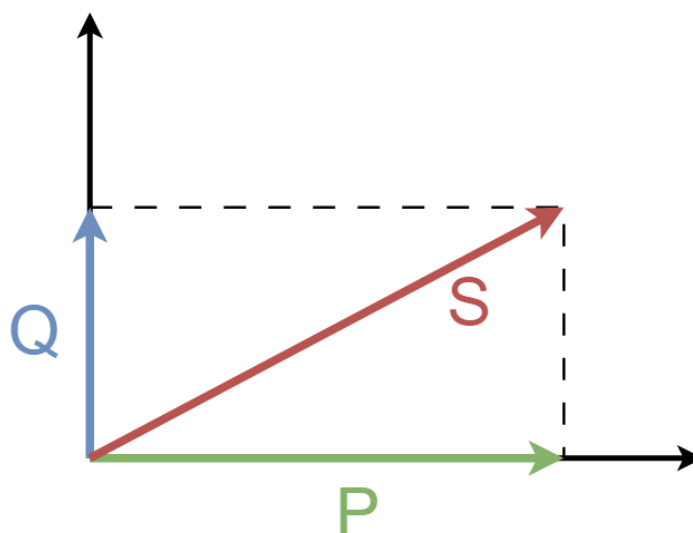
kde je P [W] činný výkon a $\cos \varphi$ pomer činného výkonu k zdanlivému výkonu (Javys.sk).

Zdanlivý elektrický výkon, ako sme spomenuli vyššie, sa skladá z dvoch zložiek (obrázok 2). Prvou zložkou je jalový výkon a druhou činný výkon. Zdanlivý výkon, rovnako ako aj

obe jeho zložky, je súčinom napätia a prúdu. Môžeme ho nazvať celkovým výkonom, pretože ide o súčin oboch vyššie spomenutých zložiek. (fei.stuba.sk, 2015).

Označujeme ho ako S , jeho jednotkou je voltampér (VA). Vzorec pre výpočet zdanlivého elektrického výkonu (Javys.sk) je:

$$S = U \cdot I \quad (5)$$



Obrázok 2 Zdanlivý elektrický výkon v obvodoch, zdroj informácií: fei.stuba.sk, 2015

Teplo

Teplo, presnejšie vnútorná energia látky, je forma energie daná neusporiadaným pohybom atómov a molekúl. Jednotkou tepla je jeden joule [J] (Javys.sk).

Tepelná energia je spojená s pohybom (vibráciou a rotáciou) molekúl. Pohyb je však chaotický a premeniť tento druh energie na iný je ťažšie než napríklad pri mechanickej energii (Javys.sk).

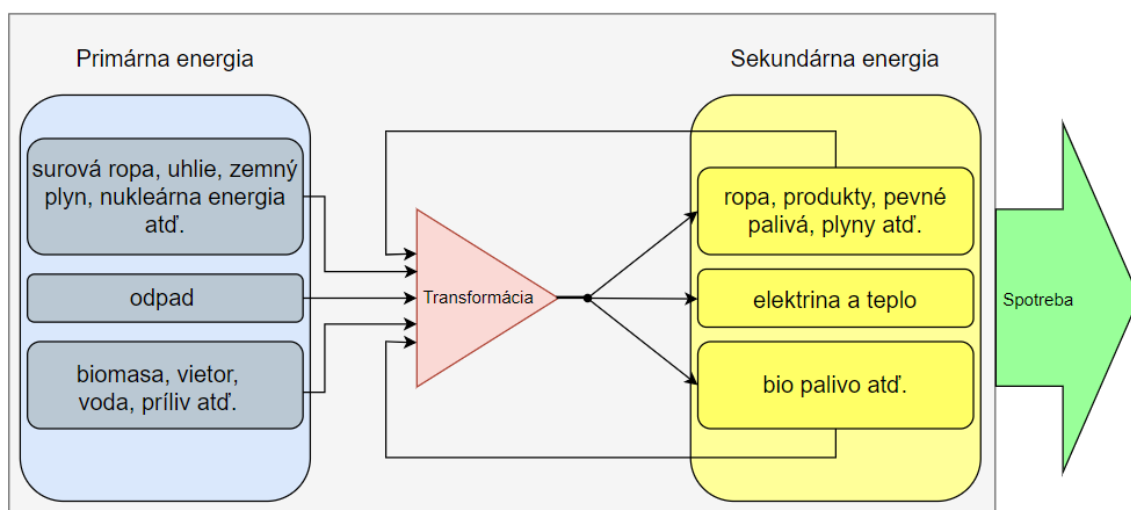
Výroba energie je premena (konverzia) primárnej energie na elektrinu (resp. teplo), ktorá sa ďalej prenáša na konečné použitie. V elektroenergetike je tento pojem bežne zavedený v zmysle výroba elektrickej energie či výroba tepla. Energia primárneho zdroja prejde radou transformácií počas jej transportu, až sa na konci celého reťazca transformuje na užitočnú energiu. V mieste spotreby sa následne elektrická energia mení na požadovanú formu (sle.sk) energie (mechanickú, svetelnú, tepelnú...).

Zdroje energie môžeme rozdeliť do troch hlavných skupín (Obrázok 3):

Primárna energia zahŕňa surové zdroje, ktoré ešte nie sú pripravené na použitie. Sem patrí napríklad uhlie, surová ropa, zemný plyn, urán, slnečné žiarenie a vietor. Tieto zdroje predstavujú prvý bod energetického systému.

Sekundárna (koncová) energia je forma energie, ktorá je prenášaná alebo dodávaná priamo ku konečnému užívateľovi. Medzi tieto zdroje patrí benzín, ropa a elektrina. Tieto formy energie sú pripravené na bežnú spotrebu a použitie.

Užitočná energia (obrázok 3) je forma energie, ktorá je využívaná koncovým užívateľom v jej konečnej, užitočnej forme. Môže zahŕňať svetlo na osvetlenie a teplo na vykurovanie. Sú to výsledné formy energie (Bartošovičová, 2016).



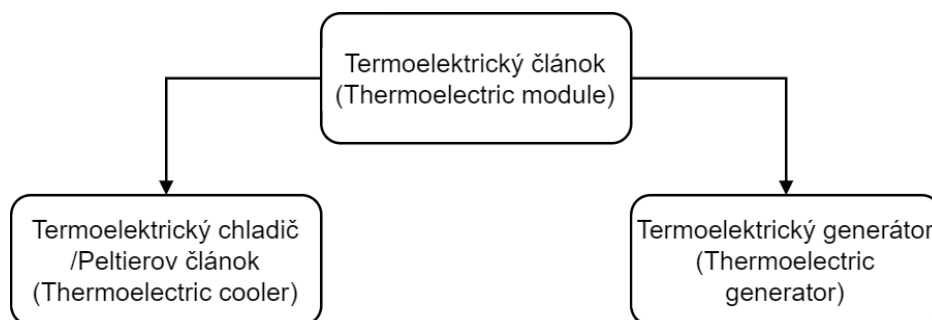
Obrázok 3 Primárna a sekundárna energia, zdroj informácií: Bartošovičová, 2016

Zdroje energie podľa využitia delíme na:

- 1) Tradičné a alternatívne
- 2) Neobnoviteľné a obnoviteľné

Často sa pojmy “alternatívne zdroje” zamieňajú a považujú sa za “obnoviteľné”. Podobne tak “tradičné” sú zamieňané s považované za “neobnoviteľné” zdroje. Avšak existuje medzi nimi podstatný rozdiel. Pojem alternatívny zdroj znamená jednoducho iný spôsob získavania energie oproti tradičným metódam, ktoré sme doteraz používali. (Bartošovičová, 2016).

Termoelektrický článok (Obrázok 4) je elektrická súčiastka bez pohyblivých častí. Toto zariadenie funguje na princípe efektu termoelektrického javu (Gromov, 2002). Ako už z názvu vyplýva, tento jav spája tepelnú energiu s elektrickou energiou.



Obrázok 4 Rozdelenie termoelektrických modulov, zdroj informácií: Gromov, 2002

Jeden z efektov termodiferenciálneho článku spočíva vo vzniku určitých teplôt v polovodičových materiáloch v dôsledku prechodu elektrickej energie (napätia a prúdu). Teplota na jednej strane článku bude vyššia ako okolitá teplota. To znamená, že keď privedieme nízkonapäťový jednosmerný prúd na termoelektrický modul (TEM), dochádza k prenosu tepla cez modul z jednej strany na druhú (Javys.sk). V dôsledku toho sa jedna strana modulu ochladzuje, zatiaľ čo druhá strana sa súčasne zahrieva.

Tritt v kapitole 1.2 uvádza, že “Premena termoelektrickej energie využíva Peltierovo teplo generované pri prechode elektrického prúdu cez termoelektrický materiál na zabezpečenie teplotného gradientu, pričom teplo je absorbované na studenej strane, prenášané cez (alebo čerpané) termoelektrickými materiálmi a odvádzané v dreze, čím sa poskytuje schopnosť chladenia.” (2002, s. 2). Môžeme povedať, že toto teplo sa akoby prenáša z jednej strany na druhú (Schéma 1).

Termoelektrický modul je zložený z viacerých prvkov polovodičového materiálu typu “N” a “P”. Elektricky sú zapojené do série, pričom tepelne sú zapojené paralelne. Ak v polovodiči máme prímesový prvok, ktorý má o jeden valenčný elektrón viac ako atómy v základnom polovodiči, vznikne **polovodič typu N**.

V prípade, že prímesový prvok v polovodiči má o jeden elektrón menej, dominuje dierová vodivosť. Materiál, pre ktorý je charakteristická prevažujúca dierová vodivosť, nazývame **polovodič typu P** (Ayodele, 2024). Dva typy polovodičov “N” a “P” sú umiestnené medzi ploché keramické substráty, napríklad nitrid hliníka. Keramické substráty tvoria konštrukciu, ktorá drží polovodičový materiál spolu a zároveň izolujú jednotlivé prvky od

seba a od vonkajších povrchov. Keramická plocha môže mať rôzny tvar, to znamená, že môže byť vytvorená podľa potreby danej aplikácie. Najčastejším tvarom keramickej plochy býva štvorec.

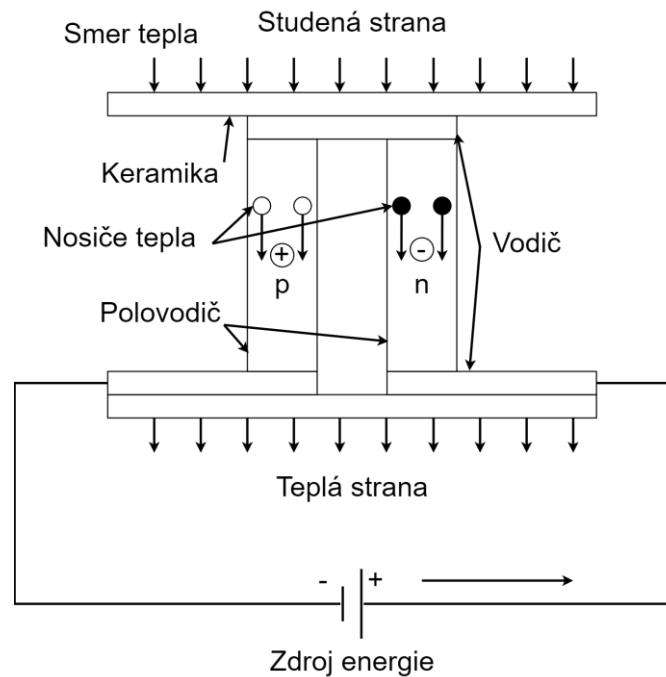


Schéma 1 Termoelektrický článok v zapojení chladiča, zdroj informácií: Ayodele, 2024

Vyššie uvedená schéma znázorňuje klasické zapojenie termodiferenciálneho článku v obvode. Proces zapojenia môže byť zmenený tým, že otočíme polaritu zdroja. Zmena polaritý aplikovaného jednosmerného napätia spôsobí opačný smer prenosu tepla (Schéma 2). Preto môže byť termoelektrický modul využitý nielen na ohrev, ale aj na chladenie jednej strany bez nutnosti fyzického otočenia článku. V oboch prípadoch ide o Peltierov efekt.

Peltierov jav spočíva v schopnosti chladiť jednu časť materiálu a zároveň ohrievať druhú časť materiálu, ako sme spomenuli už vyššie, keď vodičom prechádza elektrický prúd. Pri použití rôznych typov materiálov sa môže zvýšiť účinnosť Peltierovho javu. Augustyn (2024) uvádza, že tento jav bol objavený francúzskym fyzikom Jean-Charles-Athanase Peltierom v roku 1834.

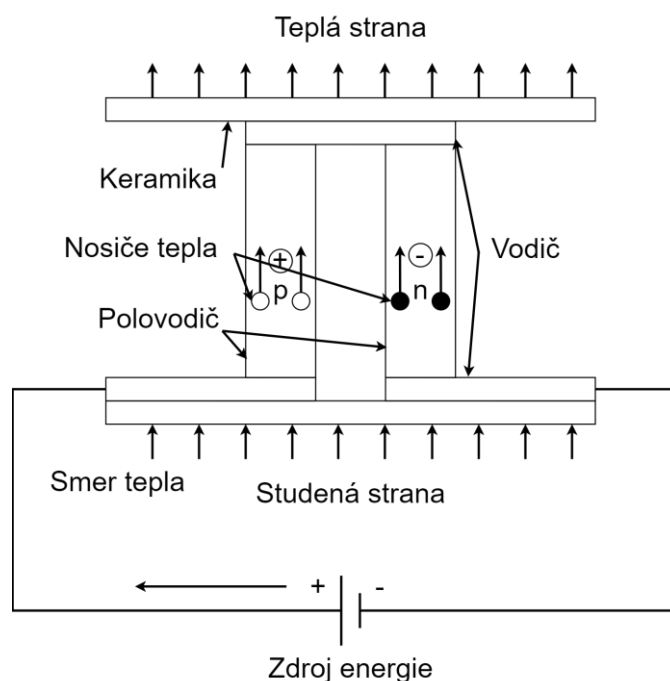


Schéma 2 Termoelektrický článok v reverznom zapojení chladiča, zdroj informácií: Ayodele, 2024

Termoelektrický jav je v článku reverzibilný podobne ako niektoré elektrické javy v súčiastkach a komponentoch. Teplotný rozdiel, ktorý je aplikovaný na termoelektrický článok, transformuje tento rozdiel tepla na elektrickú energiu jednosmerného prúdu. Túto vlastnosť vieme využiť ako snímač teploty či teplotného rozdielu (Schéma 3). Tento jav nazývame ako **Seebeckov efekt**.

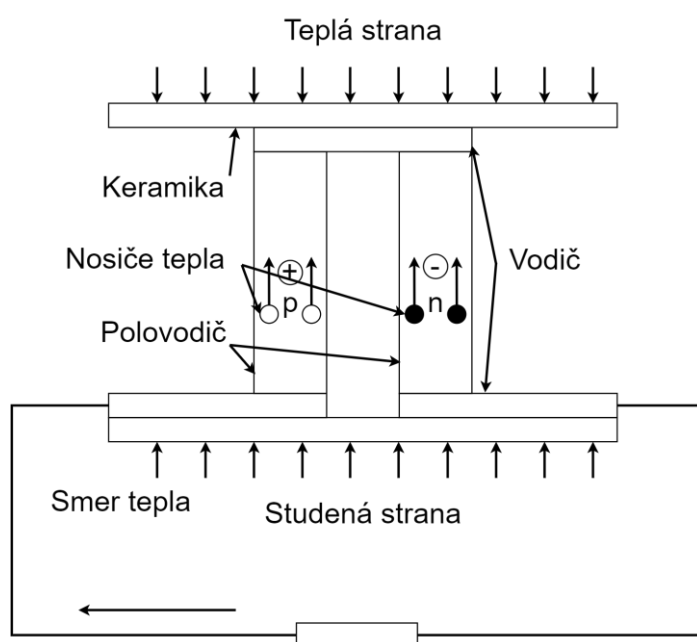


Schéma 3 Termoelektrický článok v zapojení generátora, zdroj informácií: Ayodele, 2024

Ako **výhody** termoelektrických článkov by sme mohli uviesť, že sú bez pohyblivých častí, prebiehajú v nich rýchle zmeny teplôt a princíp ich konštrukcie je pomerne jednoduchý. Ďalej ako výhodu môžeme vziať do úvahy možnosť zostrojenia pevnej alebo ohybnej (flexibilnej) plochy. Ďalšou výhodou je nielen ich reverzibilita, ale i možnosť otočenia polarít napájania.

K **nevýhodám** môžeme zaradiť nízku účinnosť termoelektrického článku oproti iným možnostiam vyhrievacích alebo chladiacich systémov. Ďalej za nevýhodu môžeme považovať fakt, že termoelektrické články sú vhodné len pre vyhrievanie alebo chladenie telies menších objemov. Pre najoptimálnejšie efektívne využitie článku je potrebné pracovať v určitom rozsahu teplôt, čo sa stáva ďalšou nevýhodou. V neposlednom rade je to aj jednotková cena, ktorá je pomerne vysoká.

Pre optimalizáciu a zvýšenie účinnosti termodiferenciálneho článku je potrebné zvoliť materiály s nízkou tepelnou a vysokou elektrickou vodivosťou (Rademann in Basudeb et al., 2016, s. 89-114). S týmto súvisí Ohmov zákon, z ktorého si môžeme vyvodit' závislosť menšej straty energie od nižšieho odporu zdroja (termoelektrického článku). Odpor sa mení s teplotou a preto je dôležité vybrať materiál, ktorý má najnižší odpor v danom rozsahu teplôt.

1.2 Meracie zariadenia

Mojžiš opisuje **meranie** ako „proces zberu, prenosu a spracovania informácie o meranej veličine s cieľom získať kvantitatívny výsledok jej porovnaním so zvolenou stupnicou, alebo jednotkou veličiny v tvare vhodnom pre ďalšie použitie človekom, alebo strojom.“ (2011, s. 8) Podľa neho je to najobširnejšia a najpresnejšia definícia merania. Kollár definuje meranie ako “súhrn činností (experimentálnych operácií) na určenie hodnoty veličiny v daných jednotkách” (2013, s. 49).

Keďže meranie predstavuje neoddeliteľnú charakteristiku daného fyzikálneho javu, objektu či materiálu, získame ním presné kvantifikácie veličín. Tým nám meranie poskytuje dôležité údaje, ktoré nám umožňujú hlbšie porozumieť a analyzovať charakteristiky a správanie sa týchto javov a objektov. Daný proces je kľúčový pre rôzne oblasti vedy a techniky. Ide o určovanie otáčok, rýchlosti, tlaku, teploty a vlhkosti.

Proces merania môže byť manuálny alebo automatický. Pri **manuálnom meraní** sledujeme a priamo zisťujeme nameranú hodnotu použitím meracieho prístroja. Zo zaznamenaných hodnôt, ktoré nám meradlá ukazujú, môžeme nastaviť regulačné prvky (ventily alebo odpory) na požadovaný stav.

V prípade **automatického merania** sú regulačné prvky priamo riadené meracím snímačom alebo systémom, ktorý ovplyvňuje zariadenie. Iný automatický merací systém, prijímajúci signál zo snímača, priamo riadi výkonové prvky a tým tento systém ďalej nepriamo ovláda zariadenie.

Meranie je pojem, s ktorým sa stretávame aj často v spojení s elektrotechnikou. Sú to základné techniky a procesy, ktoré sa používajú na zisťovanie hodnôt elektrických veličín. Na získanie hodnôt neelektrických veličín môžeme použiť **prevodníky**. Využívajú sa na premenu fyzikálnych vlastností (teplota, tlak, prietok, sila a iné) na elektrické signály, s ktorými vieme už jednoduchšie pracovať (Hubinský, 2020).

Prostredníctvom merania troch základných veličín (napätie, prúd a výkon) vieme získať iné veličiny a dokážeme otestovať aj výkon niektorých elektrických súčiastok či elektronických obvodov. Meranie by malo čo najmenej alebo vôbec ovplyvňovať danú súčiastku či meranú časť (Bakshi, 2020).

Meracie prístroje elektrických veličín definuje Kollár ako prostriedky slúžiace na “*prevod meranej veličiny alebo niektorej veličiny s ňou súvisiacej, na údaj (indikáciu) alebo ekvivalentnú informáciu*” (2013, s. 50). Môžu byť **analogové** alebo **digitálne**.

Analogové meracie prístroje

V elektrotechnike nám **indikačné a analogové** meracie prístroje slúžia na vizualizáciu a meranie elektrických veličín. Používajú vychýľovací ukazovateľ alebo indikátor na zobrazenie hodnôt rôznych veličín, napríklad napätia. V prípade vychýľovacej ručičky tieto hodnoty odčítame od stupnice, ktorá sa nachádza za ukazovateľom. Príklady takýchto nástrojov zahŕňajú ampérmetre a voltmetre, ktoré umožňujú identifikáciu veľkosti elektrických veličín v obvode.

Tento typ meracích prístrojov nie je finančne nákladný a pomerne rýchlo dokáže reagovať na zmeny a zobraziť hodnotu meranej veličiny. Niektoré meracie prístroje nepotrebujú vlastný zdroj energie pre svoju funkčnosť. Nevýhodou analogových meracích prístrojov

býva ich nižšia presnosť súvisiaca s tým, že na výslednú hodnotu vplýva ľudský faktor pri odčítavaní údajov zo stupnice. Pri analógových meracích prístrojoch vznikajú veľké chyby pri meraniach neharmonických priebehov prúdu alebo napätia. Indikačné meracie prístroje (napr. elektromer) majú relatívne vysokú presnosť, pretože nameranú hodnotu priamo odčítame z indikátora.

Digitálne meracie zariadenia

Digitálne meracie prístroje transformujú meranú analógovú veličinu na diskretný číselný výstup, čím poskytujú presnejšie výstupy pre užívateľa vo forme digitálnych hodnôt. Tieto prístroje pracujú na princípe kvantovania. Kvantovacie kroky definujú rozsah hodnôt, ktoré je možné zmerať a reprezentovať pomocou týchto prístrojov.

Digitálne meracie systémy poskytujú vyššiu presnosť a opakovateľnosť meraní v porovnaní s analógovými systémami. Tým umožňujú efektívnejšie využitie získaných dát pre vedu, priemysel a technológie v rôznych aplikáciách. Nevýhodou týchto meracích prístrojov je ich finančná nákladnosť a pomalšie reagovanie na vstupné zmeny oproti analógovým meracím prístrojom. Práca s digitálnymi prístrojmi je menej komplikovaná a má ďalšie výhody, ku ktorým patrí jednoduchšie odčítanie dát z displeja zariadenia, nastavenie rôznych funkcií, napríklad hold (podržanie aktuálnej hodnoty), relative (nastavenie aktuálnej hodnoty ako referenčnej nuly) a pod.

Merací rozsah je maximálna hodnota, ktorú môže dosiahnuť meraná veličina počas merania. Tento parameter je vyjadrený v jednotkách, ktoré sú charakteristické pre daný typ meranej veličiny, napríklad volt (V), ampér (A) a pod. Označujeme ho symbolom M. Na kryte meracieho prístroja alebo priamo na jeho stupnici je zvyčajne uvedený merací rozsah. Niektoré prístroje majú len jeden fixný merací rozsah, čo obmedzuje ich použiteľnosť. Naopak, iné prístroje disponujú viacerými rozsahmi, čím sa umožňuje meranie rôznych úrovní veličín s rôznymi maximálnymi hodnotami.

Pri meraní je dôležité zvoliť merací rozsah, ktorý zodpovedá očakávaným hodnotám meranej veličiny. Meranie v príliš veľkom rozsahu môže viesť k nepresným alebo nepoužiteľným výsledkom. V opačnom prípade meranie v príliš malom rozsahu môže spôsobiť prekročenie tejto hranice, čo môže viesť k poškodeniu meracieho zariadenia (Harangozo, 2008).

1.3 Metódy merania elektrických veličín

V procese merania sa využívajú rôzne metódy merania elektrických veličín. Kollár meráciu metódu špecifikuje ako “*všeobecný súhrn praktických a teoretických operácií použitých pri meraní podľa daného princípu*” (2013, s. 51). Výber vhodnej metódy je závislý od požadovanej presnosti merania a akceptovateľnej (prípustnej) chyby. Pri meraniach s vysokou presnosťou sa preferujú zložitejšie metódy a presnejšie nástroje, zatiaľ čo pri väčšej tolerancii chýb sa uprednostňujú jednoduchšie a lacnejšie metódy merania. Mahto (2016) uvádza rozdelenie metód merania elektrických veličín do 10 kategórií.

- a) **Priama metóda** umožňuje získať hodnotu meraného množstva priamo, bez potreby akýchkoľvek výpočtov. Podobne Kollár (2013) dopĺňa, že je funkčne viazaná s meranou veličinou. Zahŕňa napríklad váženie, použitie posuvných meradiel, mikrometrov a pod., je často využívaná v priemyselnom prostredí. Jej presnosť je však obmedzená ľudskou subjektivitou pri rozhodovaní, čo môže ovplyvniť výsledky. Vykonáva sa porovnaním neznámeho množstva so štandardom, ale na dosiahnutie výsledkov nevyžaduje žiadne matematické výpočty.
- b) **Nepriama metóda** merania zisťuje hodnotu určitého parametra prostredníctvom jeho vzťahu s iným parametrom, ktorý je ľahšie merateľný. Pri tejto metóde nie sú vyžadované dodatočné výpočty alebo odhady na dosiahnutie konečnej hodnoty. Využíva sa podobne ako metóda priama pri meraniach v priemysle, napríklad pri meraní hladiny kvapaliny v nádržiach. Ak priame meranie nie je možné alebo je nepraktické, je táto metóda nepriameho merania efektívnym riešením. Pri priamom meraní sa meria to isté množstvo, ktoré je cieľom, zatiaľ čo nepriame meranie identifikuje iné merateľné množstvo a vypočítava požadovanú hodnotu.
- c) **Komparačná (porovnávací) metóda** merania je jedným zo starších a overených spôsobov zisťovania presnosti merania fyzikálnych veličín. Pri tejto metóde sa skúmaná veličina umiestni do rovnakých podmienok ako referenčný štandard a následne sa analyzujú ich hodnoty. Takto je možné vyhodnotiť odchýlku medzi meranou hodnotou a známou presnou hodnotou referenčného štandardu. Daná metóda je spoľahlivým nástrojom pri hodnotení presnosti meraní a zohľadňuje variácie v prostredí a podmienkach merania. Príkladom použitia je kalibrácia meracích nástrojov a zariadení (mikrometer, snímač tlaku).

- d) **Substitučná metóda** spočíva v nahradení sledovanej veličiny iným relevantným parametrom, ktorý je známy. V praxi sa táto technika využíva v prípadoch, kedy priame meranie nie je realizovateľné alebo nie je praktické. Substitučná stratégia nachádza uplatnenie najmä v priemyselných odvetviach, kde sa potrebujú zmerať veličiny nedostupné priamym spôsobom. Jedným z príkladov využitia substitučnej metódy je určovanie kapacity neznámeho kondenzátora (spočíva v meraní časovej konštanty obvodu RC a použitia známej hodnoty odporu).
- e) **Nulová metóda (Null method)** sa využíva na stanovenie hodnoty jednej veličiny tým, že zachytáva rozdiel medzi dvoma známymi veličinami. Používa sa v prípadoch, kedy priama metóda na meranie danej veličiny je náročná, no stanovenie rozdielu medzi dvoma meranými veličinami je pomerne jednoduché. Využíva sa v oblasti procesného a riadiaceho priemyslu na meranie veličín, ktoré je ťažké zmerať. Napríklad, keď chceme zmerať odpor, nulová metóda sa uplatní tak, že zmeriame neznámy odpor pomocou Wheatstonovho mostíka. Znamená to, že rozdiel medzi hodnotou meranej veličiny a známou hodnotou toho istého druhu, s ktorou je porovnávaná, sa blíži nule.
- f) **Základná metóda (Fundamental Method)**, ako uvádza Mahto (2016), ktorá závisí od merania základných veličín (času, hmotnosti, dĺžky a pod.) používaných na definovanie danej veličiny. Príkladom je meranie množstva priamo prostredníctvom meraní iných veličín, ktoré sú spojené s definovanou veličinou (meranie dĺžky pomocou definície metra založenej na rýchlosti svetla vo vákuu).
- g) **Transpozičná metóda (Transposition Method)** funguje na základe priameho porovnania. Počiatočnú hodnotu veličiny (napríklad hmotnosti) vyvážime známou hodnotou (A) tej istej veličiny. Po vyvážení nahradíme neznámu počiatočnú hodnotu známou hodnotou (B), znova ju vyvážime pomocou druhej známej hodnoty (B) tej istej veličiny. Ak poloha indikácie je v oboch prípadoch rovnaká, potom platí, že neznáma hodnota známej veličiny je rovná súčinu A a B.
- h) **Náhodná metóda (Coincidence Method)** je známa ako diferenciálna metóda. Jej princíp spočíva v odhalení veľmi jemného rozdielu medzi hodnotou meranej veličiny a jej referenčnou hodnotou. Príkladom môže byť meranie pomocou posuvného meradla alebo mikrometra, kde sa takýmto spôsobom získa presná informácia o veľmi malej odchýlke medzi meranou a referenčnou hodnotou.
- i) **Metóda vychýlenia (Deflection Method)** znamená, že ukazovateľ na kalibrovannej stupnici sa posúva a tým nám poskytuje informáciu o hodnote meranej veličiny.

Hodnota meranej veličiny je priamo vyčítaná z pozície na stupnici, na ktorú sa ukazovateľ posunul.

- j) V **doplňkovej metóde (Complementary Method)** sa hodnota, ktorú meriame, kombinuje s už známou hodnotou tej istej veličiny. Následne sa táto kombinácia upravuje tak, aby súčet oboch týchto hodnôt bol rovnaký ako hodnota, ktorú sme predtým určili ako porovnávaciu. Ide o proces, pri ktorom sa zisťuje napríklad objem pevnej látky tým, že sa kvapalina vytláča.

Kollár (2013) dopĺňa k týmto metódam ešte dve, **statickú** (porovnáva veličiny na základe merania vyvolávajúceho statický účinok) a **dynamickú** (založená na porovnávaní pri meraní, ktoré vyvoláva dynamický účinok).

Okrem všetkých vyššie uvedených metód uvádza Pavlovkin ešte dve a to **kompenzačnú** (veľkosť určitej systémovej vlastnosti neznámeho objektu určíme z jeho plného účinku získaného vyrovnaním energetických strát) a **rezonančnú** (veľkosť určitej systémovej vlastnosti neznámeho objektu určíme pri dosiahnutí harmónie účinku tohto objektu s účinkom súčasne pôsobiaceho objektu opačného druhu, v ktorom poznáme veľkosť tejto systémovej vlastnosti).

1.4 Mikrokontrolér a mikroprocesor

Proces zbierania informácií pri dlhodobom meraní viacerých veličín môže byť náročný najmä pri fyzickom zaznamenávaní hodnôt a zapisovaní dát. V tomto zmysle nám môže meranie uľahčiť použitie počítačového zariadenia, ktoré je schopné takmer nepretržite merať, počítať, premieňať a zapisovať množstvo údajov na ďalšie spracovanie. K týmto zariadeniam patrí aj mikrokontrolér.

Mikrokontrolér je komplexné zariadenie, jediný integrovaný obvod, ktorý zahŕňa **mikroprocesor** s funkciami vstupov, výstupov a pamäte. Tieto kompaktné a výkonné zariadenia sú v súčasnosti neoddeliteľnou súčasťou mnohých technologických aplikácií. Ich použitie sa rozšírilo od bežných domácich spotrebičov až po pokročilé zdravotnícke zariadenia a automatizované priemyselné systémy.

Mikroprocesor predstavuje centrálnu jednotku (CPU) v počítačovom systéme a obyčajne tvorí jadro, ktoré môže byť doplnené pamäťovým radičom a ďalšími časťami. V spojení s inými zariadeniami, ako sú pamäťové moduly (slúžiace na ukladanie dát aj programov),

pamäťové zariadenia a vstupno-výstupné periférie, umožňuje mikroprocesor vykonávať rôzne úlohy a procesy v počítači.

V **mikrokontroléroch** sú už integrované základné komponenty ako procesor (central processing unit - CPU), operačná pamäť (random access memory - RAM), permanentná pamäť (ROM) a vstupy/výstupy (I/O) do jedného čipu. Tieto časti spolu tvoria jadro mikroprocesora (Diagram 1), ktorého úlohou je vykonávať a riadiť rôzne úlohy spracovania informácií v elektronických zariadeniach (Wostl, 2019).

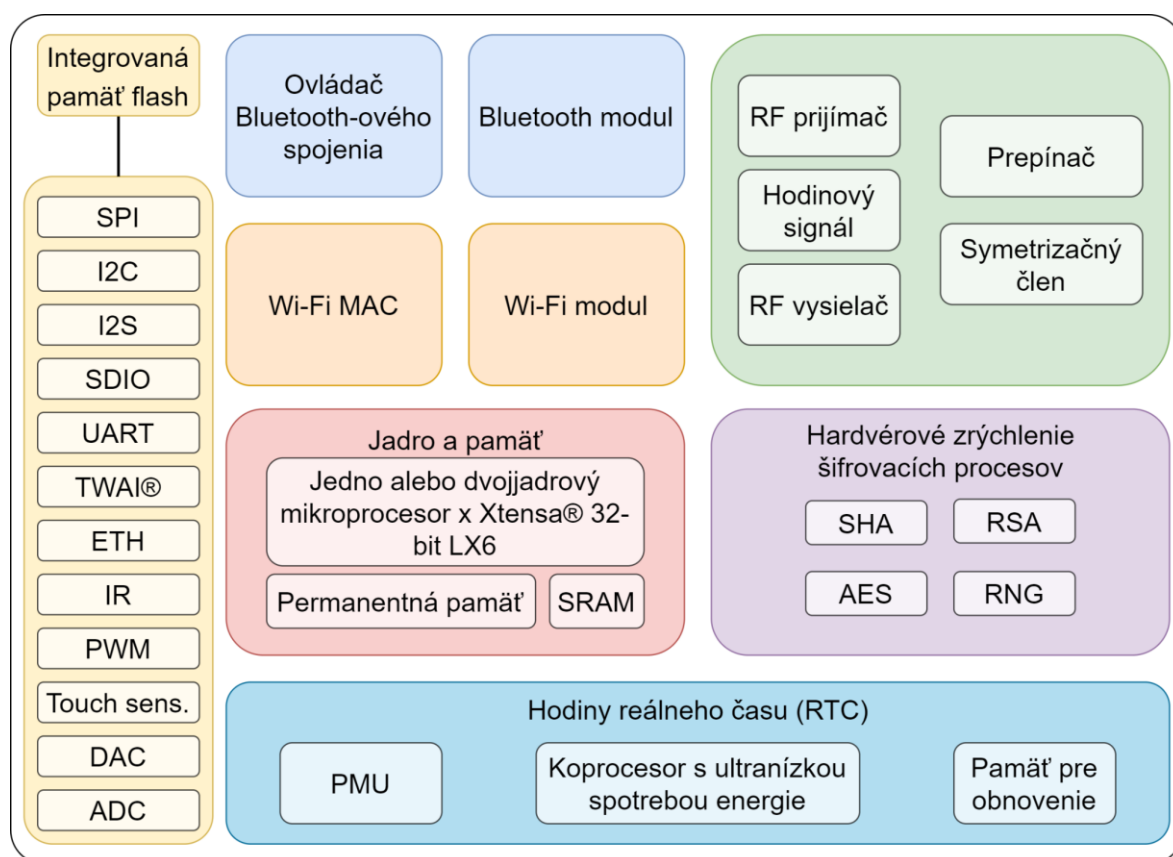


Diagram 1 Časti mikrokontroléra ESP32, zdroje informácií: Weller, 2016

1.5 Komunikácia

Prenos informácií medzi dvoma a viacerými zariadeniami za použitia vodičov alebo prenosového média (napríklad optické vlákno) je **drôtová komunikácia**. Umožňuje prenos údajov medzi rôznymi komponentmi alebo zariadeniami napríklad v oblasti mikrokontrolérov. Presun informácií vodičom medzi mikrokontrolérom, periférnymi zariadeniami a senzormi, je energeticky efektívne riešenie. Výhodou tohto typu komunikácie je aj jeho prenosová rýchlosť. Tá je závislá od počtu vodičov a typu komunikačného protokolu.

Pri práci s mikrokontrolérmi sa často používajú štandardné drôtové komunikačné protokoly, ktoré sa líšia vo svojich charakteristikách (rýchlosť, spoľahlivosť a implementačná zložitosť). Medzi najpoužívannejšie protokoly patrí SPI, I2C, UART.

Sériové periférne rozhranie (ďalej SPI) je využívané v integrovaných systémoch na krátke vzdialenosti. Umožňuje vytvoriť obojsmernú komunikáciu medzi hlavným (master) a vedľajším (slave) zariadením pri použití štyroch základných spojení (Schéma 4). MOSI (Master Out, Slave In) posielá dáta z mastera do slave zariadenia. MISO (Master In, Slave Out) funguje opačne, posielá dáta zo slave do master zariadenia. SCLK (Serial Clock) generuje hodinový signál, zabezpečujúci synchronizáciu komunikácie, a SS (Slave select) určuje, s ktorým slave zariadením master chce komunikovať (Abbas, 2023).

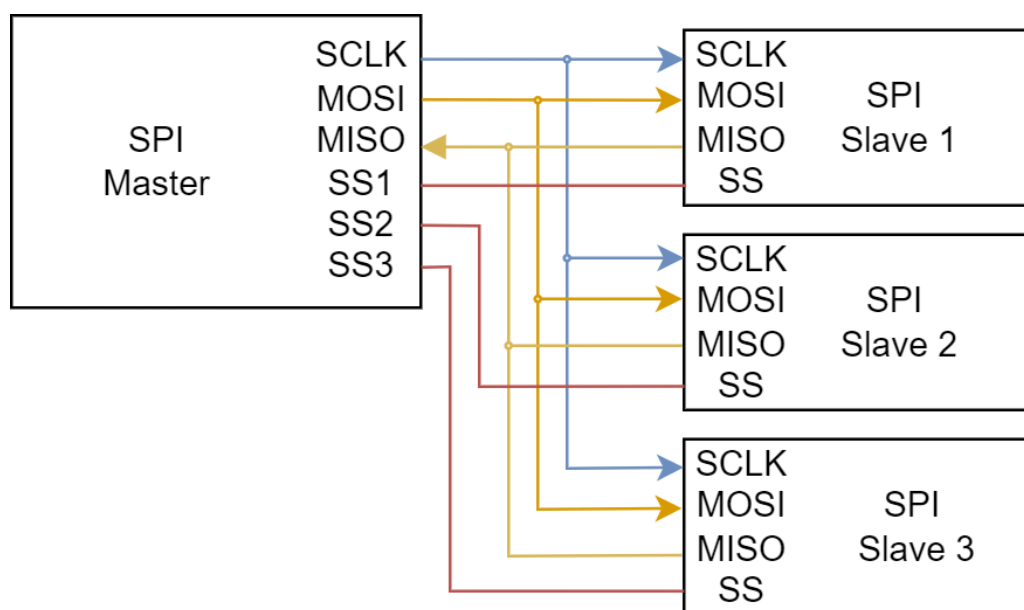


Schéma 4 Zapojenie SPI, zdroj informácií: Abbas, 2023

I2C je skratka pre Inter-Integrated Circuit, je **komunikačný protokol**. Jeho hlavným cieľom je umožniť komunikáciu medzi rôznymi typmi súčiastok iba na krátku vzdialenosť. Protokol využíva synchronizačný signál (hodinový signál) a umožňuje výmenu informácií medzi súčiastkami. Umožňuje ďalej existenciu viacerých master a slave zariadení na jednom spojení (komunikačnej linke), čo nám poskytuje viacero možností oproti SPI. Využíva dve obojsmerné linky - sériovú dátovú linku (SDA) a sériovú hodinovú linku (SCL), ktoré sú pripojené cez odporové spojenie, tzv. pull-up rezistory (Schéma 5). Zariadenia na zbernici môžu fungovať ako master alebo slave, čo prispieva k efektívnej komunikácii. V oblasti integrovaných systémov, kde je potrebná jednoduchosť a efektivita, je táto komunikácia vhodným riešením (Abbas, 2023).

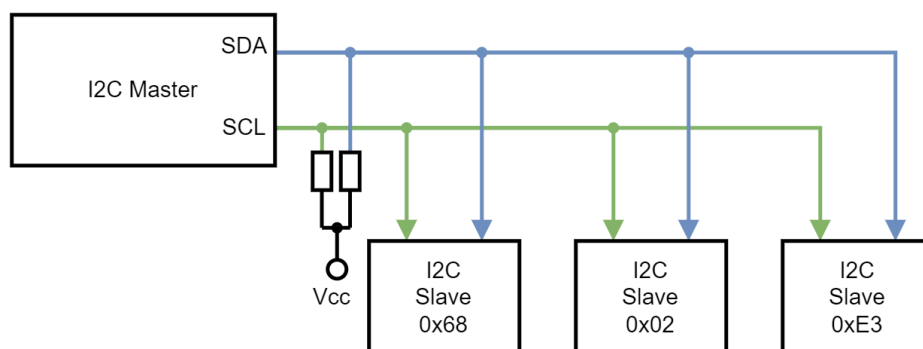


Schéma 5 Zapojenie I2C, zdroj informácií: Abbas, 2023

Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, označovaný ako **UART**, predstavuje jeden zo základných hardvérových komunikačných protokolov, ktorý sa široko využíva na asynchrónnu sériovú komunikáciu. Hlavným cieľom tohto protokolu je zabezpečiť spoľahlivé spojenie medzi mikrokontrolérmi a periférnymi zariadeniami, pričom uľahčuje výmenu údajov cez sériový prenos. V jadre UART spočíva schopnosť prevodu dátových bajtov z procesora na kontinuálny tok dát, ktoré sa následne sériovo prenášajú cez jedinú komunikačnú linku (Schéma 6). Podobným spôsobom sú prichádzajúce údaje konvertované opačným smerom, následne spracované prijímacím zariadením. Pri synchronizácii dát v porovnaní so synchronizovaným komunikačným protokolom UART nezávisí od zdieľaného hodinového signálu. Zároveň podporuje dĺžku 5 - 9 dátových bitov až do rýchlosti až 115 200 baudov. (Abbas, 2023).

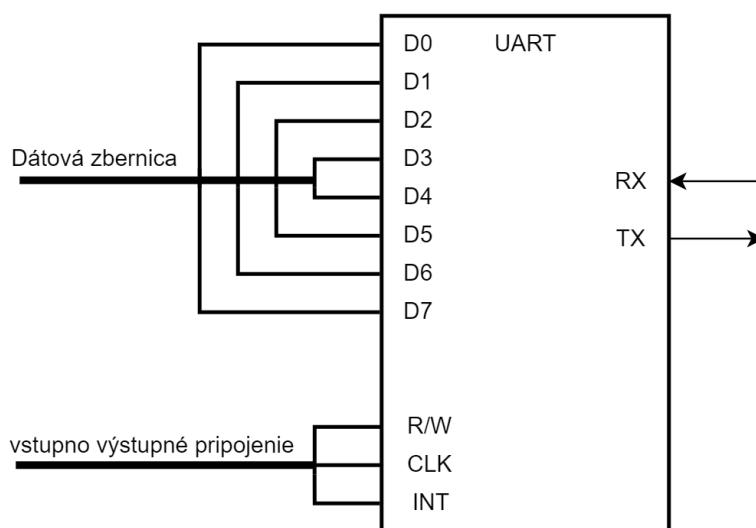
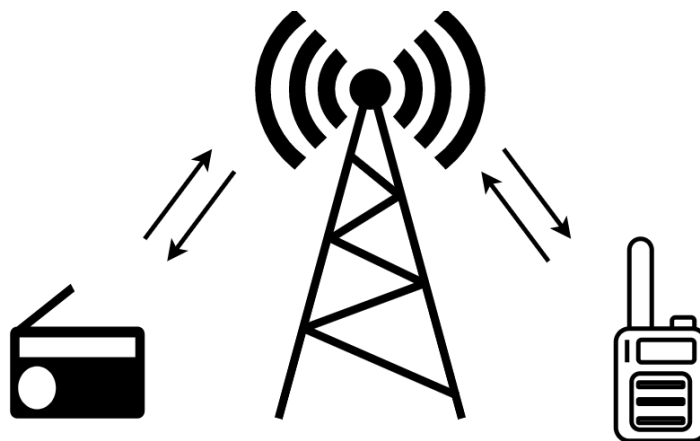


Schéma 6 Zapojenie UART, zdroj informácií: Abbas, 2023

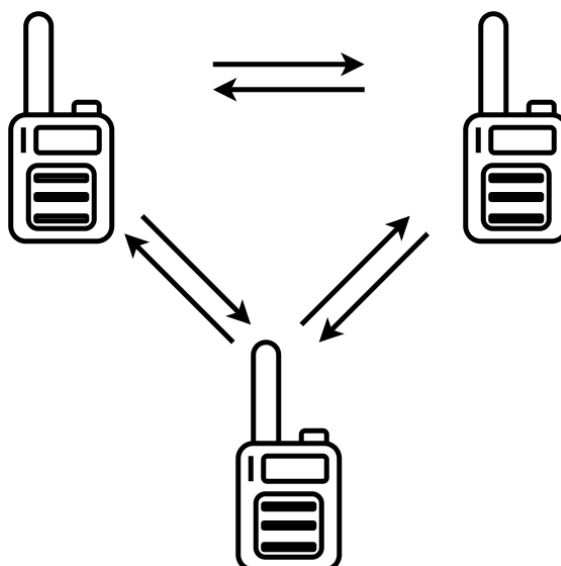
Bezdrôtová komunikácia je spôsob prenosu informácií medzi dvoma alebo viacerými bodmi, bez potreby fyzického vodiča alebo iného média, na prenos signálu. Ide o spôsob komunikácie, ktorý na prenos dát najčastejšie využíva rádiové vlny. Medzi príklady bezdrôtovej komunikácie patria technológie ako Wi-Fi, Bluetooth, mobilné siete a pod.

Jednou z hlavných výhod bezdrôtového pripojenia je flexibilita a prispôsobiteľnosť. Ďalšou výhodou je v porovnaní s káblovým spojením umožnenie ľahkého presúvania pripojeného zariadenia. Používatelia môžu získať prístup k sieti kedykoľvek a odkiaľkoľvek v rámci dosahu signálu. Plánovanie bezdrôtových sietí je tiež oveľa jednoduchšie v porovnaní s káblovými sieťami. Softvérová konfigurácia umožňuje ľahké nastavenie frekvencií, výkonu a ďalších parametrov siete, čo umožňuje efektívne a škálovateľné rozširovanie siete bez potreby nového hardvéru. Poznáme viacero bezdrôtových komunikačných systémov a protokolov, preto si opíšeme iba niektoré.

Rádiová komunikácia sa označuje za úplne prvú bezdrôtovú službu. Tento spôsob komunikácie sa používa dodnes na prenos zvukových alebo dátových informácií prostredníctvom rádiových vln (Obrázok 6). Rádiové vlny sa šíria vo forme elektromagnetického žiarenia a môžu byť prijímané rôznymi zariadeniami (rádioprijímače). Je to príklad jednoduchého komunikačného systému, kde sa informácie prenášajú iba jedným smerom, pričom všetci prijímcovia dostávajú rovnaké dáta (Obrázok 5).



Obrázok 5 Rádiová komunikácia medzi zariadeniami a vysielačom



Obrázok 6 rádiová komunikácia medzi zariadeniami

Významnú formu bezdrôtovej komunikácie predstavujú **satelitné komunikačné systémy**. V súčasnej dobe zohrávajú v komunikácii kľúčovú úlohu. Tieto systémy umožňujú komunikáciu na globálnej úrovni bez ohľadu na počet pripojených zariadení. Ich rozsiahla funkcionality zahŕňa širokú škálu služieb vrátane satelitných telefónov pre telekomunikáciu, GPS na určovanie polohy a navigáciu, vysielanie médií a prístup na internet (Obrázok 7). Ďalšie bezdrôtové technológie (mobilná komunikácia, televízne vysielanie a ďalšie rádiové systémy) sú tiež podporované touto technológiou (Orgoň, 2006).



Obrázok 7 Satelitná komunikácia, zdroj informácií: Orgoň, 2006

Veľmi často používaná technológia, využívaná na bezdrôtovú komunikáciu, je **Bluetooth**. Ako systém patrí do kategórie Wireless Personal Area Network (WPAN). Tento typ bezdrôtovej komunikácie je preferovaný pre svoju schopnosť rýchlej výmeny údajov v blízkej oblasti, pričom využíva frekvenčné pásmo medzi 2,4 GHz a 2,485 GHz. K jednému bluetooth zariadeniu je možné pripojiť až 7 ďalších zariadení s dosahom signálu približne 10 metrov. Rýchlosť prenosu údajov závisí od verzie, počtu súborov a sily signálu pričom môže mať rýchlosť 1 až 3 Mbps. Táto technológia využíva šírenie signálu FHSS (Frequency-hopping spread Spectrum), čo znamená, že signál sa periodicky mení medzi rôznymi frekvenciami, čím sa zabezpečuje spoľahlivý prenos údajov.

Bluetooth zariadenie sa môže spárovať s iným zariadením, ak sú dostatočne blízko seba (Bing, 2001). Po úspešnom prenose párovacích údajov sa tieto zariadenia stávajú súčasťou piconetu.

Piconet je špecifický typ siete využívajúcej technológiu Bluetooth, ktorá sa skladá z jedného hlavného uzla, nazývaného primárny uzol, a až siedmich ďalších uzlov, ktoré sa označujú sa ako sekundárne (Schéma 7). Ako sme vyššie spomenuli, piconet môže obsahovať až osem aktívnych uzlov (7 pripojených zariadení k hlavnému). Komunikácia môže prebiehať medzi primárnym uzlom a jedným sekundárnym uzlom (1-1 komunikácia) alebo (1-n komunikácia) medzi primárnym uzlom a viacerými sekundárnymi uzlami súčasne (Prabhu, 2004).

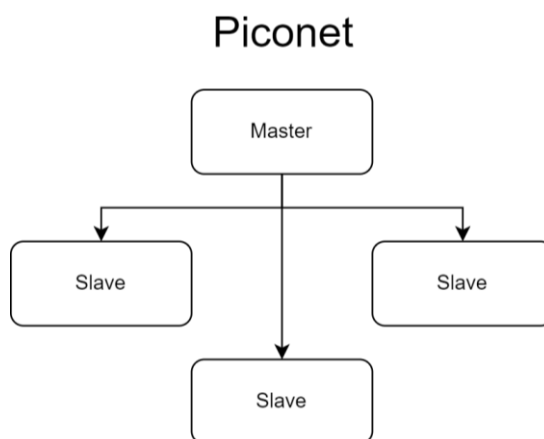


Schéma 7 Prenos dát v zapojení piconet, zdroj informácií: Prabhu, 2004

Pri tvorbe **Scatternet**-u sa využívajú piconetové uzly. Jeden z týchto uzlov môže fungovať ako primárny alebo hlavný v inom piconete. Tento uzol je schopný prijať správu od mastera v jednom piconete a následne ju odovzdať podriadenému uzlu v inom piconete, kde plní úlohu mostového uzla alebo prekladu (Schéma 8). Je dôležité mať na pamäti, že jedna stanica

nemôže súčasne riadiť dva odlišné piconety. Každé zariadenie v sieti Scatternet zohráva špecifickú úlohu, čím sa vytvára flexibilná a efektívna sieť umožňujúca komunikáciu medzi rôznymi uzlami a piconetmi (Prabhu, 2004).

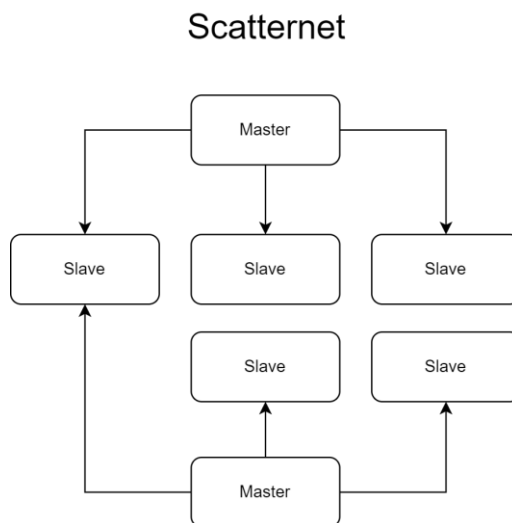


Schéma 8 Prenos dát v zapojení Scatternet, zdroj informácií: Prabhu, 2004

Bezdrôtový modul, ktorý umožňuje elektrickým zariadeniam pripojiť sa k bezdrôtovej lokálnej sieti pomocou rádiových vln, nazývame **WLAN** (Wireless Local Area Network) modul. Wi-Fi (Wireless Fidelity), známe aj ako bezdrôtová internetová sieť, je typom WLAN. Na rozdiel od niektorých iných typov WLAN, Wi-Fi zahŕňa možnosť pripojenia k internetu, čím umožňuje komunikáciu zariadení cez internet mimo obmedzení lokálnej siete. Každé pripojené zariadenie v rámci WLAN sa považuje za “stanicu” a radí sa do jednej z dvoch kategórií: prístupový bod (access point) a klient (client).

Zo Schémy 9 môžeme vidieť ako je zariadenie WLAN pripojené k internetu. Toto zariadenie umožňuje klientom pripojiť sa k internetu bez nutnosti drôtového spojenia.

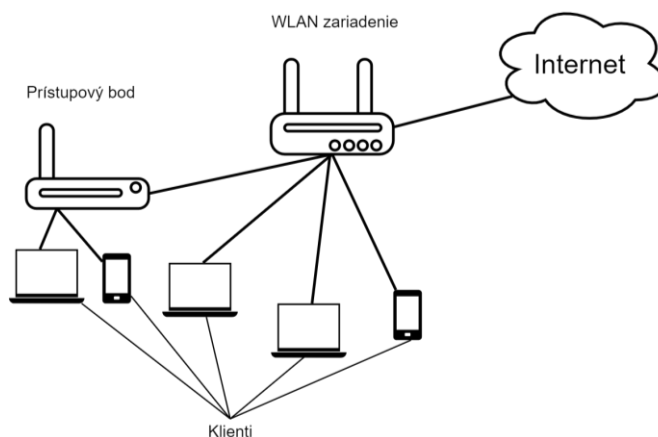


Schéma 9 WLAN modul pripojený k internetu

2 Cieľ práce

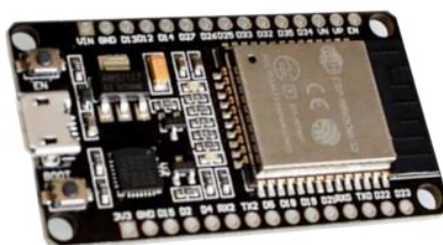
Hlavným cieľom praktickej časti bude navrhnuť, skonštruovať a naprogramovať merací systém, ktorý by dokázal zaznamenávať dynamické vlastnosti termodiferenciálnych článkov z rozdielu meraných teplôt. Systém bude skonštruovaný tak, aby sme dokázali merania opakovať a získať podobné výsledky. Dôležitým kritériom pre merací systém je vytvorenie podobných podmienok pri meraní, aby sme ich výstupné hodnoty dokázali navzájom porovnávať. Merací systém musí byť schopný dlhodobo zaznamenávať dynamické vlastnosti.

V bakalárskej práci sme popísali zistenia a základné informácie o termodiferenciálnych článkoch. Pomocou manuálnych a poloaautomatických meraní sme získali informácie o rozsahoch elektrických veličín (napätia a prúdu) pri určitých teplotách. Všetky získané údaje využijeme v našej diplomovej práci pri návrhu a konštrukcii meracieho systému. Skonštruované zariadenie bude ovládané počítačovým programom (aplikácia), ktorý bude prijímať vstupné príkazy od používateľa. Parametre merania bude možné nastaviť cez aplikáciu. Údaje z meracieho systému budú posielané do aplikácie, v ktorej budú spracované a prevedené do grafického zobrazenia. Všetky získané údaje sa budú exportovať do zvoleného priečinka. S exportovanými údajmi bude možné ďalej pracovať.

3 Metodika práce a metody skúmania

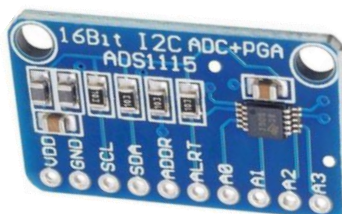
3.1 Plánovanie a návrh konštrukcie

Prvým krokom našej práce bude výber vhodného mikrokontroléra. Našou požiadavkou bude bezdrôtová komunikácia. Z toho dôvodu si vyberieme ESP32 (Obrázok 8), ktorý túto požiadavku spĺňa. Výhodou je jeho rýchlosť, nízka spotreba a prijateľná cena vzhľadom na možnosti, ktoré máme a zámer, ktorý sledujeme.



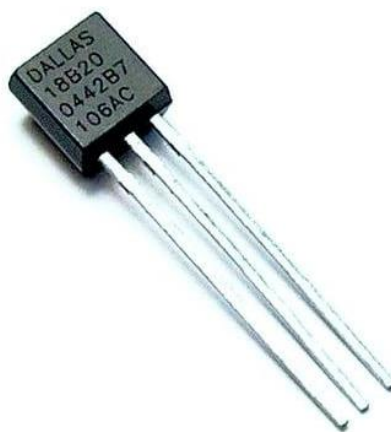
Obrázok 8 Mikrokontrolér ESP32

Najdôležitejším meraným údajom je výstupné napätie z termodiferenciálneho článku, na ktorý budeme potrebovať analógovo-digitálny prevodník. ESP32 už taký prevodník má, ale nie je natoľko presný, ako by sme potrebovali. Práve preto použijeme prevodník ADS1115 (Obrázok 9), ktorý oproti vstavanému 12-bitovému prevodníku má až 16-bitový prevodník. Na prvý pohľad sa môže zdať, že rozdiel nie je veľký, no v skutočnosti je až 16-násobný, pričom jeden bit z tohto rozsahu určuje, či ide o kladné alebo záporné napätie. Zvyšných 15 bitov určuje, na koľko “častí” vie prevodník číslo rozdeliť. Z toho dôvodu vieme presnejšie určiť reálnu meranú hodnotu. Bitové rozlíšenie je dôležité, ale podstatnejšia je odchýlka alebo presnosť. Mikrokontrolér má presnosť $\pm 6\%$ v závislosti od výrobcu. Prevodník je možné nakalibrovať až na presnosť $\pm 1\%$. Prevodník ADS1115 má podstatne vyššiu presnosť $\pm 0,01\%$, pričom najväčšia odchýlka je maximálne $\pm 0,15\%$, ak berieme do úvahy všetky možné zdroje chýb.



Obrázok 9 AD prevodník, typ ADS1115

Druhým dôležitým parametrom je **teplota**. Bude potrebné presne merať teplotu studenej strany (chladič) aj vyhrievanej strany (medený blok). Preto zvolíme snímač teploty DS18B20 (Obrázok 10). Je to veľmi presný snímač, ktorého jeden krok je 0,06 °C s presnosťou $\pm 0,5$ °C (v rozsahu od -10 °C do 85 °C). Najväčšou výhodou tohto snímača je, že nameranú teplotu konvertuje z analógovej na digitálnu. Z toho dôvodu nie je potrebné odpor vodičov merať. Odpor meraných vodičov by vychyľoval namerané údaje. Na prečítanie digitálneho signálu nebudú použité špeciálne knižnice, postačujúca bude jediná, ktorá slúži na prečítanie výstupných hodnôt (OneWire). V závere budeme tento signál konvertovať ako údaj na číselnú hodnotu.



Obrázok 10 Snímač teploty DS18B20

Časť meracieho systému, ktorú pre naše potreby nazývame vyhrievaným medeným blokom, získame z chladiča pre 1U server HP 480901-001 (Obrázok 11). Upravíme ho tak, aby bol prispôsobený rozmerom chladiacej plochy. Odstránime pružiny, skrutky i chladiace rebrá a zmenšíme rozmery dvoch strán celého medeného bloku (Obrázok 12).



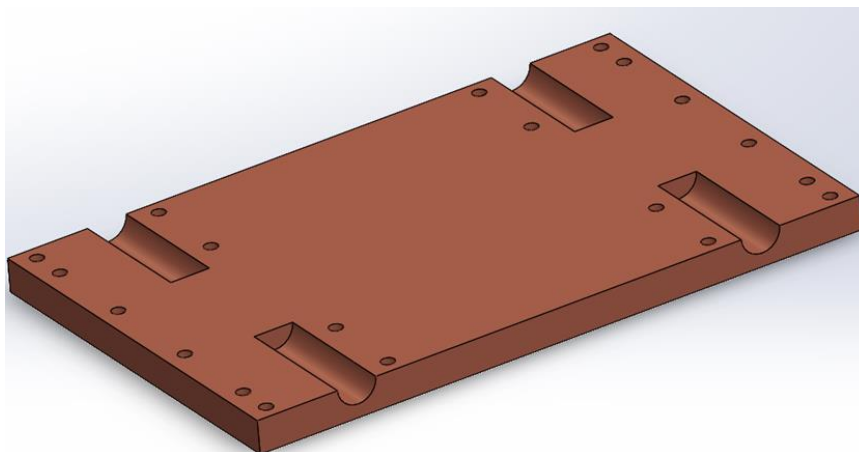
Obrázok 11 Chladič pre 1U server HP 480901-001, zdroj: www.esus-it.com



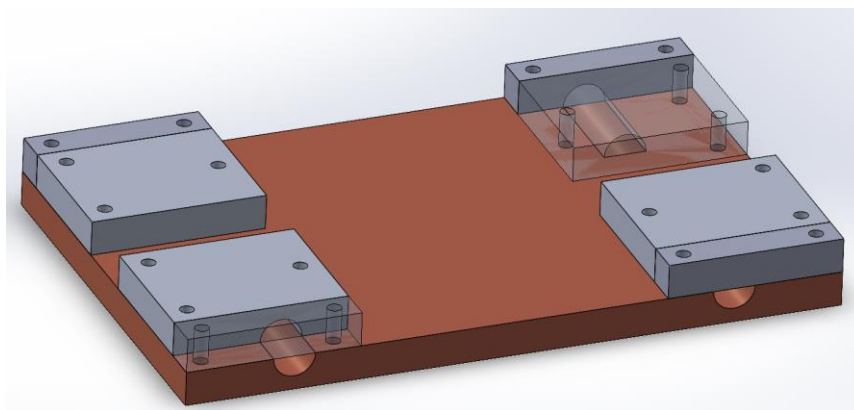
Obrázok 12 Medený blok z chladiča pre 1U server HP 480901-001

V ďalšej etape našej práce budeme pokračovať návrhom konštrukcie, vybraných ostatných častí a potrebných komponentov. Pre optimalizáciu procesu návrhu a minimalizáciu možných chýb pri vytváraní konštrukcie na meranie termodiferenciálnych článkov využijeme softvér SolidWorks. Tento 3D parametrický nástroj je často využívaný pri komplexných montážach v automobilovom priemysle a pri výrobe rôznych komponentov pre letecký sektor alebo mobilné zariadenia. To znamená, že je možné ihneď vidieť ako zmeny ovplyvňujú ostatné časti modelu.

V programe SolidWorks napokon vymodelujeme 3D modely (Obrázok 13 a 14), s ktorými budeme ďalej pracovať. Začneme s modelovaním medeného bloku, ktorý budú vyhrievať štyri 50W vyhrievacie telesá. Ovládané budú pomocou mosfetových regulátorov AOD4184A. Rozmery vyhrievacích telies budú väčšie ako samotný medený blok. Preto bude potrebné ich pripevnenie k tomuto bloku prostredníctvom štyroch pomocných častí v tvare štvorca.



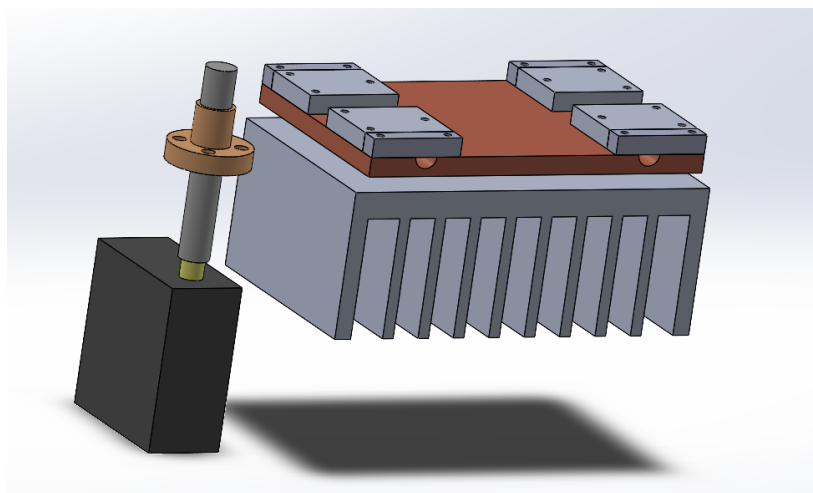
Obrázok 13 Model medeného bloku s otvormi



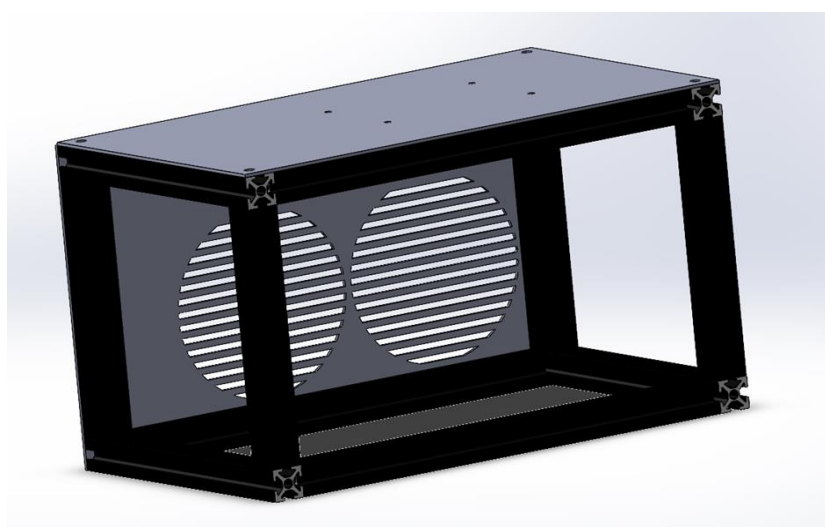
Obrázok 14 Model medeného bloku s otvormi a pomocnými blokmi

Minimálne vnútorné rozmery (100x70x48,5) celej konštrukcie odvodíme od výhrevnej a chladiacej plochy. Tieto dve plochy bude potrebné oddeliť od seba bez demontáže. Preto budeme uvažovať nad možnosťou využitia spôsobu lineárneho posunu. Posun bude realizovaný pomocou servomotora a trapézovej tyče (Obrázok 15). Veľkosť motora, trapézová tyč a ostatné časti ako mikrokontrolér, mosfety, AD prevodník, vodiče a ventilátory, tak isto ovplyvnia vnútorné rozmery konštrukcie (137x77,5x88). Od nich bude závisieť celková dĺžka, šírka a výška meracieho systému. Očakávame však, že medený blok a chladič nebudú úplne rovnobežné, a to z dôvodu odchýlok pri samotnej realizácii konštrukcie.

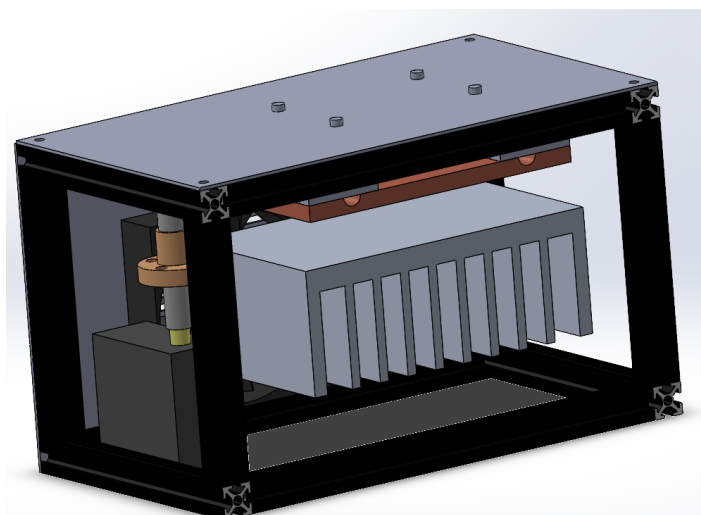
V ďalšej etape navrhujeme pridanie dlhších skrutiek (M2x20) s pružinami upevnenými na medenom bloku. Pri pohybe chladiča smerom nahor nám pružiny na skrutkách umožnia flexibilne nakláňať vyhrievaciu plochu v závislosti od uhla naklonenia chladiča. Pružiny na skrutkách sa teda budú prispôbovať sklonu, ktorý vznikne pri dotyku chladiča s medeným blokom. Podľa návrhu budú vonkajšie rozmery meracieho systému (Obrázok 16 a 17) 165x95x100mm.



Obrázok 15 Model vnútornej časti meracieho systému



Obrázok 16 Model konštrukcie meracieho systému



Obrázok 17 Konštrukcia meracieho systému so základnými časťami

3.2 Charakteristika použitých prístrojov a materiálov

Meracie prístroje

Tabuľka 1 Meracie prístroje

Typ	Zariadenie	Typ hodnoty/použitie	Rozsah / hodnota	Rozlíšenie	Presnosť
Multimeter	NJTY T21D	DC napätie	600mV/6V/60V/600V	0.1mV/1mV/10mV/100mV	$\pm(0.5\%+5)$
		DC prúd	60mA/600mA	0.01mA/0.1mA	$\pm(1.2\%+5)$
		Odpor	600Ω/6kΩ/60kΩ/600kΩ/6MΩ/60MΩ	0.1Ω/1Ω/10Ω/100Ω/1kΩ/10kΩ	$\pm(0.8\%+5)$
		Teplota	-20~1000 °C/-4~1832 °C	1 °C	$\pm(1\%+3)$
	ANENG AOS03	DC napätie	25mV/250mV/2,5V/25V/250V/1000V	1uV/10uV/100uV/1mV/10mV/100mV	$\pm(0.05\%+3)$
		DC prúd	25mA/250mA/2,5A/10A	1uA/10uA/100uA/1mA	$\pm(0.5\%+3)$
		Odpor	250Ω/2,5kΩ/25kΩ/250kΩ/2,5MΩ/25MΩ/100MΩ	10mΩ/100mΩ/1Ω/10Ω/100Ω/1kΩ	$\pm(0.5\%+3)$ / $\pm(0.2\%+3)$ / $\pm(1\%+3)$ / $\pm(5\%+5)$

Počítače a zdroje

Tabuľka 2 Počítače a zdroje

Typ	Zariadenie	Typ hodnoty/použitie	Rozsah / hodnota
Zdroj	ADP-180TB H	Výstupné napätie	20V DC
		Výstupný prúd	9A
	PA-1900-36	Výstupné napätie	19V DC
		Výstupný prúd	4,74A
	Power banka	Výstupný prúd	4,5A/2A/1,5A
		Výstupné napätie	5V/9V/12V
		Kapacita	10 000 mAh
Počítač	Asus FX505HC	Programovanie, zapisovanie a práca s dátami	-

Použitý materiál

Tabuľka 3 Použitý materiál

Typ	Zariadenie	Typ hodnoty/použitie	Rozsah / hodnota
Skrutky	M2x8	-	-
	M2x20		
	M3x8		
	M3x15		
	M4x10		
	M4x20		
Teplovodivá pasta	Qualcomm star ST922	-	-
Chladič	Medený chladič HP 480901-001	Rozmery	100 x 100 x 5mm
		Čistota	99.9%
	Hliníkový chladič	Rozmery	100x70x38,5 mm
Profil	Hliníkový profil	Rozmery	200x10x10mm
		Výrez	T-slot
Vodiče	Vodič	Materiál	Med'
Zmršťovacie trubice	Zmršťovacie trubice	Rozmery	Rôzne
		Farba	
Vertikálny posun	Posúvač	Rozmery	95x75x10 mm
	Trapézová tyč	Rozmery	100x8x8 mm
		Stúpanie	1 mm
	Trapézová matica	Rozmery	22x22x15 mm
		Stúpanie	1 mm
Oddeľovací plast	Nevodivý plast	Rozmery	200x1x200 mm
Plech	Kovový plech	-	-
Uholník			
Farba	Sprej s farbou	Farba	Čierna
Vytlačené modely	Vytlačené 3D modely	Materiál	PLA
Lepidlo	Dvojzložkové lepidlo	Pevnosť šmyku	9,7 N / mm ²
		Základ	Epoxidová živica
Pásky	Obojstranná páska	Model	GPT-020F

	Polyamidová páska	Typ	3M
		Teplotná odolnosť krátkodobu	320 °C
		Teplotná odolnosť dlhodobu	200 °C
Pružiny	Pružina	Rozmery	6x6x15mm
Svorka	Svorka	-	-
Filament	Crealiti PLA	Hrúbka	1,75 mm
Vrtáky	Vrtáky	Veľkosti	Rôzne

Súčiastky

Tabuľka 4 Použité súčiastky

Typ	Zariadenie	Typ hodnoty/použitie	Rozsah / hodnota
Peltierov článok	SP1848-27145	Napätie naprázdno	4,8 V
		Rozmery	40 x 40 x 3,6 mm
		Výkon (od výrobcu) 20/40/60/80 °C	218,25 / 662,4 / 1125,6 / 2008,8 mW
	TEC1-12715	Operačné napätie	12 v
		Rozmery	40 x 40 x 3,6 mm
	TEC1-12709	Operačné napätie	12 v
		Rozmery	40 x 40 x 3,6 mm
Rezistor	Vyhrievacie telesá	Rozmery	15x6mm
		Výkon	50W
	Rezistor 1	Odpor	4,7 KW (±0,2%)
	Výkonový rezistor	Model	10W8R2J
		Odpor	8,22 W (±0,5%)
Mosfety	AOD4184A	Maximálne napätie	5 - 36 V DC
		Maximálny prúd	15 A kontinuálne, 20 A skokovo
		Signálne napätie	3,3 - 20V DC
		Frekvenčný rozsah	0 - 20 kHz
Ventilátory	Ventilátor 1	Rozmery	60x60x15
		Napájacie napätie	24V DC

	Ventilátor 2	Napájací prúd	0,1A
		Rozmery	60x60x15
		Napájacie napätie	24V DC
		Napájací prúd	0,1A
		Model	GDA6015
Mikrokontrolér	ESP32	ADC	12 bit
		Frekvencia	2x240 MHz
		Procesor	Dual Core Tensilica LX6 (600 DMIPS)
		SRAM	520 kB
		Flash	4MB
		Bluetooth	Bluetooth classic / BLE
Analógovo digitálny prevodník	ADS1115	ADC	16 bit
		Presnosť	±0,01-0,15%
		Pracovné napätie	2 - 5,5V
		SPS	860
Snímače teploty	DS18B20	Presnosť	±0,5 °C (-10 až 85 °C)
		Pracovné napätie	3 - 5,5V
		Rozsah merania	-55 až 125 °C
Servo motor	MG955	Rozmery	40,7 x 19,7 x 43 mm
		Prevádzková rýchlosť	0,2s a 60° (4,8V bez záťaže)
		Krútiaci moment	8,5 kg/cm pri 4,8V
		Prevádzkové napätie	4,8 - 7,2V
		Otáčanie	360°
		Prevody	Kovové

Použité nástroje

Tabuľka 5 Použité nástroje

Typ	Zariadenie	Typ hodnoty/použitie	Rozsah / hodnota
Stolová vŕtačka	PTBM 400 A1	Príkon	400W
		Vŕtací zdvih	0-50mm
		Rýchlosť	600 – 2 650ot/min
3D tlačiareň	Ender 5 pro	Tlačový priestor	220x200x300 mm
		Technológia	FDM
		Rýchlosť tlače	80 mm/s
		Hrúbka vrstvy	0,2 mm
Posuvné meradlo	Posuvné meradlo	Max meranie	150 mm
		Tolerancia	0,02 mm
Zverák	Zverák na stolovú vŕtačku	-	-
Spájkovačka	JCD 8896	Výkon	80W
		Teplotný rozsah	100 - 480 °C

4 Výsledky práce

4.1 Zhotovenie konštrukcie

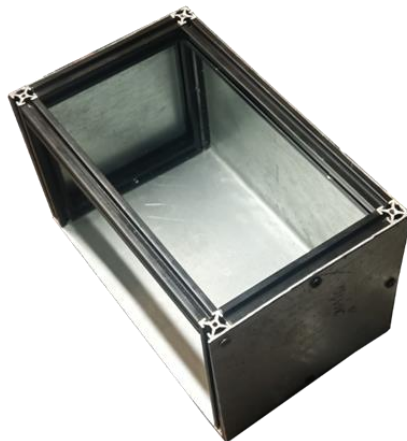
Podľa plánu a vytvoreného návrhu sme ďalej postupovali v realizácii konštrukcie. Vytvorenie samotného meracieho zariadenia neprebiehalo úplne bez problémov. Objavili sa nedostatky, ktoré uvádzame nižšie. Aby konštrukcia spĺňala naše vopred stanovené požiadavky vzhľadom k účelu merania, pri zhotovovaní systému sme museli vykonať určité úpravy. Niektoré časti nebolo možné vyhotoviť kvôli chýbajúcemu vybaveniu či materiálu, iné časti sme upravili kvôli vhodnejšiemu postupu, resp. presnejšiemu výsledku merania.

Na výrobu základnej konštrukcie sme sa rozhodli použiť hliníkové profily s rozmermi 200x10x10 mm (dĺžka, šírka, výška), s ktorými sme mali možnosť pracovať v našich podmienkach. Tieto profily sme museli odrezat' na požadované dĺžky, aby sme vytvorili rám. Kvôli nedostupnosti rôznych spojovacích materiálov pre rozmery použitých profilov, sme boli nútení pridať oceľový plech, ktorý nám všetko nielen spojil, ale i zvýšil pevnosť celej konštrukcie. Ak by sme použili profil s inými rozmermi (200x20x20 mm), bolo by jednoduchšie nájsť a využiť spojovacie materiály. Konštrukciu by sme zrealizovali za kratší čas, ale malo by to výrazný vplyv na jej rozmery, hmotnosť a cenu. Ak by sme chceli pôvodne plánované rozmery zachovať, osádzanie súčiastok a práca s meracím systémom by bol komplikovanejší. Oceľový plech (500x500x1 mm) sme rozdelili na tri časti, pričom najväčšiu časť (Obrázok 18) sme tvarovali (ohýbali ho) do vhodnej podoby tak, aby spojil zadnú a vrchnú časť profilového rámu.



Obrázok 18 Kovový plech

Na pravú a ľavú stranu (bočné steny) konštrukcie sme použili a skrutkami pripevnili dva menšie plechy (95x100x1 mm), ktoré zabezpečili spojenie s ostatnými časťami profilov (Obrázok 19). Poslúžili aj ako uchytenie ďalších elektrických komponentov a zvýšili celkovú stabilitu konštrukcie. Do všetkých plechov a profilov sme vyvrtali otvory so závitmi M3 na vzájomné spojenie skrutkami.



Obrázok 19 Základná konštrukcia s plechmi

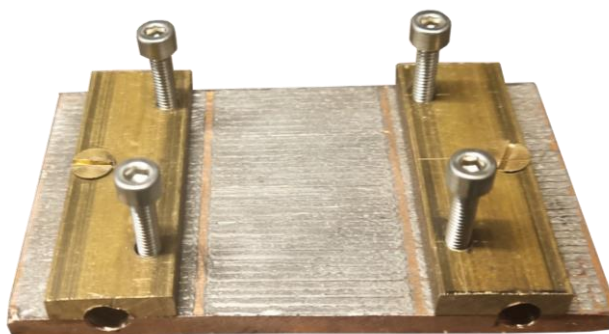
Podľa plánu sme urobili ďalšiu z úprav, ktorou bolo vyrezanie otvorov pre dva ventilátory. V návrhu sme si vytvorili horizontálne čiary, ktoré by kopírovali veľkosť vnútorného priemeru ventilátorov (58 mm). Tento typ otvorov sme však nedokázali vyhotoviť s dostupnými nástrojmi a pomôckami. Alternatívou preto bolo vyvrtanie otvorov s maximálnym priemerom 58 mm a následné použitie ochrannej krytky. Najbližší rozmer, ktorý sme mali, bol 64 mm. Bol však väčší než sme požadovali. Vznikli by tak príliš veľké otvory, ktoré by odhalili profily konštrukcie a navyše by sa oslabil plech, do ktorého by tieto otvory boli vyvrtané. Druhý najbližší rozmer, ktorý by sme dokázali vyhotoviť, bol pre nás 51 mm. Najskôr sme odmerali vzdialenosť stredov oboch ventilátorov. V tomto bode sme menším vrtákom vytvorili otvor. Kruhovým rezačom sme následne vytvorili požadovaný otvor. Všetky ostré hrany konštrukcie sme obrúsili.



Obrázok 20 Konštrukcia s otvormi pre ventilátory

Po dokončení hlavnej konštrukcie meracieho systému sme sa venovali individuálnej úprave niektorých častí. Prvým krokom bolo vytvorenie otvorov medenom bloku oproti sebe, ktoré by slúžili na uchytenie a osadenie výhrevných hlavíc. Tieto hlavice by boli umiestnené v rovnakej vzdialenosti od seba, pričom páry hlavíc by boli rovnako vzdialené od stredu bloku. V návrhu sme mali vytvorené otvory pre skrutky M2. Pri realizácii sme ale nedokázali vytvoriť tak malý priemer otvoru. Med' sa "lepila" na vrtáky, čo spôsobilo ich zlomenie. Pokúsili sme sa o vytvorenie väčšieho priemeru otvoru (M3), čo sa nám podarilo, ale zlomil sa závitník. Napokon sa nám podarilo vyvŕtať a vytvoriť rozmer otvoru pre skrutku M4. Zmena veľkosti pôvodne plánovaných otvorov na skrutky bola aj dôvodom inej zmeny. Z pôvodných 8 samostatných pomocných blokov sme použili iba 2 rovnako veľké bloky.

Na týchto medených blokoch sme vyvŕtali 6 otvorov, dva z nich boli určené pre skrutky M4x8 a štyri pre skrutky M4x20. Potom sme vyvŕtali ďalšie štyri otvory určené pre výhrevné hlavice s priemerom 6,5 mm s hĺbkou 20 mm (o 5 mm viac než bola dĺžka výhrevných telies). Otvorom prechádzala hranica oboch blokov, spojenie medeného a pomocného bloku. Tvorila vlastne priemer otvoru o rozmere 6,5 mm (Obrázok 21).



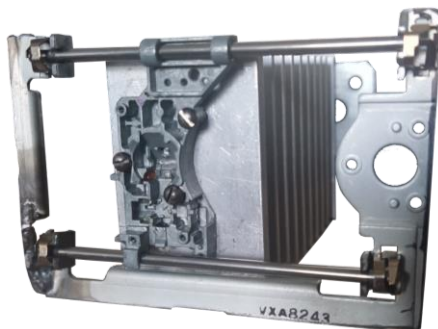
Obrázok 21 Medený blok so skrutkami

Hliníkový chladič (Obrázok 22), ktorý sme použili ako časť systému zabezpečujúcu odvod tepla, nevyžadoval výrazné úpravy okrem potreby vŕtania závitov pre uchytenie k lineárnemu pohybu.



Obrázok 22 Hliníkový chladič

Po vyvrtaní otvorov a vytvorení závitov sme ku chladiču skrutkami M3 pripevnili upravený lineárny posúvač z CD-romky (Obrázok 23). Informácie o pôvode modelu CD-romky sme nenašli, ale podarilo sa nám získať číselné označenie posúvača (VXA8243 O6DO1C901). Zistili sme, že pochádza zo staršieho a väčšieho typu čítačky s robustnou konštrukciou v porovnaní s moderným, menším typom čítačky. Pri úprave rozmerov lineárneho posúvača sme oslabili štruktúru. Aby sme predišli ohnutiú či zlomeniu tejto časti, naniesli sme na posúvač pomocou zvárania vrstvu materiálu elektródovej tyče.



Obrázok 23 Hliníkový chladič s posúvačom

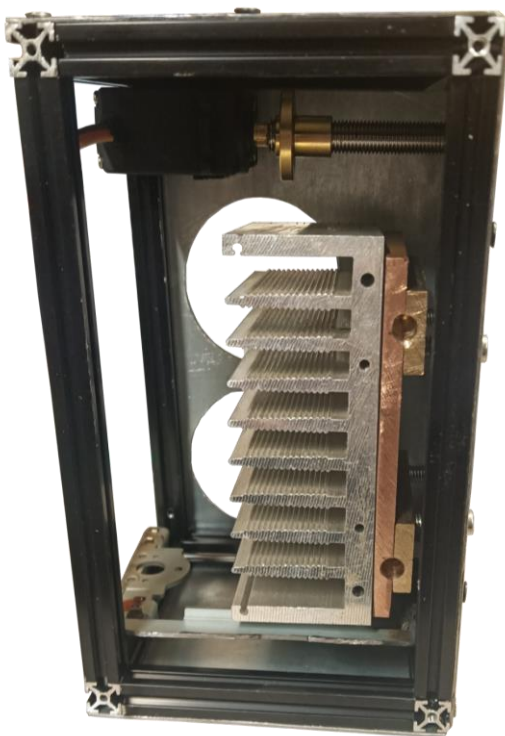
Pred dokončením úpravy lineárneho posúvača sme museli upraviť dĺžku trapézovej tyče. Pôvodné rozmery tejto tyče boli T8 s prírezom 1 mm (1 vinutie) a dĺžkou 100 mm. Požadovaný rozmer trapézovej tyče sme si odvodili rozdielom vnútornej výšky konštrukcie a výšky servomotora. Po odrezaní sme obrúsili a odihlili hrany rezu. Nasledovalo vytvorenie otvoru pre spojovacieho červíka M3 (Obrázok 24). Otvor so závitom sme museli vytvoriť iba na trapézovej tyči, pretože na servomotore sa už takýto závit nachádza priamo od výroby. Snažili sme sa vytvoriť tento otvor čo najbližšie k stredu trapézovej tyče. Malá odchýlka od stredu by znamenala vychýlenie rotácie od osi motora. Presne túto situáciu sme v našej konštrukcii zaznamenali.



Obrázok 24 Trapézová tyč s otvorom

Spojili sme trapézovú tyč so servomotorom a osadili sme ich do konštrukcie meracieho zariadenia. V hornej časti konštrukcie sme vytvorili ďalšie štyri otvory pre medený blok tak,

aby bol vycentrovaný so stredom hliníkového chladiča (Obrázok 25). V tomto kroku sme zistili, ako presne sme pracovali s použitým dostupným materiálom a vybavením. Výsledkom boli relatívne rovnobežné plochy medeného bloku a hliníkového chladiča.



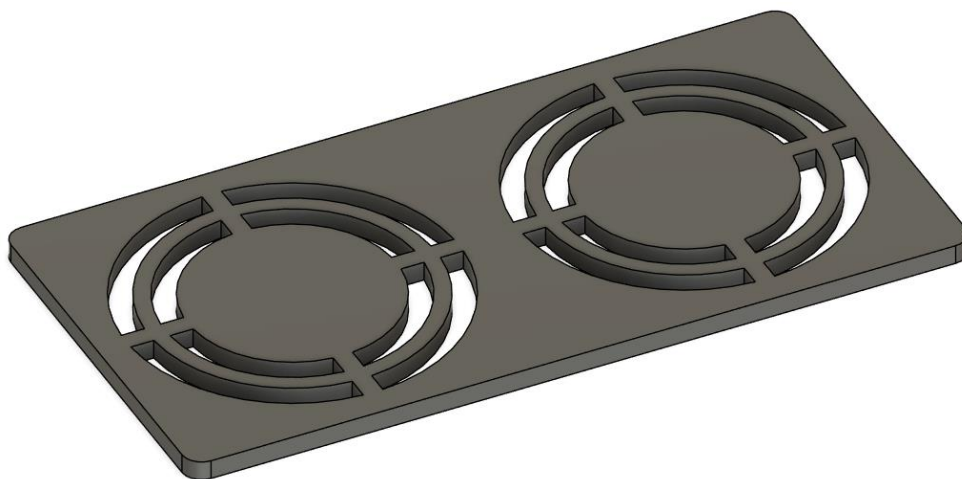
Obrázok 25 Konštrukcia - motor, medený blok, chladič s posúvačom

Po dokončení základnej konštrukcie sme obrúsili a vyčistili. Na takto upravený povrch sme naniesli matný čierny akrylový sprej (Obrázok 26), ktorý nám čiastočne ochránil materiál (plech) pred vonkajšími vplyvmi. Zároveň nám prekryje nedokonalosti povrchu vonkajšej strany zariadenia, ktoré vznikli pri konštrukcii zariadenia a práci s plechom ako materiálom.



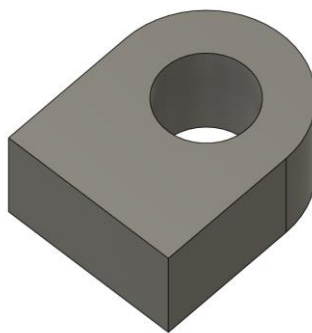
Obrázok 26 Povrchová úprava konštrukcie

V návrhu sme mali naplánovanú mriežku pre ventilátory, ktorá by bola vyrezaná do plechu. V tejto etape konštruovania meracieho zariadenia sme mriežku s dostupnými nástrojmi nedokázali vytvoriť. Zvolili sme iný spôsob - vymodelovali a vytlačili sme ju na 3D tlačiarňi. Celkovo sme vytlačili dva modely. Prvým je krytka pre ventilátory (Obrázok 27), ktorá bude slúžiť ako ich ochrana pri manipulácii s meracím systémom. Veľkosť otvorov v kruhovom výreze krytky je o šírke 3,5 mm, s hĺbkou 3 mm. Túto krytku sme spojili s konštrukciou pomocou dvojzložkového lepidla.



Obrázok 27 Model krytky ventilátora

Druhou vymodelovanou časťou bol držiak pre trapézovú tyč (Obrázok 28). Bol umiestnený na hornej vnútornej časti konštrukcie, na ktorú bol upevnený pomocou dvojzložkového lepidla. Držiak bol potrebný na umiestnenie a prichytenie trapézovej tyče.



Obrázok 28 Model držiak pre trapézovú tyč

4.2 Osadenie a zapojenie súčiastok

Akémukoľvek elektrickému spojeniu predchádza schéma zapojenia obvodu, ktorú sme navrhli v súlade s cieľom našej práce. Celý obvod sme navrhovali v programe draw.io, ktorý sme zvolili z dôvodu Open-source softvéru. Inak povedané, tento program má viacero výhod. Jedným z nich je to, že nevyžaduje žiadnu licenciu, je voľne dostupný a použiteľný na prácu ako program pre vytváranie diagramov. Druhým dôvodom je, že v tomto programe vieme dobre a efektívne pracovať.

Schému zapojenia sme v programe Draw.io začali vytvárať od mikrokontroléra ESP32 a postupovali sme ďalej ostatnými súčiastkami. Pri zapojení nemôžeme použiť každý pin na mikrokontroléri ESP32 (upesy.com). Nižšie uvedená Tabuľka 6 ukazuje, ktoré piny nemôžeme použiť (červené), môžeme použiť s obmedzeniami (žlté) a môžeme použiť bez obmedzenia (zelené).

Tabuľka 6 Použitie pinov mikrokontroléra

Číslo pinu	Vstup	Výstup	Číslo pinu	Vstup	Výstup
0	pulled up	OK	16	OK	OK
1	TX pin	OK	17	OK	OK
2	OK	OK	18	OK	OK
3	OK	RX pin	19	OK	OK
4	OK	OK	21	OK	OK
5	OK	OK	22	OK	OK
6	x	x	23	OK	OK
7	x	x	25	OK	OK
8	x	x	26	OK	OK
9	x	x	27	OK	OK
10	x	x	32	OK	OK
11	x	x	33	OK	OK
12	OK	OK	34	OK	-
13	OK	OK	35	OK	-
14	OK	OK	36	OK	-
15	OK	OK	39	OK	-

Pomocou tejto tabuľky a vhodných pinov sme navrhli zapojenie schémy obvodu nášho meracieho zariadenia (Schéma 10).

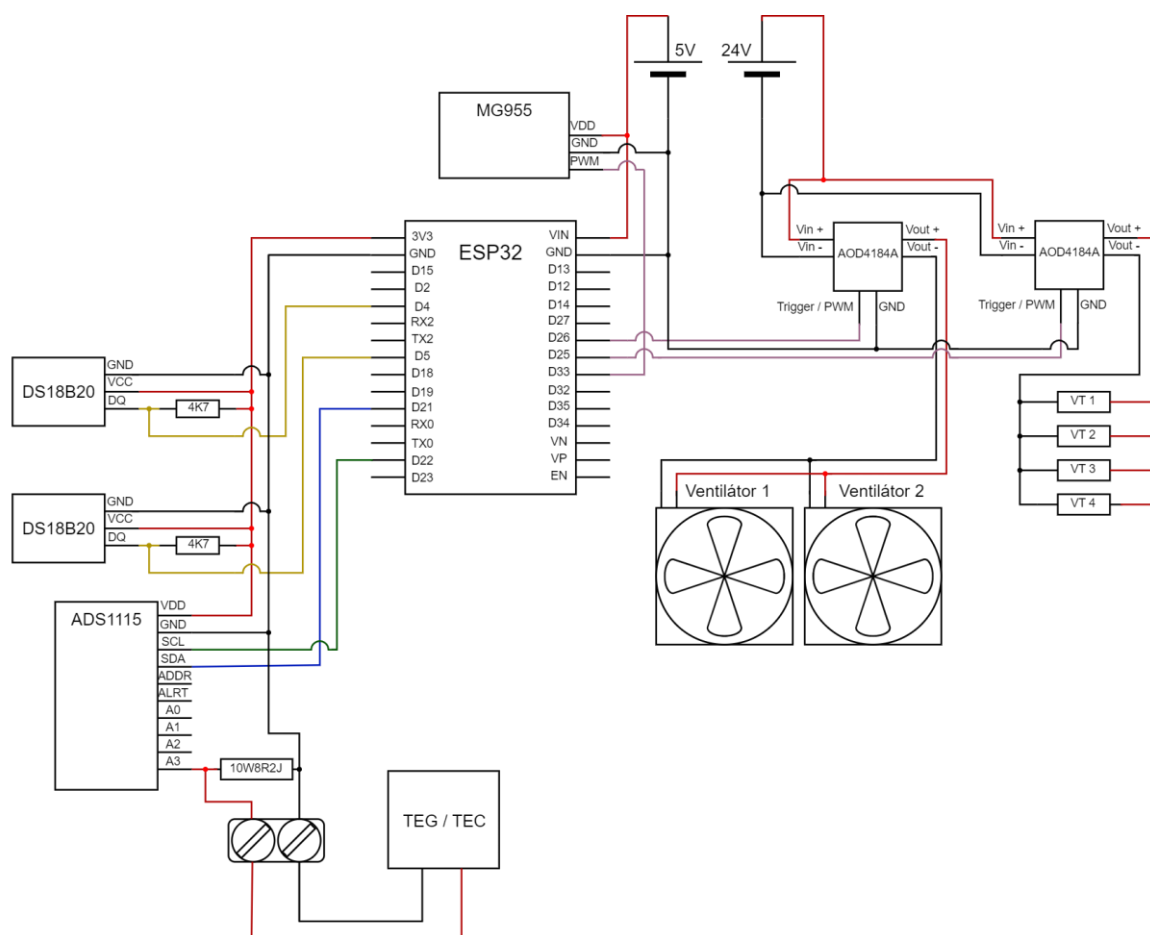
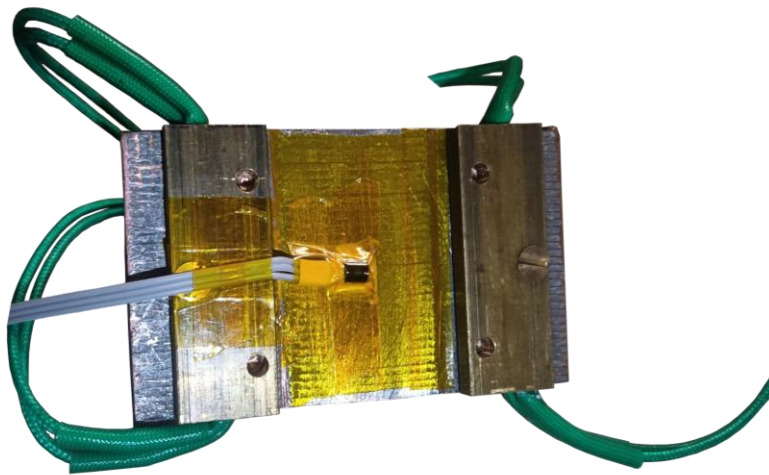


Schéma 10 Obvod zapojenia meracieho systému

Ďalším krokom našej práce bolo osadenie výhrevných telies do pripravených otvorov v medenom a pomocnom bloku. Otvory mali mikroskopické nerovnosti, ktoré obmedzili prenos tepla z týchto telies do medeného bloku. Použili sme preto špeciálne teplovodivé silikónové lepidlo STAR-922. Toto lepidlo má pracovný rozsah teplôt $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ pre dlhodobé použitie a pre krátkodobé použitie zvládne teplotu až $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na rozdiel od klasickej teplovodivej pasty má STAR-922 nižšiu tepelnú vodivosť $0,671\text{ W/m}\cdot\text{k}$, ale veľmi dobrý tepelný odpor $0,06\text{ }^{\circ}\text{C/W}$. Vieme, že čím je tepelný odpor nižší, tým je prenos tepla efektívnejší. Ďalšou výhodou teplovodivého lepidla STAR-922 je schopnosť pevne spojiť vyhrievacie telesá s medeným blokom.

Teplovodivé lepidlo STAR-922 sme využili i na vyhladený povrch medeného bloku na pripevnenie teplotného snímača DS18B20. Tepelný snímač sme umiestnili do stredu medeného bloku z dôvodu čo najpresnejšieho merania teploty. Keďže sme pracovali s väčším rozsahom teplôt a poznáme fyzikálny jav stúpania horúceho vzduchu smerom nahor, v čiastočne uzavretej konštrukcii by mohlo prichádzať k nežiadúcemu nepriamemu ohrievaniu súčiastok a častí. Aby sme aspoň čiastočne zamedzili úniku tepla generovaného

vyhrievacími telesami a ohrevu častí umiestnených v ich blízkosti, na hornú časť vyhrievacieho medeného bloku sme pridali polyamidovú pásku. Páska disponuje tepelnou odolnosťou do 200 °C dlhodobo a až 320 °C krátkodobo. Polyamidovú pásku sme umiestnili tak, aby sme ochránili aj vodiče pre snímač teploty voči generovanému teplu. Pásku sme umiestnili priamo pod (sivé) vodiče, ako môžeme vidieť na Obrázku 29.

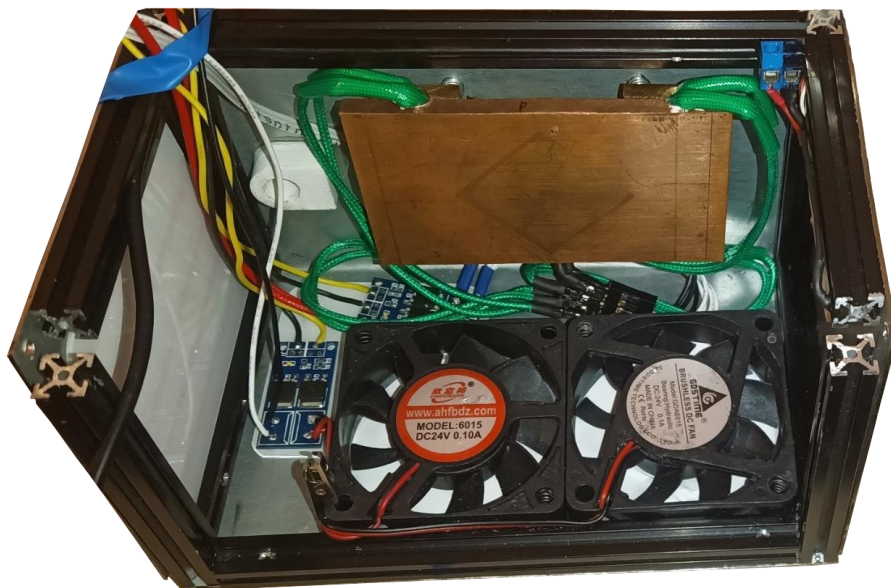


Obrázok 29 Medený blok - vyhrievacie telesá, snímač teploty

Časť medeného bloku so snímačom teploty a vyhrievacími telesami sme umiestnili do vnútornej hornej časti konštrukcie meracieho zariadenia. Do vnútornej zadnej časti konštrukcie sme pridali plastovú podložku, ktorá nám poslúžila na oddelenie súčiastok od samotnej konštrukcie. Plastová podložka nám zabezpečila, že nevznikne žiadne elektricky vodivé spojenie (skrat) medzi súčiastkami a konštrukciou.

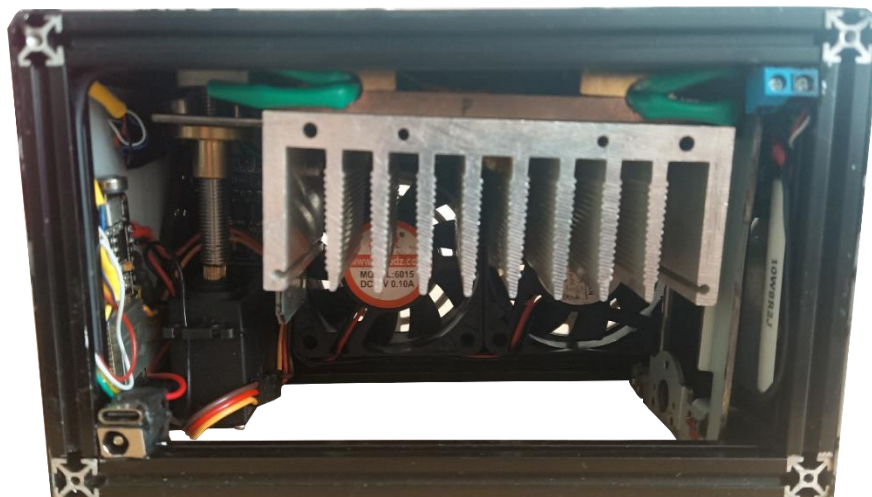
Na dve dosky AOD4184A, obsahujúce typ tranzistora - MOSFET-y (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) typu TO252, sme pripájkovali medené vodiče pre pripojenie s ostatnými súčiastkami. Pomocou prvej dosky AOD4184A by sme mali ovládať oba ventilátory veľkostného typu 6015. Ventilátory sme pripojili vodičmi na dosku AOD4184A. Druhá doska ovládala vyhrievacie telesá, pričom spoj medzi vyhrievacími telesami a doskou AOD4184A sme vytvorili pomocou Dupont konektora. Dosky AOD4184A sme spojili pomocou vodičov prispájkovaných ku mikrokontroléru ESP32, ktorý sme umiestnili na vnútornú ľavú stranu konštrukcie. Mikrokontrolér sme takisto spojili vodičmi k prevodníku ADS1115. Tento prevodník bol osadený na vnútornej pravej strane konštrukcie. Podobne ako ostatné súčiastky sme aj prevodník oddelili od samotnej konštrukcie nevodivým plastom. Prevodník ADS1115 sme spojili so svorkovým konektorom a výkonovým odporom 10W8R2J. Osadili sme aj vymodelovaný a na 3D

tlačiarňi vytlačený držiak (z PLA filamentu) pre trapézovú tyč spolu s krytkou na ventilátory (Obrázok 30).



Obrázok 30 Čiastočne osadená konštrukcia

V záverečnej etape konštruovania nášho meracieho zariadenia sme ku konštrukcii pripevnili servomotor MG955 spojený s trapézovou tyčou, trapézovou skrutkou, hliníkovým chladičom a lineárnym posúvačom. Po zapojení vodičov a súčiastok podľa schémy sme pridali dva napájacie konektory. Jeden konektor bol typu USB-C a druhý konektor DC jack. Týmto pripojením posledným častí zariadenia podľa plánu a schémy sme dokončili merací systém (Obrázok 31) určený na zaznamenávanie a vyhodnocovanie získaných údajov z termodiferenciálnych článkov.



Obrázok 31 Merací systém

4.3 Program pre ESP32

Program na mikrokontroléri môžeme rozdeliť na dve časti. Prvou je program pred začatím merania a druhou je program po prijatí správy na začatie merania.

V **prvej časti** (Diagram 2) si mikrokontrolér ESP32 overuje, či je prevodník ADS1115 pripojený. Ak by pripojený nebol, nebolo by možné vykonať plnohodnotné meranie. Nedokázali by sme zistiť generované napätie a tým ani získať potrebné údaje o výstupnom výkone. Ak prevodník nebude správne pripojený alebo bude úplne chýbajúci, užívateľ bude na túto skutočnosť upozornený blikaním LED, ktorá je integrovaná na doske mikrokontroléra.

Po pripojení prevodníka musí užívateľ resetovať mikrokontrolér stlačením tlačidla EN. Ak je prevodník ADS pripojený, vytvorí sa Bluetooth zariadenie s názvom IoDPoT (Identification of dynamic properties of thermocouples) so signálnou rýchlosťou (baud rate) 115200 baud-ou.

Prevodník ADS1115 sme nastavili na dvojnásobný zisk meraných hodnôt zosilňovača. Tým sme si určili rozsah napätia ± 2.048 V, pričom 1 bit sa rovná 0,0625 mV, čo predstavuje jeden krok. Bol to dostatočný rozsah napätia s vysokou presnosťou. V prípade potreby by sme vedeli zmeniť tento rozsah meraných hodnôt zosilňovača. Ak by sme potrebovali získať vyššiu presnosť kroku merania, museli by sme tento zisk zosilňovača zväčšiť, čím by sa nám znížil rozsah meraného napätia. Naopak, v prípade potreby väčšieho napäťového rozsahu, zisk zosilňovača by sme vedeli znížiť. Tým by sme znížili presnosť jedného kroku merania.

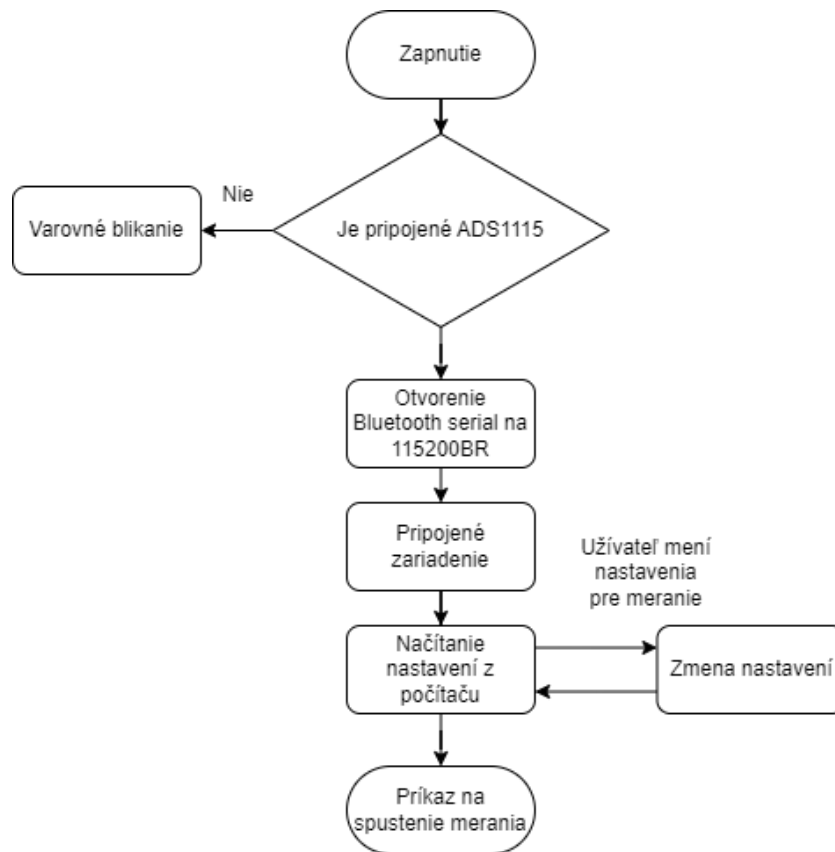


Diagram 2 Prvá časť programu mikrokontroléra

V **druhej časti** programu (Diagram 3) riešime iba meranie. Potrebujeme čo najpresnejšie meranie, preto kvôli odchýlke v čase nepoužívame funkciu Delay (oneskorenie). Nepresnosť tejto funkcie spočíva v tom, že pri jej opakovanom používaní dochádza k inkrementálnemu (zvyšujúcemu sa) oneskoreniu. Keby sa akcia vykonala stokrát za sekundu počas jednej hodiny, môže vzniknúť odchýlka v trvaní napríklad 5 minút. Nevieme predpokladať, koľko bude každá akcia trvať od spustenia po jej skončenie. Preto sme na spúšťanie rôznych častí programu vytvorili funkciu, ktorá sa aktivuje v presne danom časovom intervale. Inak povedané každých “x” ms intervalu sa aktivuje určitá časť programu.

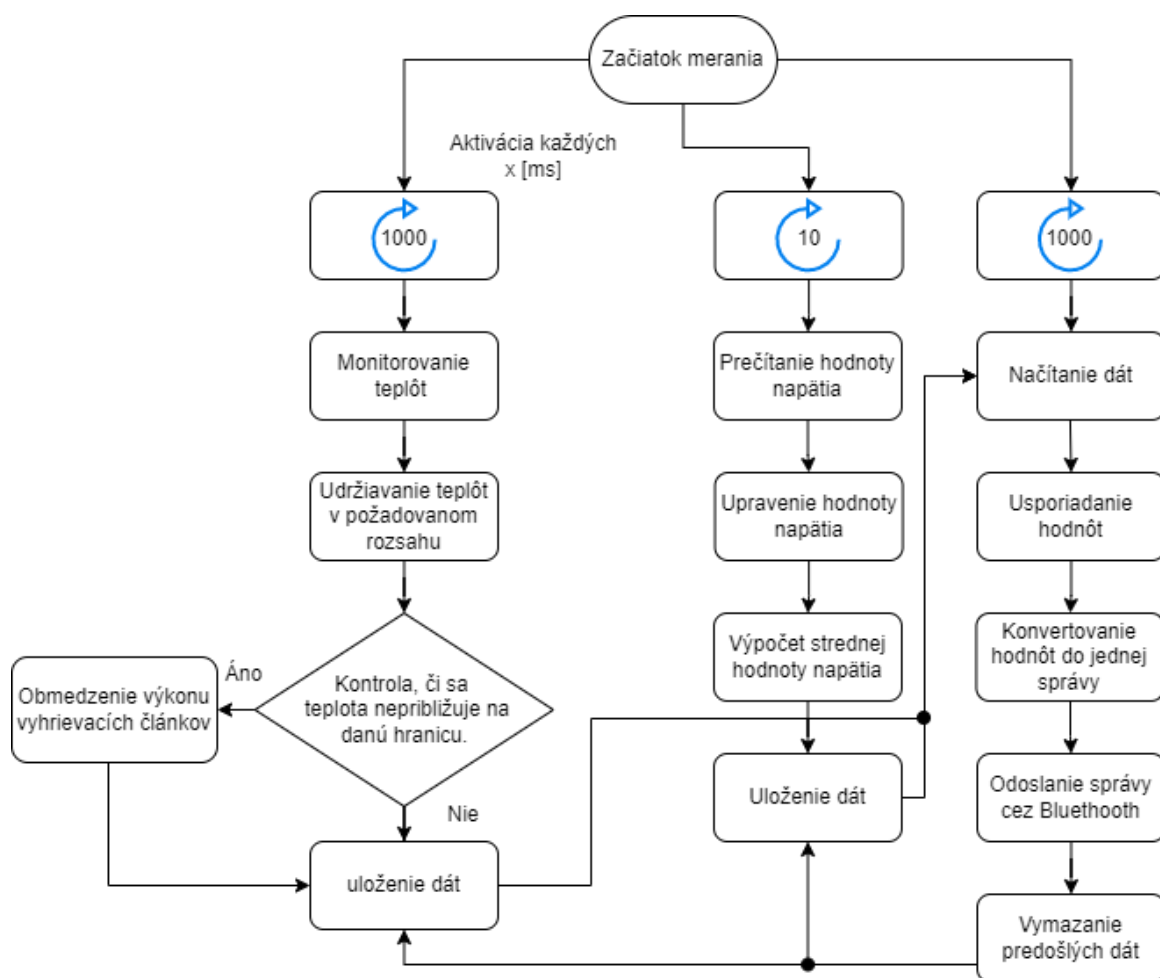


Diagram 3 Druhá časť programu mikrokontroléra

4.4 Počítačový program a aplikácia

Kvôli zjednodušeniu diagramu bolo potrebné počítačový program takisto rozdeliť na dve časti - pred meraním (Diagram 4) a počas samotného merania (Diagram 5).

Po spustení aplikácie na meranie uvíta užívateľa hlavné menu (obrázok 32), v ktorom si môže vybrať medzi pripojením a následným spustením merania alebo nastaveniami samotného merania (Obrázok 33). V ponuke si užívateľ môže skontrolovať alebo pozmeniť nastavenia podľa potreby. Ak sú nastavenia vyhovujúce, vie sa pripojiť a môže spustiť meranie.

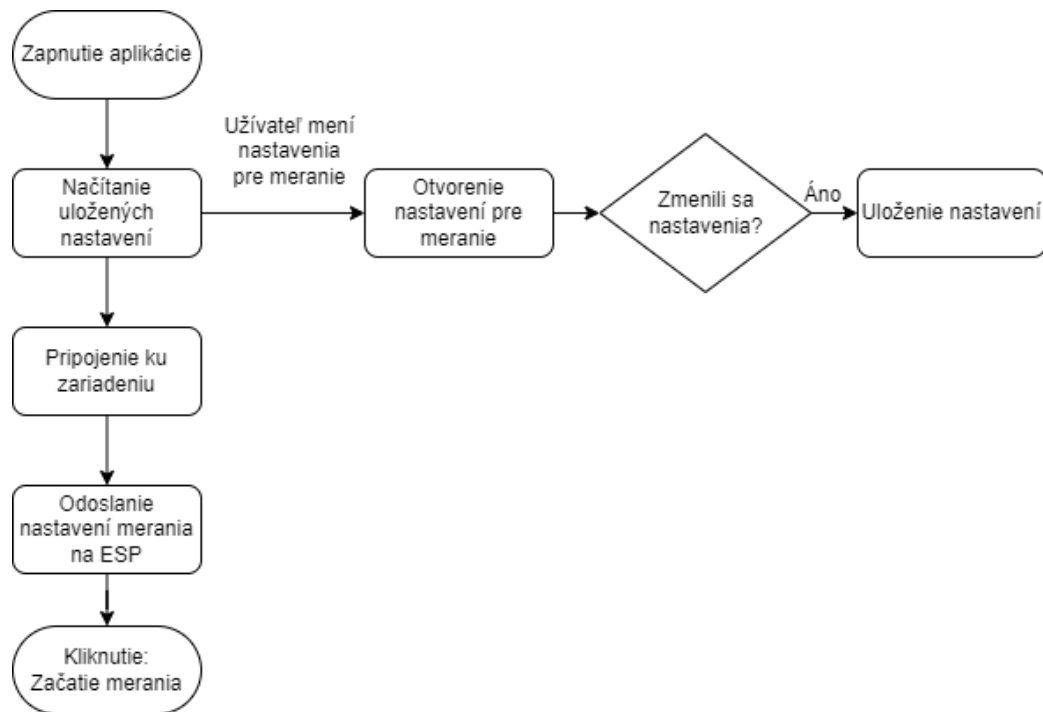


Diagram 4 Prvá časť programu aplikácie

V druhej časti, ako je možné vidieť z Diagramu 5, používateľ vidí hodnoty, ktoré posiela mikrokontrolér ESP32 rovno na obrazovke. Hodnoty sa vypisujú do textového poľa a vykresľujú rovno do grafov.

Počas merania je možné meniť nastavenia, podľa ktorých mikrokontrolér meria. Proces meranie ukončíme jedným kliknutím tlačidla ODPOJIŤ, namerané údaje sa nevymažú, ale zostanú automaticky uložené. Tieto dáta vieme exportovať do cieľového priečinka tlačidlom EXPORT, cesta do priečinka je uložená v nastaveniach. Tým nám v cieľovom priečinku vznikne niekoľko súborov s grafmi a textový súbor s neupravenými dátami posielanými z mikrokontroléra ESP32.

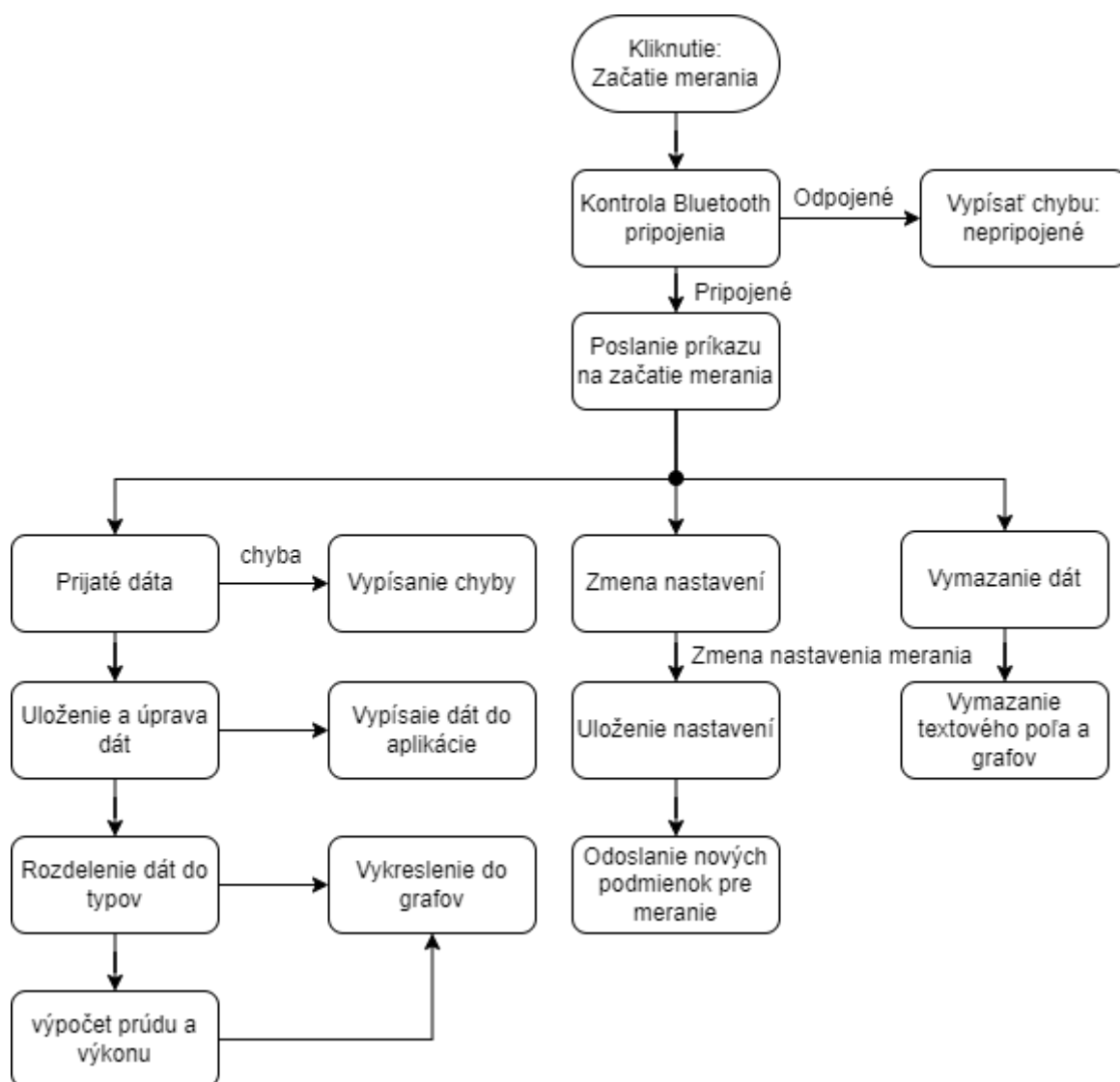
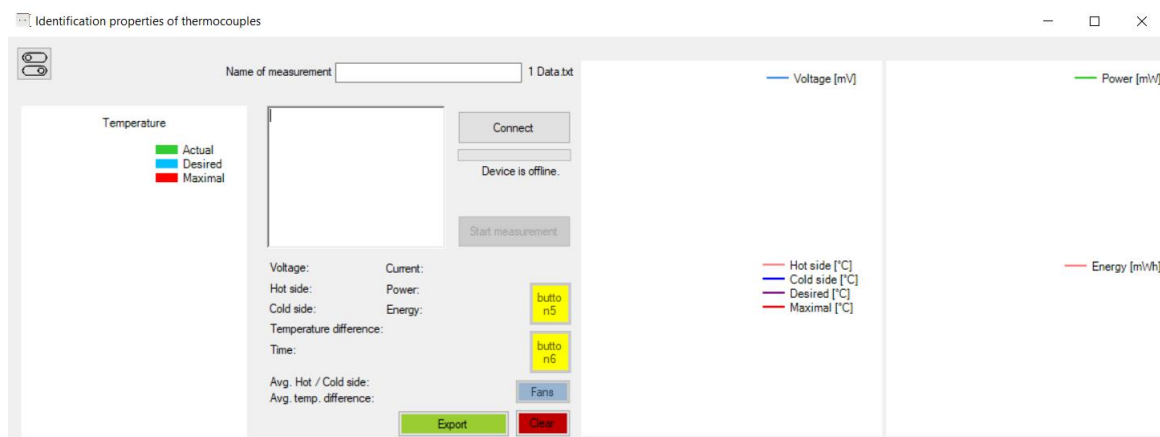
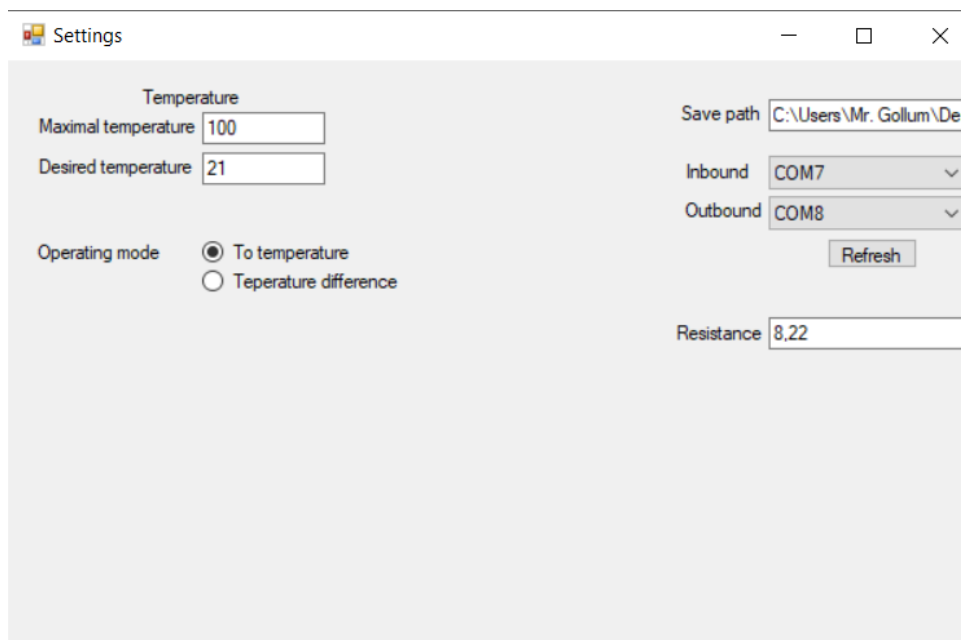


Diagram 5 Druhá časť programu aplikácie



Obrázok 32 Aplikácia



Obrázok 33 Nastavenia aplikácie

4.5 Nastavenie základných podmienok

Pri práci s našim meracím systémom sme si zvolili určité časti, ktoré sme pred samotným meraním museli skontrolovať, otestovať a následne nastaviť tak, aby meranie bolo čo najpresnejšie. Pri kontrole nastavenia základných podmienok programu sme zistili niekoľko nedostatkov. Neboli to hardvérové problémy, ale týkali sa softvéru.

Jedným zo zistených problémov bolo ovládanie ventilátorov. Požiadavkou bolo, aby boli ovládané meracím systémom, ale aj samotným používateľom. Z toho dôvodu bolo potrebné nastaviť správne priority pri rôznych nastaveniach a situáciách merania (Schéma 11). Napríklad po ukončení merania zostal merací systém horúci z dôvodu vyhrievaného medeného bloku. To by mohlo spôsobiť pri vyšších teplotách možné problémy (napr. popálenie). Riešením bolo, že pri skončení zaznamenávania hodnôt mikrokontrolér ESP32 zapne pomocou mosfetov (nachádzajú sa na doske AOD4184A) oba ventilátory. Tieto ventilátory by boli automaticky zapnuté tak dlho, kým sa neochladí vyhrievaný medený blok na nižšiu požadovanú teplotu (45 °C). Vznikla tu aj možnosť manuálneho vypnutia ventilátora priamo používateľom. Dôvodom by mohlo byť pokračovanie merania v danej teplote bez činnosti ventilátora. Používateľ by mal možnosť vykonať tento krok na počítači priamo v aplikácii.

Pri druhom type merania (druhý operačný mód) sme nastavili teplotný rozdiel. Ak by teplota horúcej strany medeného bloku prekročila 60 °C, zapli by sa ventilátory. Tento stav však opäť môže používateľ ovplyvniť manuálnym vypnutím ventilátorov (pomocou tlačidla v aplikácii). Od daného okamihu vypnutia sa už ventilátory automaticky nezapnú po celý zvyšok merania.

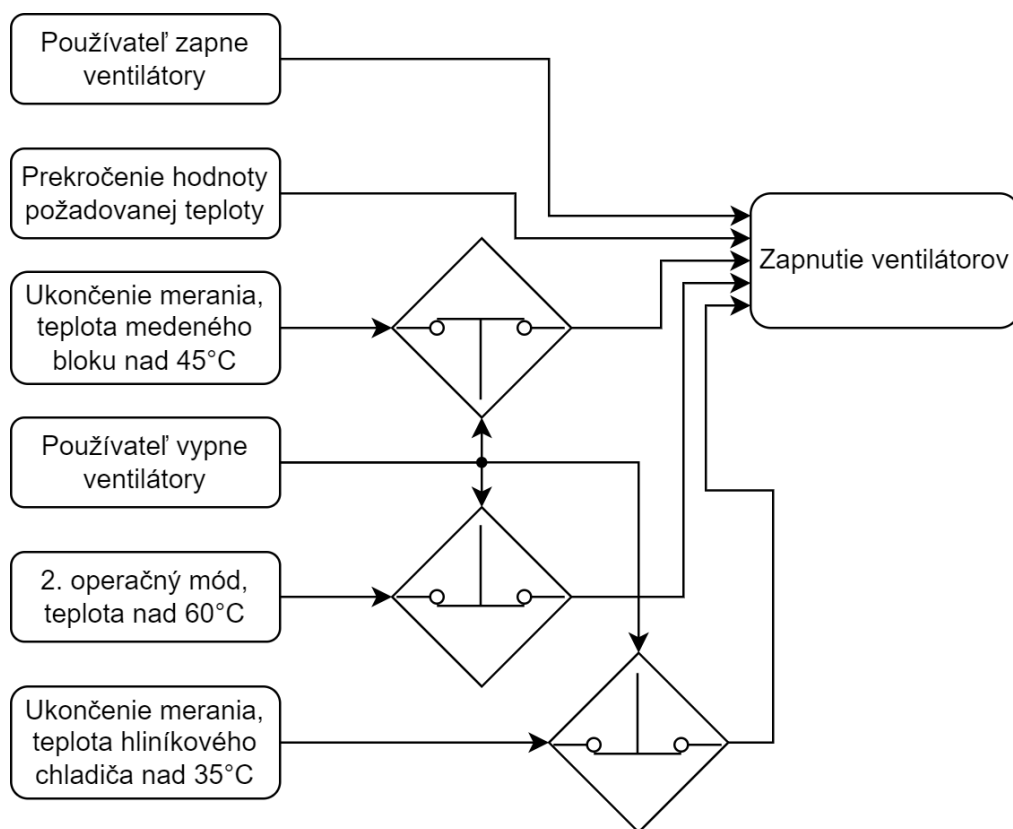
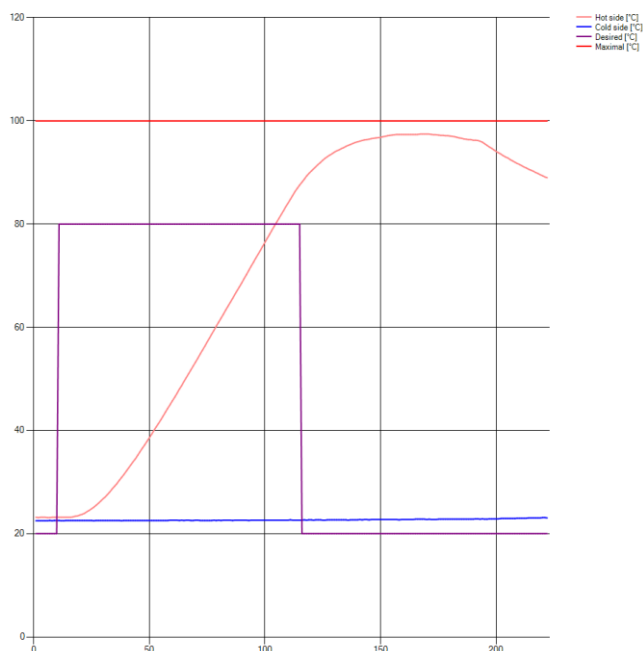


Schéma 11 Podmienky spustenia ventilátorov

Druhým problémom, ktorý sme počas procesu nášho merania zaznamenali, bolo komplikovanejšie vyhrievanie medeného bloku. Rozmery bloku (94x60x5 mm) boli pre náš merací systém vyhovujúce najmä preto, že sme mohli využiť širší výber a zvoliť viacero typov článkov a rozličné veľkosti výhrevných hlavíc. Vyššie uvedené rozmery bloku s vyvrtanými otvormi určujú celkový objem (26 767 mm³) medeného bloku. Ak by zvolili blok s menšími rozmermi a s tým priamo súvisiacim menším objemom, zaznamenali by sme zmeny a vysoké ovplyvnenie tepla bloku (poklesu tepla) pri použití väčšieho termodiferenciálneho článku (viac ako 40x40 mm). Zároveň by výrazne menší objem (napr. <4 000 mm³) skomplikoval reguláciu vyhrievania celého medeného bloku.

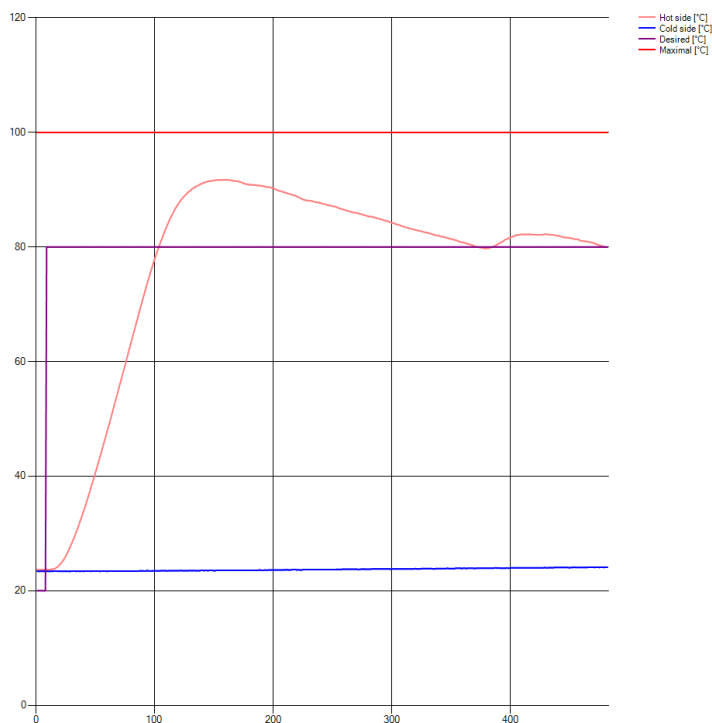
Vyhriatie použitého medeného bloku pomocou 90 W zdroja trvalo približne 90 sekúnd bez termodiferenciálneho článku (naprázdno). Navyše tento 90 W zdroj bol zdieľaný s dvoma ventilátormi, ktoré počas vyhrievania neboli zapnuté. Prechod tepla od výhrevných telies až do stredu bloku, kde sa nachádzal snímač teploty DS18B20, trval istý čas. Čas tohto prechodu tepla sme zisťovali tak, že sme z počiatočnej teploty okolia (24 °C) nastavili požadovanú teplotu vyhrievania na 80 °C po 10 sekundách od začiatku merania. Čas ustálenia teploty, čiže moment, kedy už teplota nebude stúpať, budeme merať od času vypnutia vyhrievania. Výsledný čas bude tvoriť prechod tepla v rámci bloku.



Graf 1 Pribeh tepla - bez regulácie

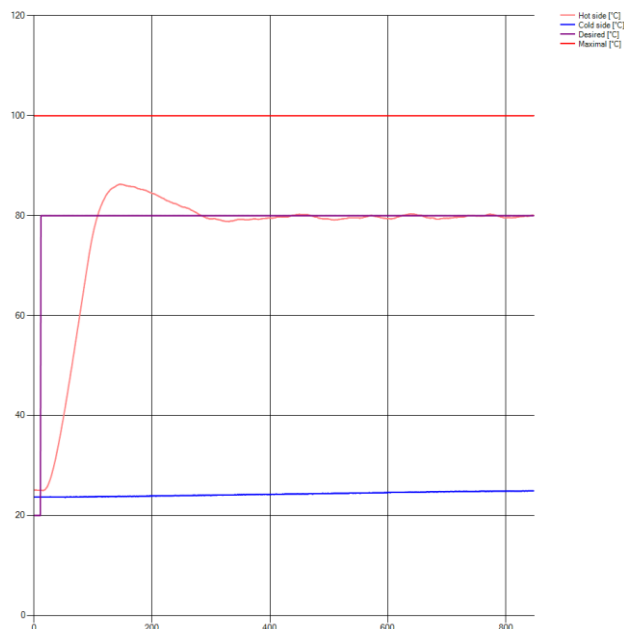
Na Grafe 1 môžeme vidieť oneskorenie presunu tepla do stredu medeného bloku v čase od momentu zapnutia výhrevných hlavíc, kde x-ová os znázorňuje čas v sekundách a y-ová os teplotu v °C. Modrá čiara nám ukazuje teplotu studenej strany (hliníkový chladič), svetločervená znamená teplotu stredu medeného bloku. Tmavočervená čiara nám znázorňuje maximálnu teplotu a fialová čiara požadovanú teplotu. Vyhriatie na požadovanú teplotu trvalo približne 90 sekúnd. V čase dosiahnutia požadovanej teploty, mikrokontrolér ESP32 vypol výhrevné telesá. Požadovanú teplotu sme po chvíli nastavili naspäť na 20 °C, aby sa nedošlo k spusteniu vyhrievania. Teplota vyhrievaného medeného bloku dosiahla až 97,37 °C a následne začala pomaly klesať. Je nežiadúce, aby bol rozdiel (17,37 °C) medzi požadovanou teplotou (80 °C) a dosiahnutou teplotou (97 °C) tak vysoký bez zapojeného termočlánku. Upravili sme preto program na mikrokontroléri tak, aby znížil výkon v prípade,

ak sa teplota v strede medeného bloku bude približovať k požadovanej teplote (v našom prípade 80 °C). Výkon sme v tomto zmysle znížili na 1/3 z maximálnej hodnoty (90 W) pomocou impulzovej šírkovej modulácie (PWM).



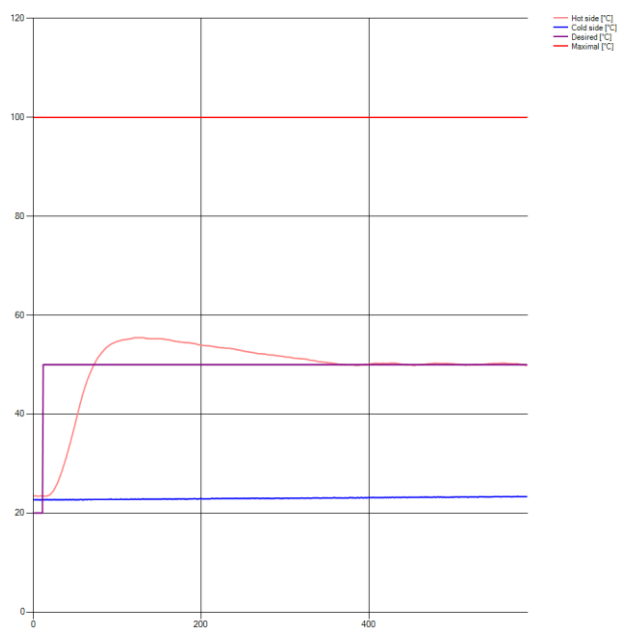
Graf 2 Pribeh tepla - jednoduchá regulácia

Z Grafu 2 môžeme vidieť priebeh vývoja teploty. Na začiatku je priebeh hodnôt podobný tým, ktoré sme získali v predchádzajúcom meraní. Získané teplotné hodnoty boli však stále vysoko nad požadovanou teplotou 80 °C. Dosiahnutú teplotu sme znížili obmedzením výkonu vyhrievania pomocou PWM regulácie a najvyššia nameraná teplota dosiahla hodnotu 88,02 °C. Keď teplota klesla pod hodnotu 80 °C, mikrokontrolér spustil vyhrievanie. Tým sme dosiahli najnižšiu teplotu 79,68 °C. Teplota sa následne čiastočne zvýšila a obmedzením výkonu prostredníctvom PWM regulácie sa ustálila na hodnote 82,26 °C. Ďalším rozhodnutím v procese merania bolo doladenie vyhrievania medeného bloku. Ak bude rozdiel teplôt menší, výkon vyhrievacích telies bude nižší. Ak bude rozdiel teplôt menší ako 3 °C, výkon bude nižší o 92,15% z maximálnej hodnoty. Po tejto úprave sme dosiahli nasledujúce výsledky (Graf 3).



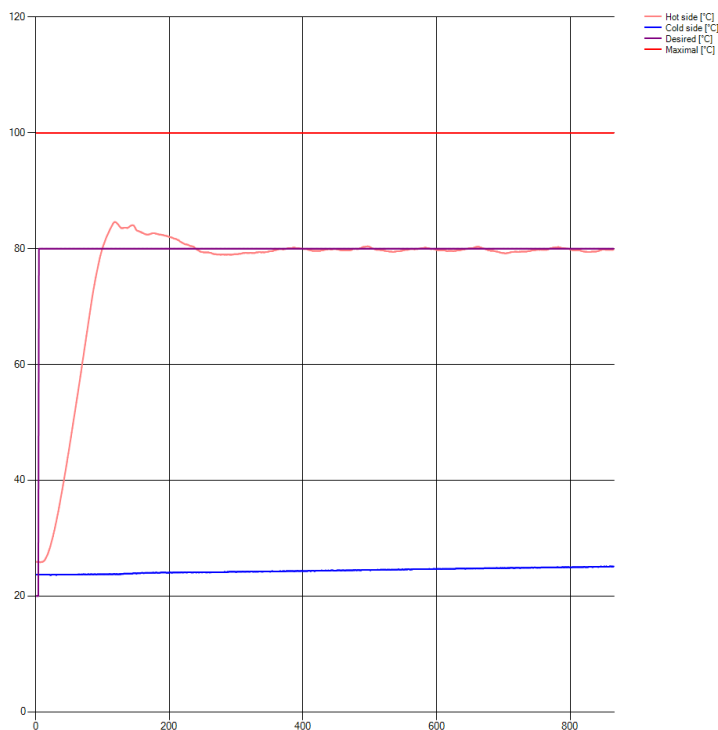
Graf 3 Pribeh tepla - zložitejšia regulácia

Ako vidíme z predchádzajúceho Grafu 3, dosiahli sme vyhovujúce ustálenie teploty. Teplota sa pohybovala v rozpätí 79 °C až 80,4 °C. Pre získanie lepších výsledkov ustálenia teploty sme čas merania zdvojnásobili (zo 400 s na 800 s). Výsledné ustálenie teploty sme dosiahli podľa našich očakávaní. Otestovali sme nastavenie PWM aj pri požadovanej teplote 50 °C (Graf 4).



Graf 4 Pribeh teploty pri 50 °C - zložitejšia regulácia

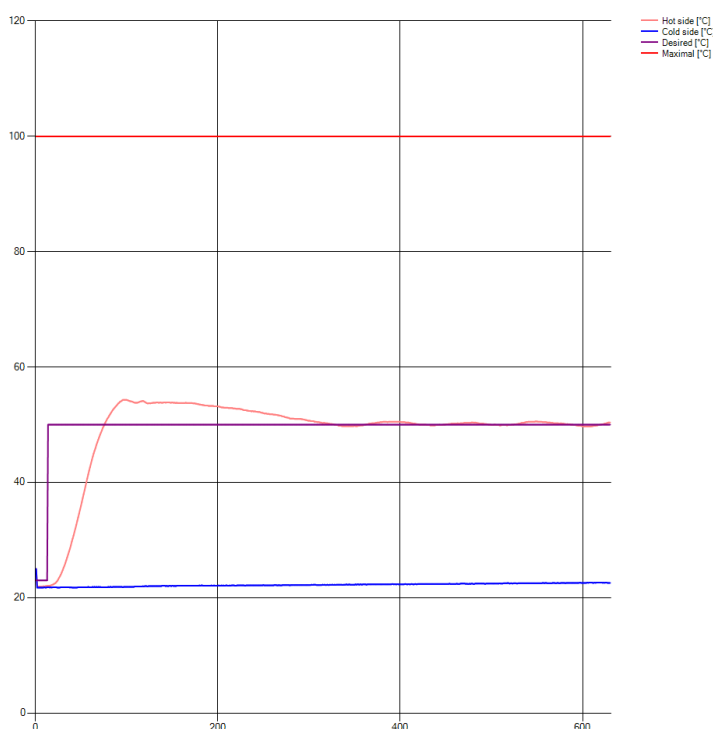
Z vyššie uvedeného Grafu 4 môžeme vidieť, že pri nižšej požadovanej hodnote teploty 50 °C, dosiahlo ustálenie teploty podľa nášho predpokladu. Najvyššia dosiahnutá nameraná teplota dosiahla hodnotu 55,44 °C a po jej ustálení predstavovala hodnoty v rozmedzí 49,88 °C až 50,31 °C. Zistili sme, že maximálna dosiahnutá teplota sa pri požadovanej teplote 80 °C v porovnaní Grafu 3 a Grafu 4, takmer nezmenila. Nachádzala sa v rozmedzí do 10% z nastavenej hodnoty (88,14 °C). Podobne sa takmer nezmenila pri požadovanej teplote 50 °C, zostala takisto v rozmedzí do 10% z nastavenej hodnoty (55,44 °C). Tento poznatok sa pri kalibrácii meracieho systému v oboch požadovaných teplotách zhodoval. Ak by sme obmedzili výkon prvého vyhrievania medeného bloku, predĺžil by sa potrebný čas na dosiahnutie požadovanej teploty. Preto sme zvolili spôsob použitia ventilátorov, ktoré aktívne (automaticky pomocou mikrokontroléra) schladili medený blok v prípade, keď teplota stúpala o 4 °C v porovnaní s požadovanou teplotou.



Graf 5 Priebeh teploty - zložitejšia regulácia s aktívnym chladením

Keď teplota dosiahla o 4 °C vyššiu hodnotu než bola požadovaná, zaznamenali sme skokový pokles teploty dvakrát za sebou (Graf 5). Dôvodom dvojitého poklesu bolo vyrovnanie teplôt. Najvyššie nameraná teplota bola 84,62 °C, následne klesla na 83,56 °C. Ventilátory sa zapli pri 84 °C, čo bolo príčinou poklesu teploty. Keďže teplota klesla pod 84 °C, ventilátory sa automaticky vypli. Teplota znova stúpala na 84,06 °C, čo spôsobilo opätovné

zapnutie ventilátorov. Skrátili sme tak dobu dosiahnutia požadovanej teploty a tým sme zabránili prekročeniu stanovenej hranice teploty.



Graf 6 Pribeh tepla pri 50 °C - zložitejšia regulácia s aktívnym chladením

Podobne sme sa pokúsili skrátiť dobu ustálenia požadovanej teploty týmto spôsobom kalibrácie a s aktuálnym nastavením programu mikrokontroléra pri požadovanej teplote 50 °C (Graf 6). Výsledkom boli, podobne ako pri 80 °C, zaznamenané dva náhle poklesy teploty.

4.6 Postup pri meraní

Meranie sme začali **výberom termodiferenciálneho článku** (bez uprednostnenia nejakého konkrétneho typu). Uistili sme sa, že meracie zariadenie je **odpojené** a vrchná časť meracieho systému je teplotou blízka okolitej teplote. V prípade, ak by bola vrchná časť meracieho systému teplá, bolo by potrebné počkať až do jej vychladnutia.

Vybraný **článok sme umiestnili (položili) na hliníkový chladič**. Vodiče z termočlánku sme vložili do svorky a utiahli pomocou skrutkovača. Po pripojení sme termočlánok umiestnili čo najbližšie k stredu medeného vyhrievacieho bloku. K meraciemu systému sme zapojili kábel USB typu C do rovnakého typu konektora. Mikrokontrolér ESP32 by mal svietiť na červeno a nemala by blikať žiadna LED dióda. Po úspešnom spárovaní počítača a

mikrokontroléra ESP32 pomocou Bluetooth komunikácie, sme otvorili počítačový program pre meranie. Skontrolovali sme sériové komunikačné porty (COM ports) a v nastaveniach aplikácie sme zvolili dané porty s mikrokontrolérom ESP32. V prípade, ak by sme v nastaveniach aplikácie žiadne sériové porty nevideli, použili by sme tlačidlo “Refresh”. Pokiaľ sme v aplikácii vybrali COM porty, klikli sme na tlačidlo “Connect” a týmto spôsobom sme sa **pripojili k mikrokontroléru**.

Po úspešnom pripojení sme si v nastaveniach aplikácie **skontrolovali** maximálnu a požadovanú **teplotu**, pričom maximálna by nemala presahovať 100 °C. V aplikácii sme nastavenia teploty potvrdili tlačidlom ENTER. V prípade, ak by sme nastavenia nepotvrdili, boli by sme upozornení textom na obrazovke počítača, že údaje sme zmenili, ale neodoslali. To znamená, že aplikácia nás upozornila na potvrdenie zmeny, aby program mohol poslať tieto údaje do mikrokontroléra.

V ďalšom kroku nášho postupu sme **nastavili použitý odpor**, ktorý v našom prípade predstavoval hodnotu 8,22 Ω . Ak by sme neurčili cestu uloženia údajov, dané údaje by nebolo možné exportovať. V našom meraní sme si ako cestu uloženia vybrali pracovnú plochu, kam budeme exportovať namerané a vypočítané údaje. Nakoniec sme si v nastaveniach vybrali jeden z dvoch operačných módov, čiže spôsobov merania.

Prvý operačný mód nastavil hodnotu požadovanej teploty a mikrokontrolér udržiaval vyhrievací medený blok na danej teplote. V prípade, ak by teplota medeného bloku presiahla požadovanú hodnotu, mikrokontrolér by vypol vyhrievacie telesá.

Naopak **druhý operačný mód** zaznamenával aktuálnu teplotu a teplotu studenej strany (hliníkový chladič). Mikrokontrolér si načítal požadovanú teplotu a tú pripočítal k hodnote studenej strany. Takto získal mikrokontrolér ESP32 výslednú požadovanú hodnotu teploty vyhrievaného medeného bloku. Ostatné hodnoty posielal merací systém presne tak ako v prvom operačnom móde, cez Bluetooth do aplikácie.

Kontrolou sme zistili, že všetky potrebné a požadované parametre boli nastavené, preto sme pomocou motora pritlačili termočlánok k medenej ploche. Motor bol ovládaný dvoma tlačidlami v aplikácii, označenými žltou farbou a šípkou smeru pohybu. Až v tomto bode mohol byť zapojený napájací konektor so zdrojom, v našom prípade 20 V, 4,74 A.

Spustenie merania sme vykonali tlačidlom “Start measurement”. Počas merania bolo možné meniť určité nastavenia, ako napríklad požadovanú teplotu, a tým upravovať priebeh merania. Na ľavom grafe môžeme vidieť nastavené hodnoty v programe, pričom grafy na pravej strane sú údaje z meracieho systému. Počas merania sme **nemohli manipulovať** s meracím systémom. Mohlo by to spôsobiť odchýlku pri meraní, poškodenie meracieho systému alebo až možné zranenia kvôli práci s vyššou teplotou.

V práci so skonštruovaným meracím zariadením bolo nevyhnutné využívať naše teoretické vedomosti, poznatky a fyzikálne vzorce, ktoré sme uplatnili v programe mikrokontroléra a v aplikácii. Počas merania sme na výpočty používali nasledovné vzorce:

Ohmov zákon:

$$I [A] = \frac{U [V]}{R [\Omega]} \quad (6)$$

kde: I – prúd

U - napätie

R - odpor

Výpočet výkonu:

$$P [W] = I[A] \cdot U [V] \quad (7)$$

Výpočet množstva energie:

$$E [Wh] = \frac{P_{celk}}{t [s]} \quad (8)$$

kde: P_{celk} - súčet výkonov

t - čas hodiny v sekundách

Výpočet rozdielu teplôt:

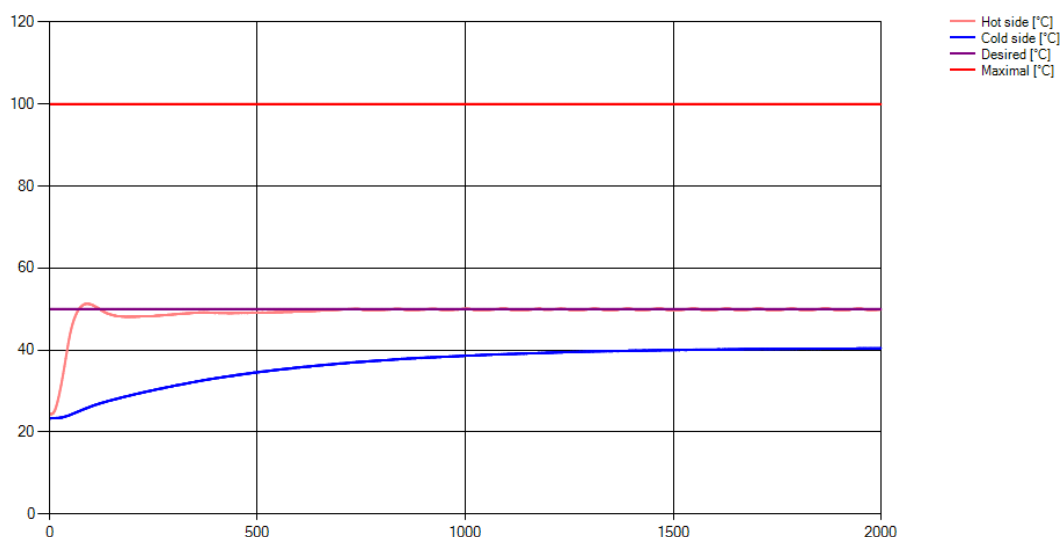
$$\Delta T [^{\circ}C] = T1 [^{\circ}C] - T2 [^{\circ}C] \quad (9)$$

kde: T1 - teplota vyhrievanej časti (medený blok)

T2 - teplota studenej strany (hliníkový chladič)

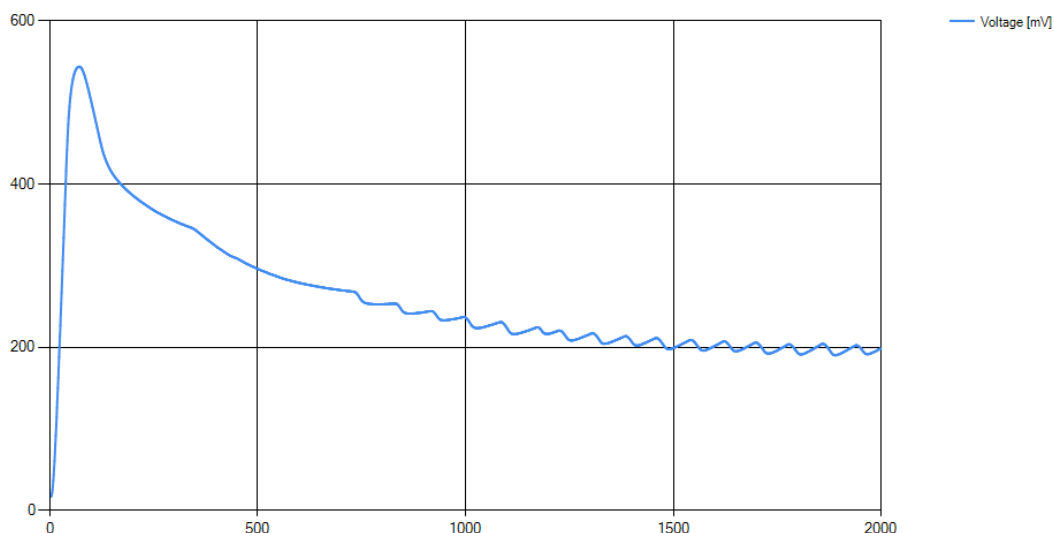
4.7 Výsledky merania prvého termočlánku pri 50 °C

Výsledky prvého merania obsahovali zaznamenané dynamické vlastnosti z termodiferenciálneho článku TEC1-12709. Prvá požadovaná teplota bola 50 °C. Ako môžeme vidieť z nasledujúceho Grafu 7, teplota medeného bloku bola 24 °C a teplota hliníkového chladiča bola 23 °C. Najvyššiu dosiahnutú teplotu sme zaznamenali v 89. sekunde s hodnotou 51,31 °C. Teplotný priebeh sa ustálil až takmer v 12. minúte (717 sekúnd), pričom rozsah teplôt sa pohyboval v rozmedzí 50,06 °C až 49,75 °C. Teplota hliníkového chladiča sa značne zvyšovala do 21. minúty (1260 sekúnd) a ustálila sa na hodnote blízkej 40 °C.



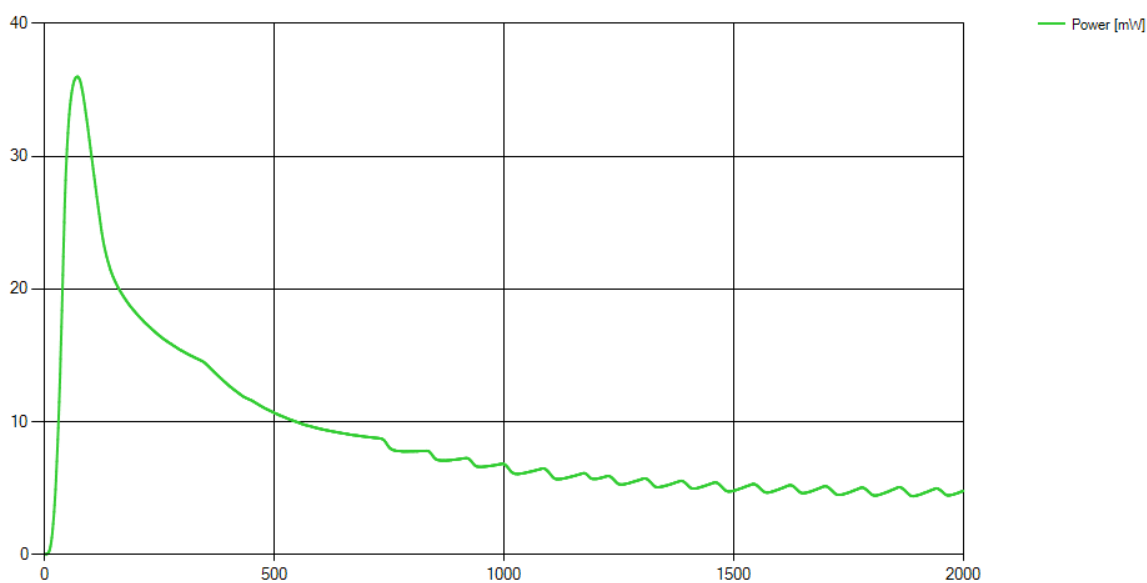
Graf 7 Priebeh teploty pri 50 °C TEC1-12709

V meraní napätia sme zaznamenali rýchle zvýšenie (Graf 8), ktoré sa získalo pomocou transformácie teplotného rozdielu. Po dosiahnutí maximálneho teplotného rozdielu (25,49 °C), kde bolo 544,00 mV, začalo napätie klesať. Pri klesaní v 12. minúte (720 sekúnd) sme videli skokové zníženie napätia až do konca merania. Tento jav bol spôsobený neustálym ohrievaním hliníkového chladiča. Hliníkový chladič sa zahrieval v dôsledku prenosu tepla z vyhrievaného medeného bloku cez termodiferenciálny článok.



Graf 8 Priebeh napätie pri 50 °C TEC1-12709

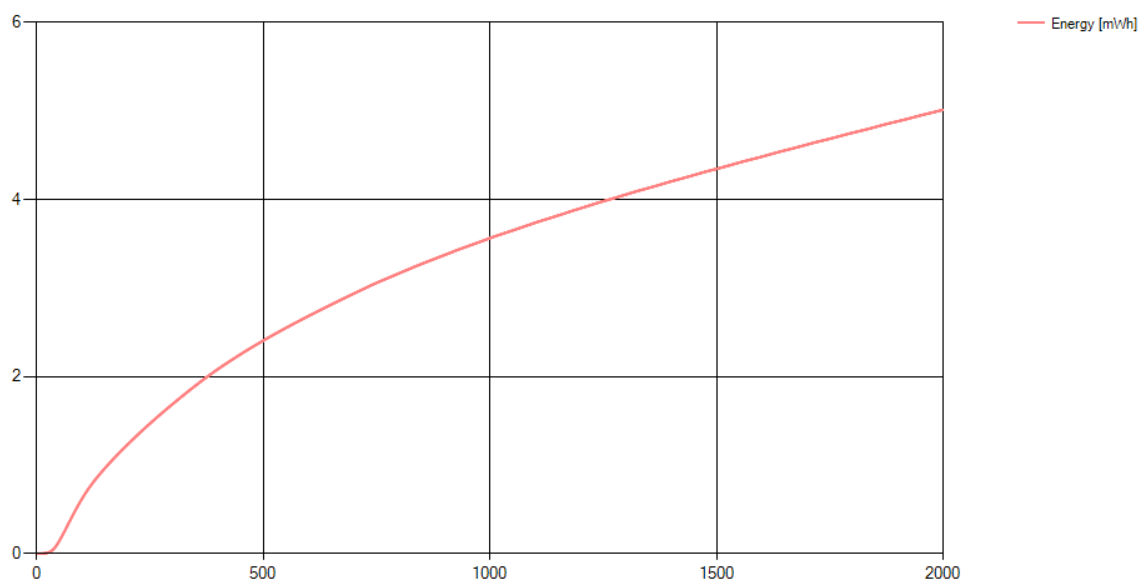
Zo známeho odporu a meraného napätia sme získali prúd. Elektrický prúd sme nezaznamenali do grafov, ale násobili sme ho spolu s meraným napätím z dôvodu, aby sme získali výkon. Tým, že výkon vypočítame z napätia, priebeh výkonu bol rovnaký ako priebeh napätia. Najvyšší vypočítaný výkon (36,663 mW) sme zaznamenali v rovnakom čase ako najvyššie namerané napätie (Graf 9).



Graf 9 Priebeh výkonu pri 50 °C TEC1-12709

Dôležitým údajom bolo aj množstvo získanej energie. Tú sme dokázali vypočítať na základe toho, že sme spočítali všetky hodnoty vypočítaného výkonu a tento súčet sme delili hodinou

(v sekundách). V priebehu merania sme videli prudké stúpanie vygenerovanej energie v mWh. Toto rýchle stúpanie sa postupne začalo spomaľovať od 71. sekundy merania (Graf 10).



Graf 10 Priebeh energie pri 50 °C TEC1-12709

Na konci merania prvého článku sme zaznamenali hodnoty, ktoré sme vložili do prehľadnej tabuľky aj s jednotkami, v ktorých boli údaje zaznamenané. Z tabuľky môžeme vyčítať výstupné hodnoty prvého merania, ako sú napätie, prúd, výkon, teploty a čas. Tabuľka 7 obsahuje aj hodnoty, ktoré sa nenachádzajú v grafoch (napríklad priemerný teplotný rozdiel). Dôvodom exportovania tejto tabuľky bol predpoklad, že z grafického znázornenia hodnôt by nemuselo byť zrejmé, o aké presné hodnoty merania sa jedná.

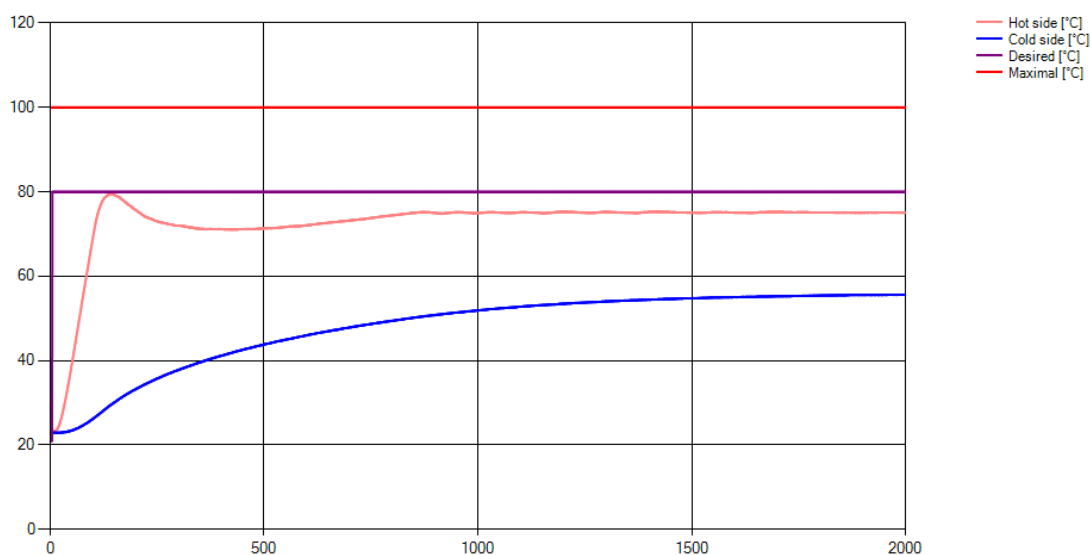
Tabuľka 7 Výstupné hodnoty pri 50 °C TEC1-12709

Výstupné hodnoty z aplikácie		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Napätie	198,5	mV
Prúd	24,15	mA
Výkon	4,79	mW
Energia	5,01	mWh
Teplota med. bloku	49,88	°C
Teplota chladiča	40,5	°C

Teplotný rozdiel	9,38	°C
Čas merania	2000	s
Priemerný tep. roz.	12,59	°C
Priemerná tep. med. bloku	49,18	°C
Priemerná tep. chladiča	36,6	°C

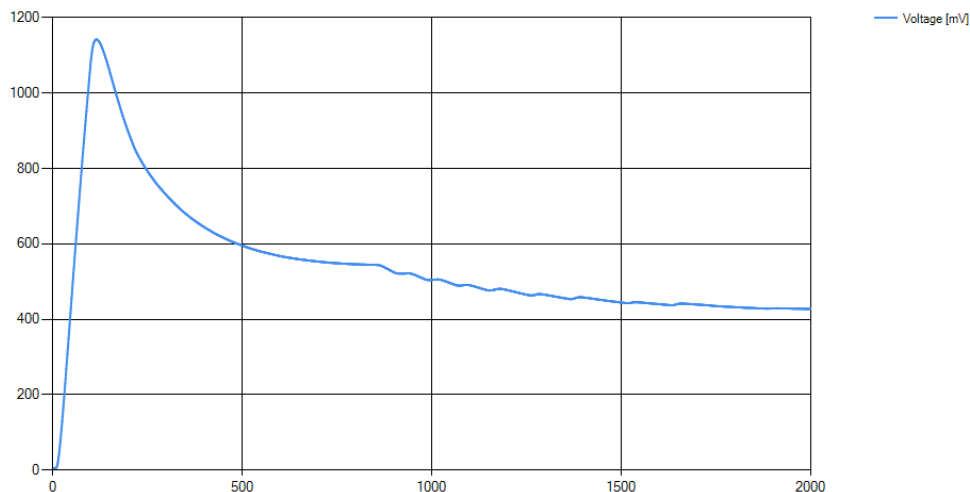
4.8 Výsledky merania prvého termočlánku pri 80 °C

S rovnakým termočlánkom TEC1-12709 sme urobili rovnaký typ merania, ale s vyššou požadovanou teplotou (80 °C). Článok sme nemuseli z meracieho systému vyberať, čiže pomocou motora oddeliť termočlánok od medeného bloku. Počkali sme, kým merací systém vychladne na teplotu blízku teplote okolia. Začali sme meranie a nastavili sme požadovanú teplotu na 80 °C. Predpokladali sme, že sa na teplotu 80 °C dostaneme v rámci dvoch minút. Ako je vidno z nasledujúceho Grafu 11, termočlánok danú teplotu nedosiahol. Maximálna zaznamenaná hodnota teploty bola 79,44 °C až v 140. sekunde. Následne táto teplota klesla na 71,12 °C približne v 6. minúte (380 sekúnd) od začiatku merania. V 14. minúte mierne stúpila na hodnotu 75,00 °C, kde sa udržala po zvyšok merania. Dôvodom, prečo sme nedosiahli požadovanú teplotu, bol prenos tepla z medeného bloku cez termočlánok do chladiča. Tento jav je možné vidieť na priebehu zaznamenávanej teploty chladiča. Ten sa postupne ohrieval až do približne 26. minúty (1571 sekúnd) na teplotu 55 °C.



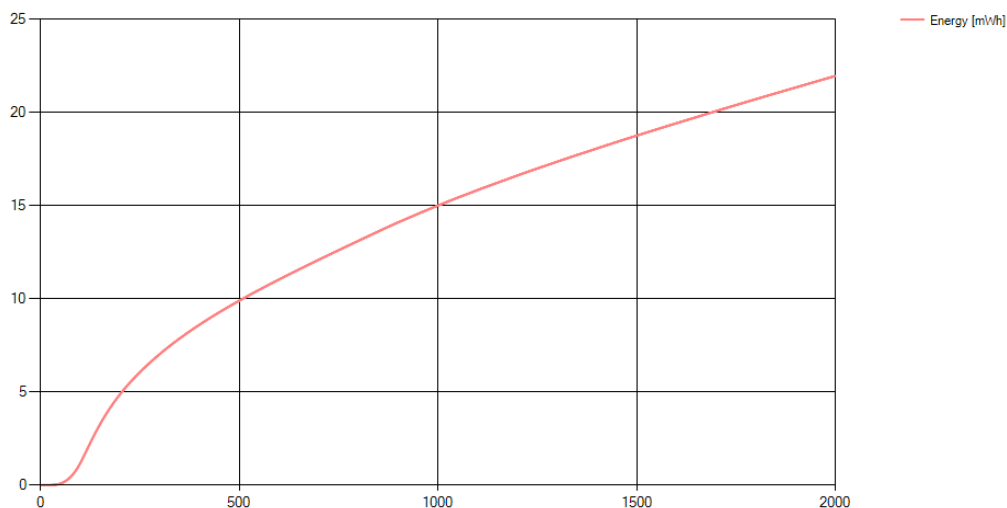
Graf 11 Priebeh teploty pri 80 °C TEC1-12709

Priebeh napätia termočlánku TEC1-12709 dosiahol maximálnu hodnotu 1142,42 mV v 115. sekunde merania, kde rozdiel teplôt dosahoval hodnotu 48,68 °C. Toto napätie začalo prudko klesať do 6. minúty (385 sekúnd). V tomto bode klesanie hodnoty napätia začalo spomaľovať až do napätia o hodnote 543,88 mV (860 sekúnd). V tejto fáze začalo napätie skokovito klesať (Graf 12).



Graf 12 Priebeh napätia pri 80 °C TEC1-12709

Priebeh zaznamenaného výkonu bol podobný priebehu napätia, takže tento priebeh meraných hodnôt nemusíme uvádzať. Množstvo získanej energie (Graf 13) sa zväčšovalo rýchlejšie oproti minulému meraniu z dôvodu väčšieho rozdielu teplôt. Priebeh zväčšujúcej sa vyrobenej energie pri požadovanej teplote 80 °C bol lineárnejší v porovnaní s meraním, pri ktorom sme požadovanú teplotu nastavili na 50 °C.



Graf 13 Priebeh energie pri 80 °C TEC1-12709

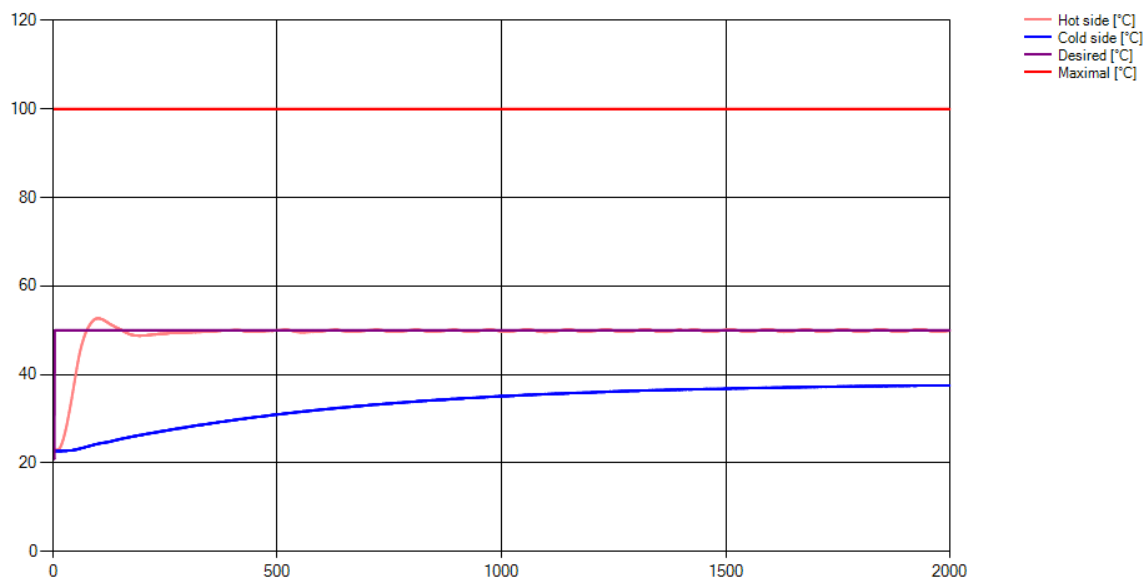
Z Tabuľky 8 vidieť, že hodnoty napätia a prúdu boli dvakrát väčšie v porovnaní s predchádzajúcim meraním termočlánku TEC1-12709. Požadovaná teplota bola 1,6 x vyššia (50 - 80 °C), ale rozdiel medzi teplotou okolia (~24 °C) a požadovanou teplotou bol v meraniach až 2,15-násobný (26 - 56 °C).

Tabuľka 8 Výstupné hodnoty pri 80 °C TEC1-12709

Výstupné hodnoty z aplikácie		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Napätie	427,79	mV
Prúd	52,04	mA
Výkon	22,26	mW
Energia	22,26	mWh
Teplota med. bloku	75,06	°C
Teplota chladiča	55,63	°C
Teplotný rozdiel	19,43	°C
Čas merania	2000	s
Priemerný tep. roz.	24,76	°C
Priemerná tep. med. bloku	72,69	°C
Priemerná tep. chladiča	47,92	°C

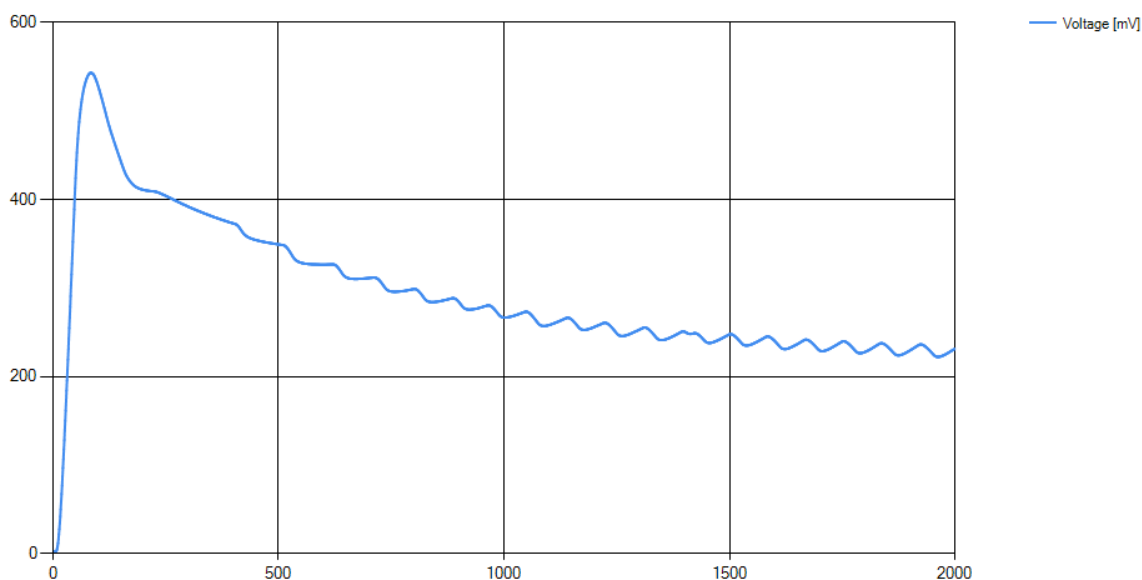
4.9 Výsledky merania druhého termočlánku pri 50 °C

Druhým zvoleným termočlánkom v našom meraní bol rovnaký typ modulu (TEC) ale iný, výkonnejší model TEC1-12715. Daný modul mal rovnaké pracovné napätie, ale bol schopný prijať väčšie množstvo elektrického prúdu v porovnaní s modulom TEC1-12709. Rozmery oboch článkov boli pritom rovnaké (40x40 mm). Začali sme rovnakým typom merania s rovnakými parametrami. Požadovanú teplotu sme nastavili na 50 °C. Maximálna zaznamenaná hodnota teploty bola 52,69 °C v čase 98. sekundy merania. Teplota sa ustálila v 6. minúte (396 sekúnd), pohybovala sa v rozmedzí 50,06 °C až 49,69 °C. Teplota chladiča sa zvyšovala až do 26. minúty (1582 sekúnd), kedy sa ustálila na teplote 37 °C (Graf 14).



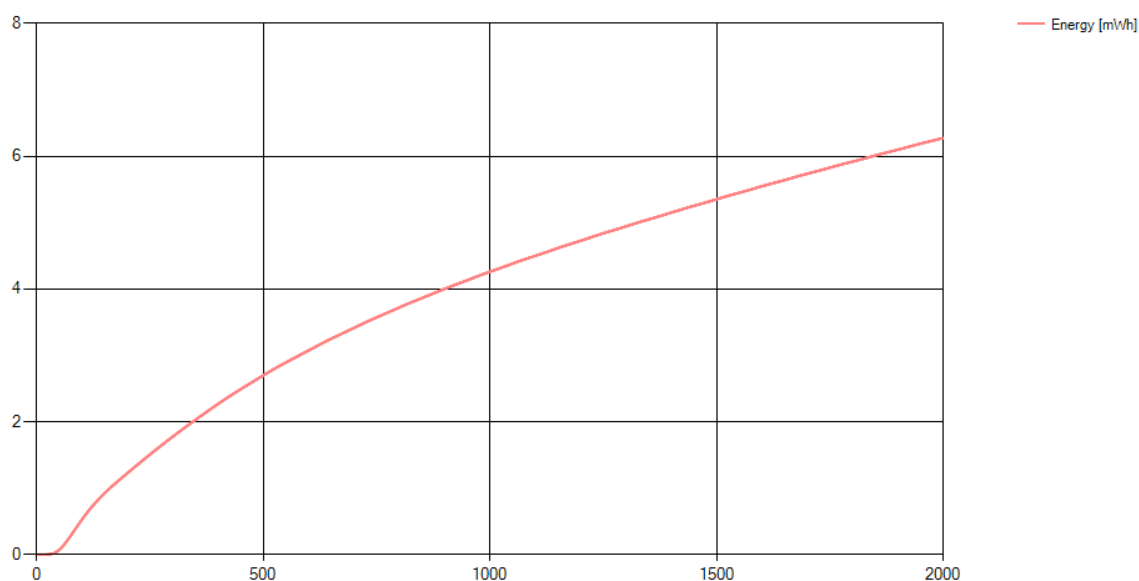
Graf 14 Priebeh teploty pri 50 °C TEC1-12715

Priebeh zaznamenávaného napätia článku TEC1-12715 sa dostal na maximálnu hodnotu 543,20 mV v čase 85 sekúnd od začatia merania. Následne vidíme krátky rapídny pokles, ktorý sa spomalil na 410,89 mV v 3. minúte merania (201 sekúnd). Nasledoval druhý, lineárny pokles, ktorý trval do skoro 7. minúty (405 sekúnd). Napätie začalo potom skákavo klesať. Všimli sme si, že TEC1-12715 sa na konci merania dostal do 43,46%-ného rozsahu z maximálnej hodnoty napätia, ale TEC1-12709 sa dostal iba na 37,13%-nú hranicu z celkového rozsahu napätia (Graf 15).



Graf 15 Priebeh napätia pri 50 °C TEC1-12715

V meraní, kde zaznamenávame množstvo vyrobenej energie článkom TEC1-12715, vidíme v Grafe 16 lineárnejší priebeh než v oboch meraní termočlánku TEC1-12709.



Graf 16 Priebeh energie pri 50 °C TEC1-12715

Aj keď v našom meraní pri požadovanej teplote 50 °C oba termočlánky dosiahli podobné maximálne napätie, TEC1-12715 mal výkon na konci merania vyšší o približne 35% ako TEC1-12709. Celkové množstvo energie, ktoré článok TEC1-12715 konvertoval, bolo 6,28 mWh, čo je približne o 25% viac než dokázal vytvoriť TEC1-12709. Myslíme si, že dôvodom by mohla byť nižšia tepelná vodivosť práve preto, lebo priemerná teplota chladiča bola nižšia. Priemerná teplota vyhrievaného medeného bloku bola vyššia. Väčší rozdiel teplôt mal za následok vyšší výkon termočlánku TEC1-12715 (Tabuľka 9).

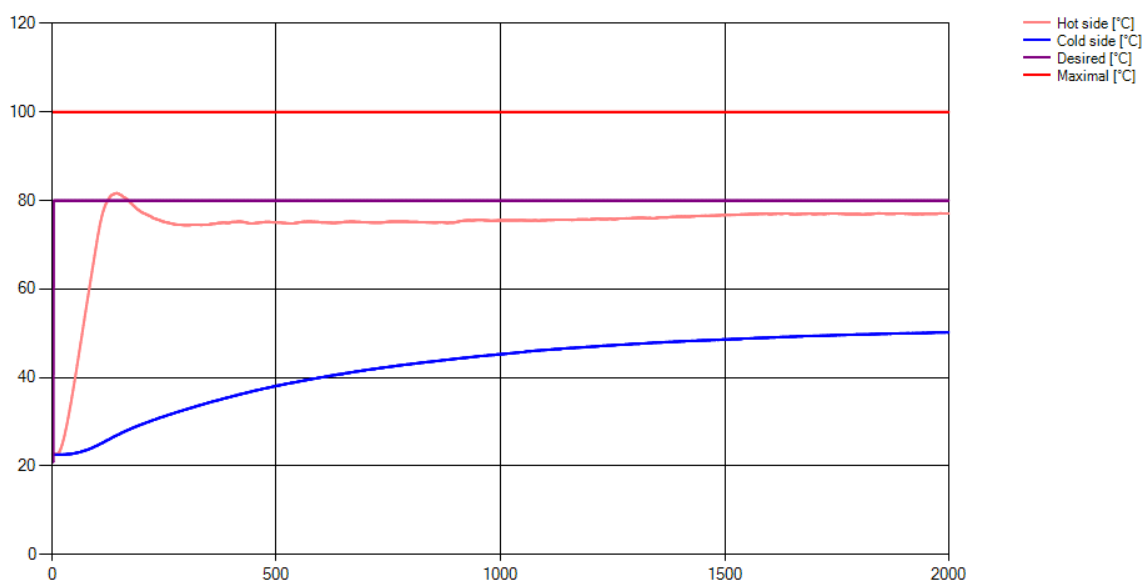
Tabuľka 9 Výstupné hodnoty pri 50 °C TEC1-12715

Výstupné hodnoty z aplikácie		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Napätie	231,26	mV
Prúd	28,13	mA
Výkon	6,51	mW
Energia	6,28	mWh
Teplota med. bloku	49,94	°C

Teplota chladiča	37,56	°C
Teplotný rozdiel	12,38	°C
Čas merania	2000	s
Priemerný tep. roz.	15,89	°C
Priemerná tep. med. bloku	49,32	°C
Priemerná tep. chladiča	33,43	°C

4.10 Výsledky merania druhého termočlánku pri 80 °C

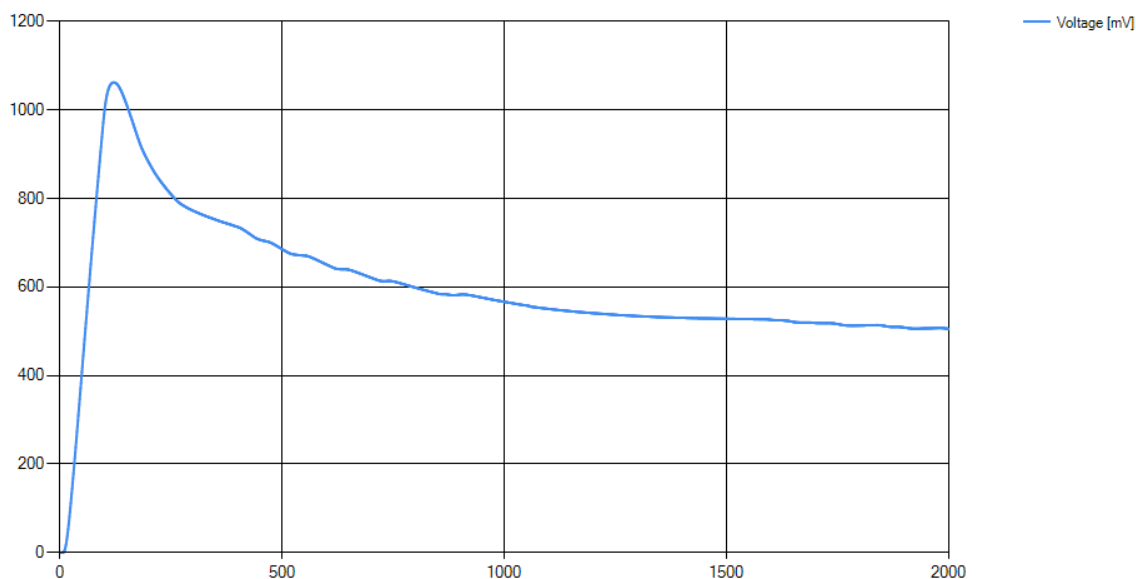
V druhom meraní článku TEC1-12715 pri požadovanej teplote 80 °C (Graf 17) sme mali veľmi podobný priebeh teplôt ako pri druhom meraní článku TEC1-12709. Tu však maximálna teplota dosiahla hodnotu 81,69 °C v 2. minúte merania. Teplota následne klesla na hodnotu 74,44 °C. Neskôr sa zvyšovala až tak, že na konci merania dosiahla hodnotu 77,12 °C. Teplota hliníkového chladiča sa postupne zvyšovala a ustálila sa na hodnote 50,25 °C.



Graf 17 Priebeh teploty pri 80 °C TEC1-12715

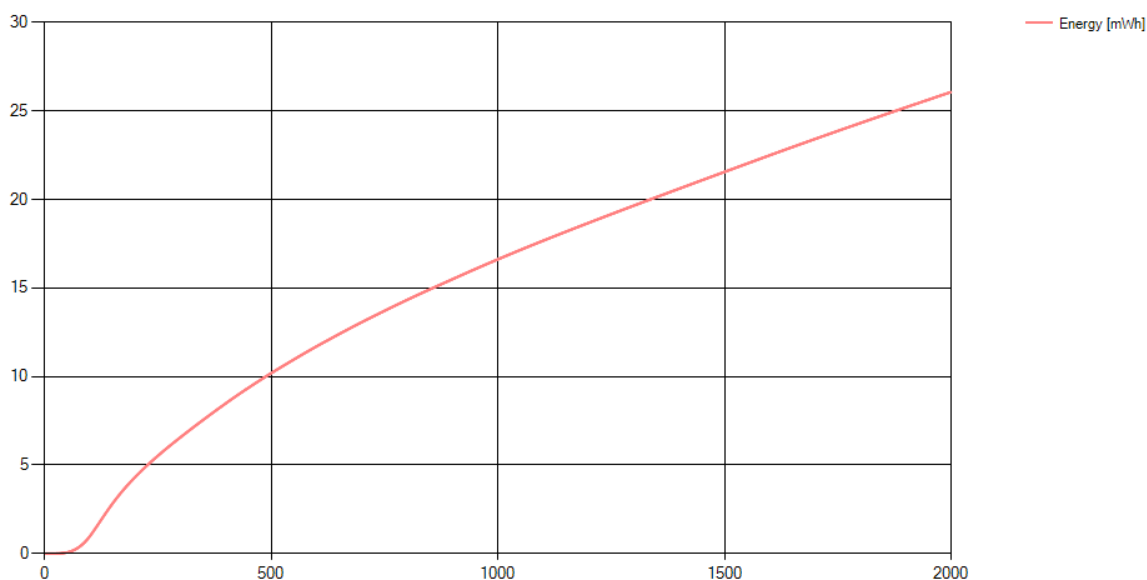
Termočlánok TEC1-12715 dosiahol najvyššie napätie 1062,52 mV v 2. minúte od začatia merania (podobne ako TEC1-12709). Nasledoval prudký pokles napätia, ktorý sa začal vyrovnávať v 5. minúte. V tomto meraní (Graf 18) sme si všimli, že takmer vôbec

nedochádzalo ku intermitentnému napäťovému klesaniu tak ako v predchádzajúcich napäťových priebehoch. Práve naopak, priebeh klesania napätia bol lineárny.



Graf 18 Priebeh napätia pri 80 °C TEC1-12715

V Grafe 19 vidíme prudšie stúpajúce množstvo vyrobenej elektrickej energie. Približne od 5 mWh sme zaznamenali pokles, ktorý pokračoval až do konca merania.



Graf 19 Priebeh energie pri 80 °C TEC1-12715

Pri porovnaní exportovaných údajov (Tabuľka 10) z aplikácie vidíme, že napätie článku TEC1-12715 na konci merania bolo väčšie približne o 18% v porovnaní s TEC1-12709.

Zásadným rozdielom bol aj výkon na konci merania, ktorý dosahoval rozdiel až 39%. Opäť vidíme, že priemer teplôt termočlánku TEC1-12715 mal väčší rozdiel v porovnaní s TEC1-12709. Množstvo vyrobenej energie je zhodné s napäťovým rozdielom (18%). Dôležitým bodom je aj to, že hliníkový chladič mal pri požadovanej teplote 80 °C teplotu vyššiu iba o necelých 9 °C (8,93 °C) v porovnaní s meraním, kde požadovaná teplota bola 50 °C.

Tabuľka 10 Výstupné hodnoty pri 80 °C TEC1-12715

Výstupné hodnoty z aplikácie		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Napätie	505,62	mV
Prúd	61,51	mA
Výkon	31,1	mW
Energia	26,07	mWh
Teplota med. bloku	77,06	°C
Teplota chladiča	50,25	°C
Teplotný rozdiel	26,81	°C
Čas merania	2000	s
Priemerný tep. roz.	31,96	°C
Priemerná tep. med. bloku	74,33	°C
Priemerná tep. chladiča	42,36	°C

4.11 Výsledky merania tretieho termočlánku pri 50 °C

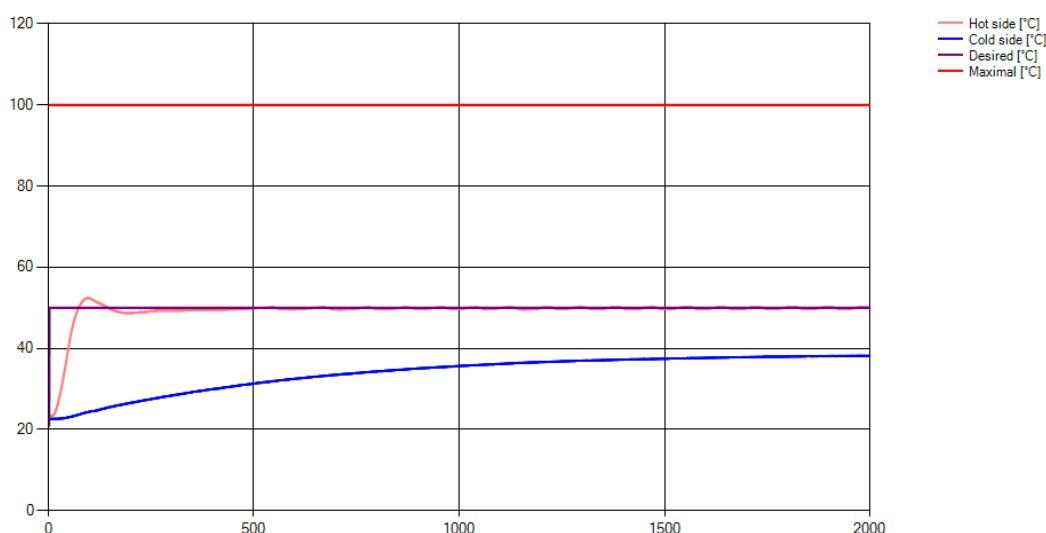
Nami vybraný termočlánok v treťom meraní je SP1848-27145 (ďalej len SP1848). Na rozdiel od predchádzajúcich typov, ktoré sú určené ako termoelektrické chladiče, tento typ článku je **termoelektrický generátor (TEG)**. Výsledkom by mal byť vyšší výkon pri rovnakých teplotných rozdieloch oproti termoelektrickým chladičom. Výrobca udáva aj tabuľku s výkonom pri rôznych teplotných rozdieloch. Tieto údaje sme si porovnali s viacerými zdrojmi, pričom každý obsahoval rovnakú tabuľku.

Tabuľka 11 Výkon termočlánku SP1848 bez záťaže, zdroj informácií: robu.in / botnroll.com

Rozdiel teplôt [°C]	20	40	60	80	100
Napätie pri otvorenom obvode [V]	0.97	1.8	2.4	3.6	4.8
Prúd pri uzavretom obvode [mA]	225	368	469	558	669

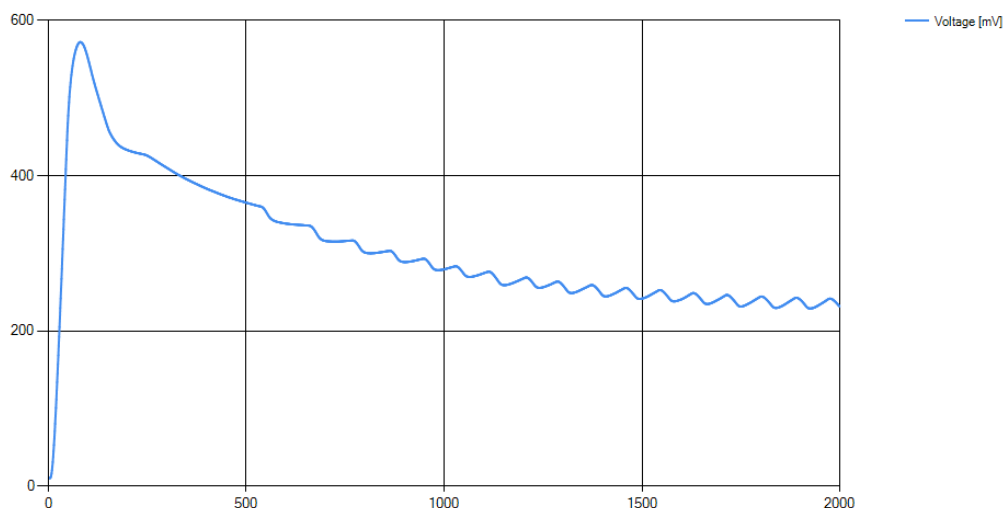
Tieto údaje **nepredstavujú reálny výkon** zariadenia. Preto je potrebné zmerať výkon tohto článku pod záťažou. Keďže náš merací systém obsahuje 8,22 Ω záťaž, môžeme povedať, že výkon zaznamenaný meracím systémom bol skutočným výkonom daného článku.

V Grafe 20 vidíme priebeh teploty, ktorej maximálna hodnota dosiahla 52,38 °C v 95. sekunde merania. Následne klesla na teplotu 48,69 °C, neskôr sa teplota pohybovala v rozmedzí 50,12 °C až 49,69 °C. Teplota chladiča sa ustálila na hodnote 38 °C.



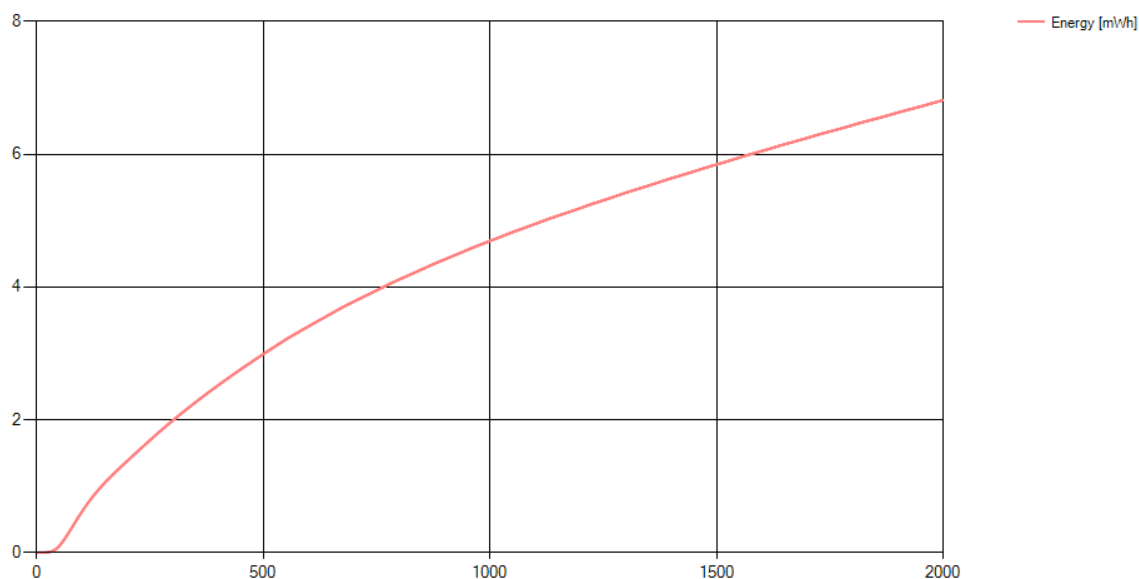
Graf 20 Priebeh teploty pri 50 °C SP1848

Priebeh napätia bol podobný predchádzajúcim meraniam s termoelektrickými chladičmi. Najvyššia zaznamenaná hodnota dosiahla 572,31 mV v 81. sekunde merania. Od najvyššej nameranej hodnoty môžeme vidieť 2 rýchle poklesy napätia, za ktorými nasleduje diskontinuálne klesanie (Graf 21).



Graf 21 Priebeh napätia pri 50 °C SP1848

Množstvo vyrobenej energie termočlánkom SP1848 je podobné množstvo energie zaznamenané z údajov merania článku TEC1-12715, hoci termoelektrický generátor transformoval väčšie množstvo energie (Graf 22).



Graf 22 Priebeh energie pri 50 °C SP1848

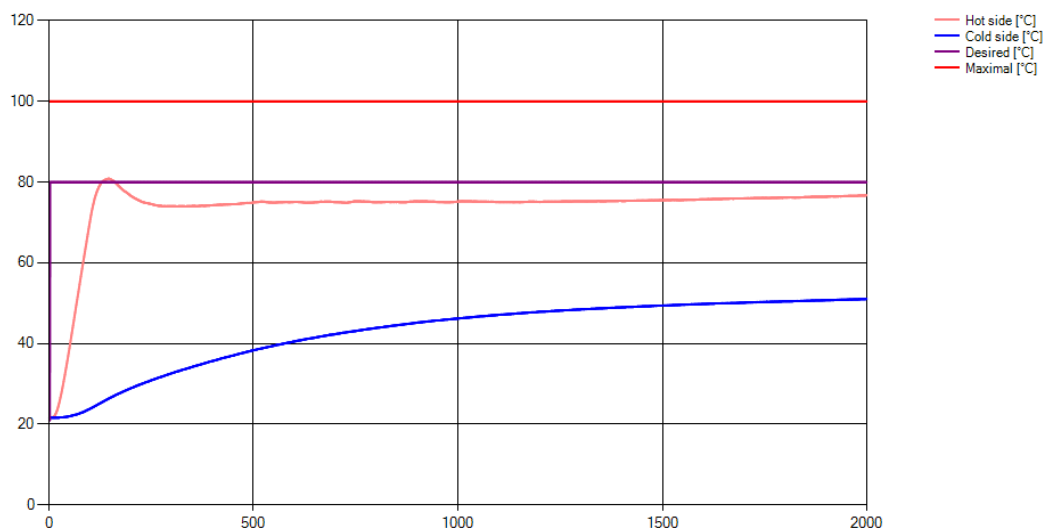
Z Tabuľky 12 vyplýva, že termočlánok SP1848 bol výkonom podobný ako termočlánok TEC1-12715. Termočlánok SP1848 mal však väčší výkon a aj väčšie transformované množstvo energie. Rozdiel bol aj v priemerných teplotách. TEC1-12715 mal nižšiu tepelnú vodivosť, čím získaval energiu z väčšieho rozdielu teplôt v porovnaní s termočlánkom SP1848.

Tabuľka 12 Výstupné hodnoty pri 50 °C SP1848

Výstupné hodnoty z aplikácie		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Napätie	231,6	mV
Prúd	28,18	mA
Výkon	6,52	mW
Energia	6,81	mWh
Teplota med. bloku	50	°C
Teplota chladiča	38,19	°C
Teplotný rozdiel	11,81	°C
Čas merania	2000	s
Priemerný tep. roz.	15,39	°C
Priemerná tep. med. bloku	49,29	°C
Priemerná tep. chladiča	33,9	°C

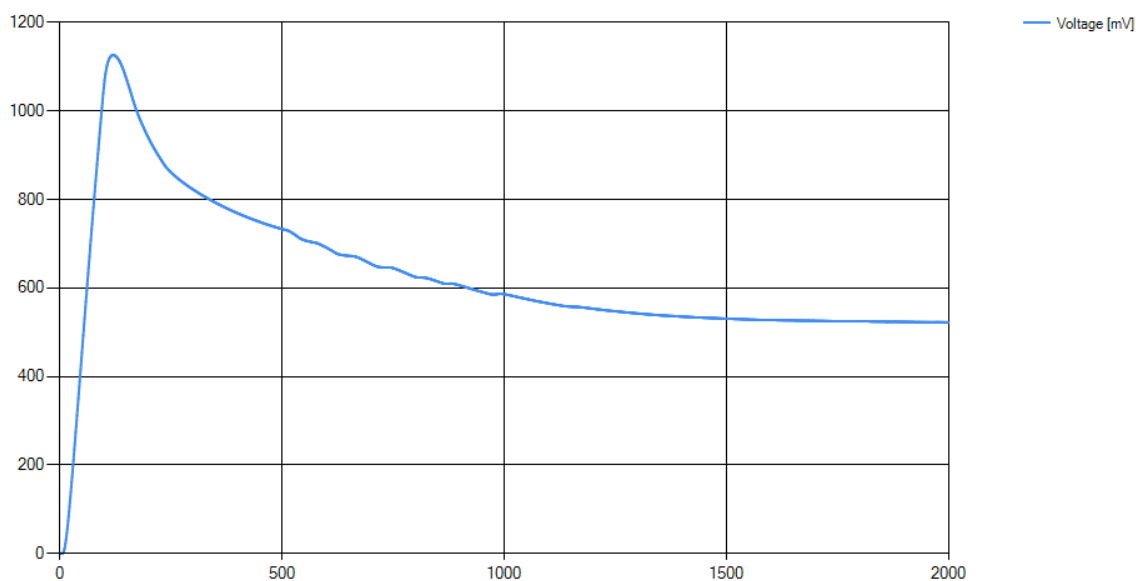
4.12 Výsledky merania tretieho termočlánku pri 80 °C

Priebeh merania teploty termočlánku SP1848 pri požadovanej teplote 80 °C pripomína priebeh zaznamenávania hodnôt termočlánku TEC1-12715. Maximálna zaznamenaná hodnota teploty v 2. minúte merania (147 sekúnd) dosiahla 80,87 °C (Graf 23).



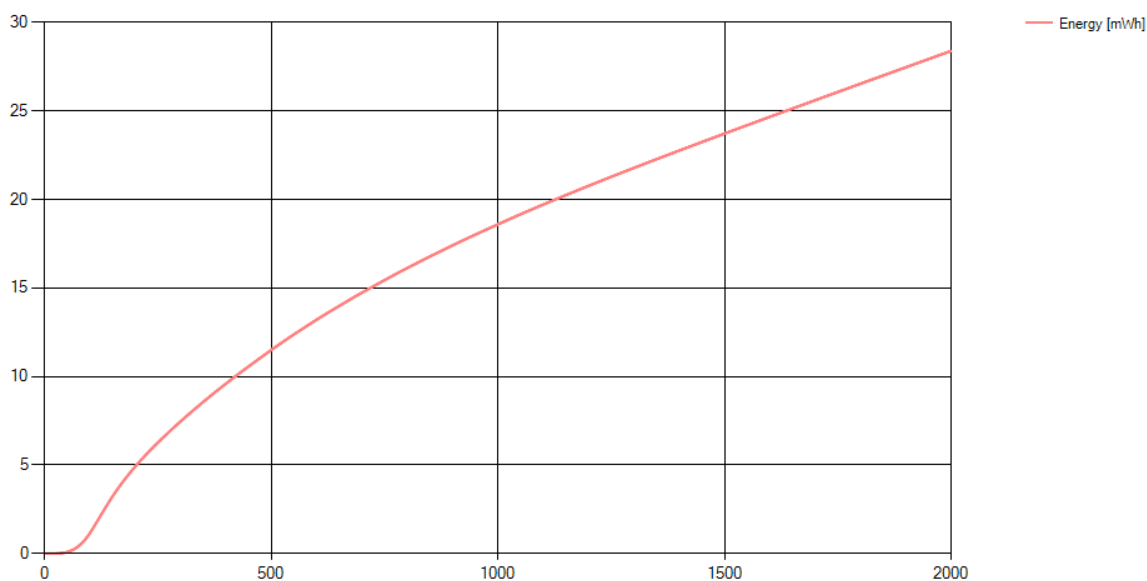
Graf 23 Priebeh teploty pri 80 °C SP1848

Najvyššia nameraná hodnota napätia bola 1126,60 mV 2 minúty od začiatku merania. Ku koncu merania napätie kleslo až na 522 mV, čo predstavuje približne 46,5% z celkového rozsahu dosiahnutého napätia (Graf 24).



Graf 24 Priebeh napätia pri 80 °C SP1848

Priebeh množstva vyrobenej energie termočlánkom SP1848 rapídne stúpal na začiatku merania. Približne v 4. minúte začal spomaľovať a od hodnoty 15 mWh sa rýchlosť stúpania ustálila (Graf 25).



Graf 25 Priebeh energie pri 80 °C SP1848

V Tabuľke 13 vidíme najvyššie zaznamenané hodnoty, napätia, výkonu a vyrobeného množstva energie počas všetkých meraní, ktoré trvali 33 minút (2000 sekúnd). Priemerný rozdiel teplôt termočlánku SP1848 bol opäť nižší v porovnaní s termočlánkom TEC1-12715, ale rozdiel teplôt bol väčší v porovnaní s TEC1-12709.

Tabuľka 13 Výstupné hodnoty pri 80 °C SP1848

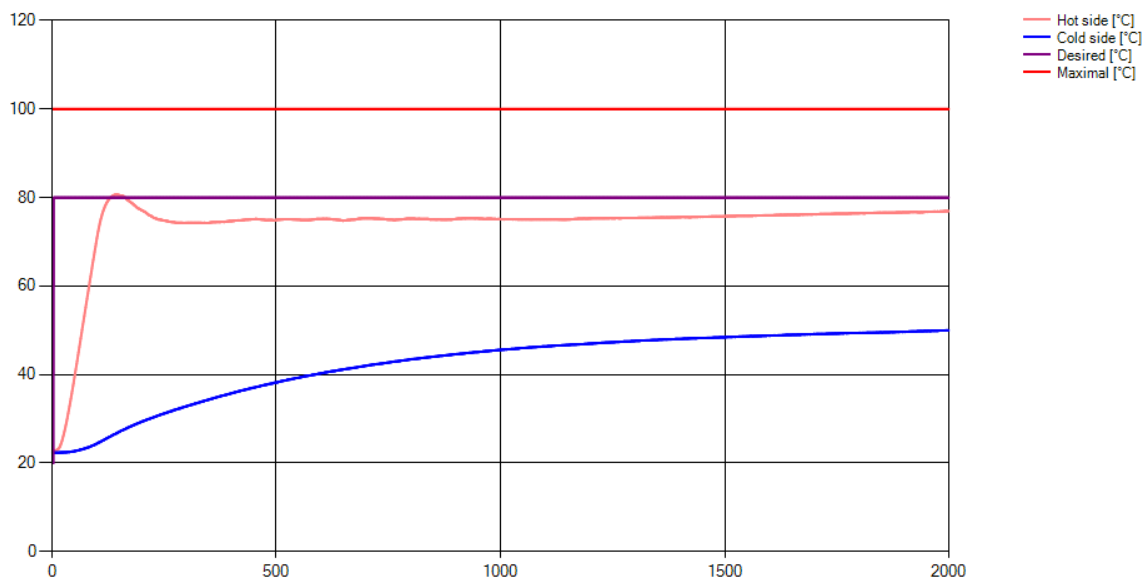
Výstupné hodnoty z aplikácie		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Napätie	522,72	mV
Prúd	63,59	mA
Výkon	33,24	mW
Energia	28,39	mWh
Teplota med. bloku	76,75	°C
Teplota chladiča	51,06	°C
Teplotný rozdiel	25,69	°C
Čas merania	2000	s
Priemerný tep. roz.	30,9	°C
Priemerná tep. med. bloku	73,75	°C
Priemerná tep. chladiča	42,83	°C

4.13 Výsledky merania neznámeho termočlánku pri 80 °C

Naše merania obsahujú aj zaznamenávanie hodnôt z neznámeho termočlánku. Dôvodom bolo chýbajúce modelové označenie na povrchu tohto článku. Bez systému, ktorý by zaznamenával dynamické vlastnosti termočlánkov, by sme len veľmi ťažko zistili, o aký typ článku sa jedná. Rozhodli sme sa vykonať meranie iba pri požadovanej teplote 80 °C. Dôvodom bolo, že pri nižšej požadovanej teplote (50 °C), boli priebehy zaznamenávania veličín veľmi podobné, avšak pri vyššej požadovanej teplote (80 °C) boli rozdiely meraných veličín väčšie. Týmto spôsobom by sme mohli určiť, o aký typ článku sa jedná.

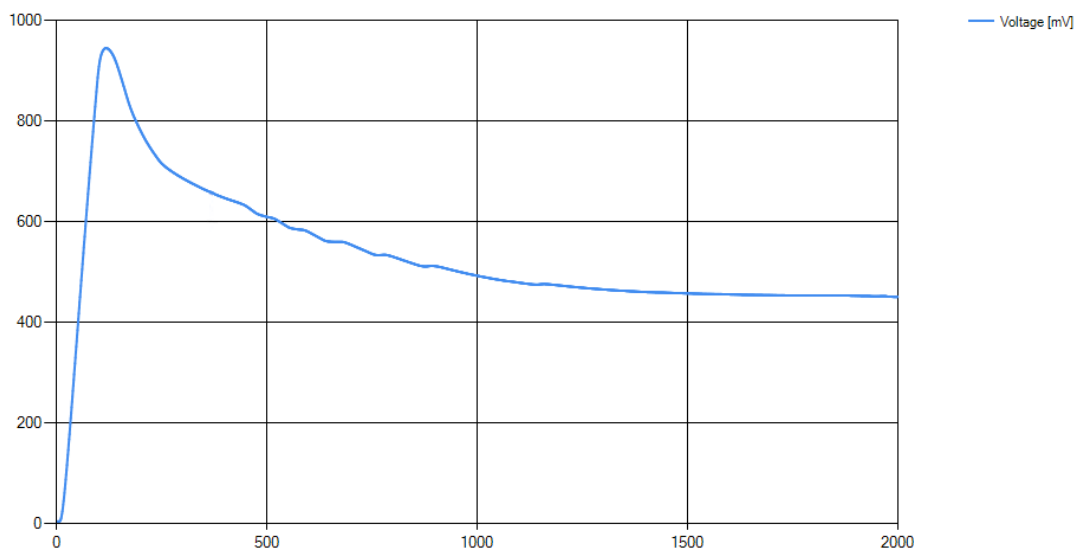
Z merania, v ktorom sme zaznamenávali priebeh teploty neznámeho termočlánku, sme mohli vidieť, že tvar krivky teploty medeného bloku bol veľmi podobný ako u článkov typu TEC1-12715 a SP1848. Najvyššia dosiahnutá teplota bola 80,69 °C (nižšia v porovnaní s druhým

a tretím meraným článkom) v 2. minúte merania (143 sekúnd). Následne teplota klesla na hodnotu 74,00 °C, pričom až ku koncu merania pomaly stúpala a dosiahla hodnotu 76,75 °C (Graf 26).



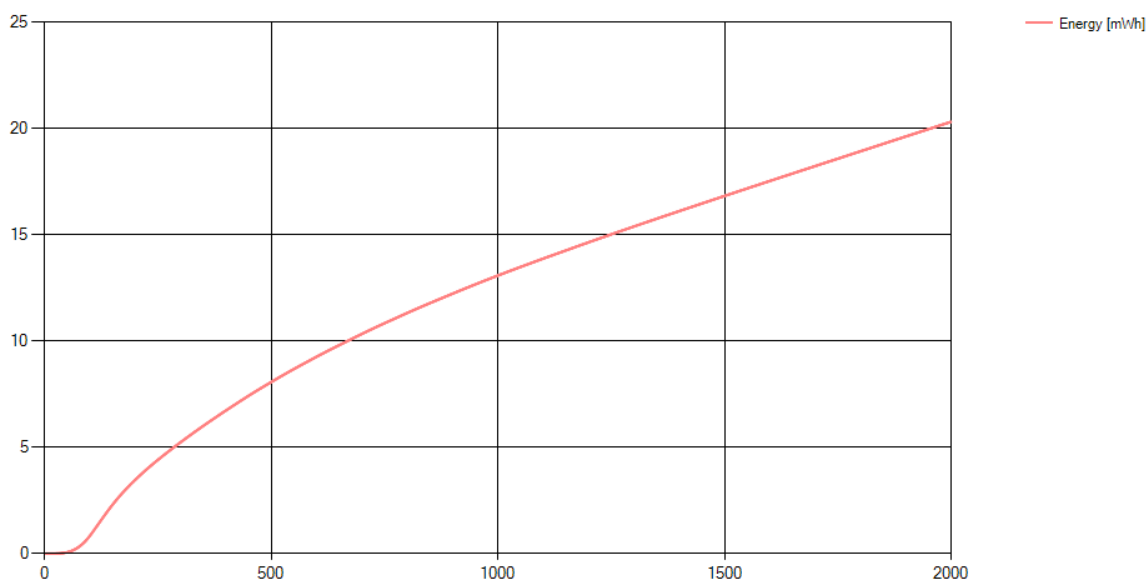
Graf 26 Pribeh teploty pri 80 °C neznámeho termočlánku

Pribeh napätia neznámeho termočlánku bol nezvyčajný (Graf 27). Najvyššia zaznamenaná hodnota napätia dosiahla 945,86 mV, čo bola naša najnižšia nameraná hodnota napätia v celom meraní. Postupné klesanie napätia neznámeho termočlánku bolo veľmi podobné ako napätie u článkov TEC1-12715 a SP1848.



Graf 27 Pribeh napätia pri 80 °C neznámeho termočlánku

Množstvo vyrobenej energie začalo pomerne rýchlo stúpať, ale v krátkom čase (počas 3. minúty merania) sa spomalilo. Stúpanie hodnôt sa ustálilo približne 17 minút od začiatku merania (Graf 28).



Graf 28 Pribeh energie pri 80 °C neznámeho termočlánku

Neznámy termočlánok mal najnižšie množstvo vyrobenej energie z dôvodu najnižšieho zaznamenaného napätia (Tabuľka 14). Napriek tomu množstvo energie vyrobenej týmto článkom bolo podobné energii vyrobenej termočlánkom TEC1-12709 (rozdiel 1,65 mWh). Priemerný teplotný rozdiel neznámeho termočlánku sa veľmi priblížil teplotnému rozdielu zaznamenaného z článku TEC1-12715 (rozdiel 0,38 °C).

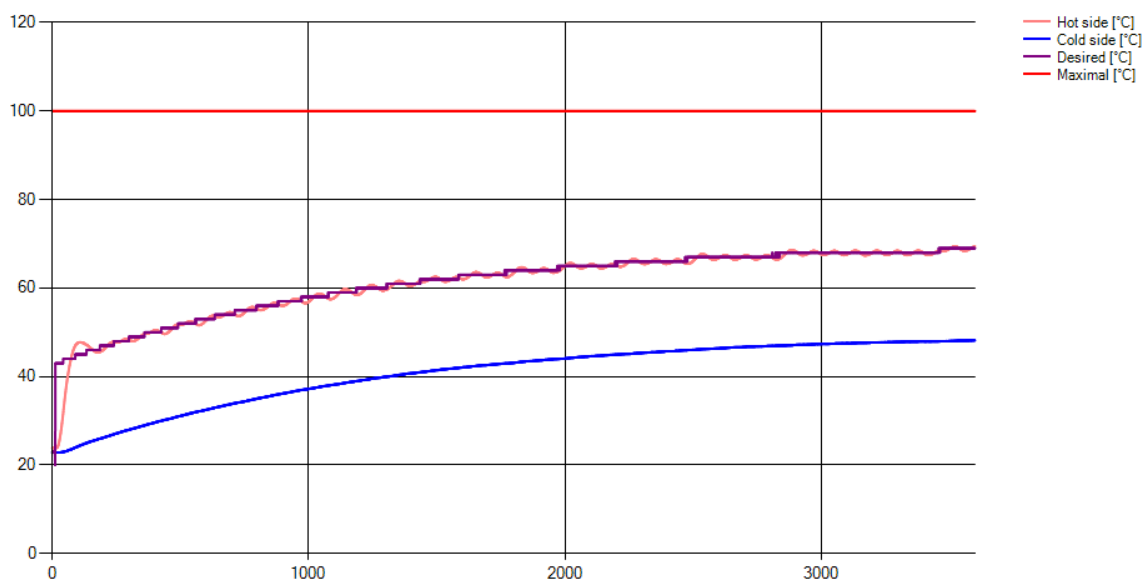
Tabuľka 14 Výstupné hodnoty pri 80 °C neznámeho termočlánku

Výstupné hodnoty z aplikácie		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Napätie	451,11	mV
Prúd	54,88	mA
Výkon	24,76	mW
Energia	20,32	mWh
Teplota med. bloku	76,94	°C
Teplota chladiča	50	°C

Teplotný rozdiel	26,94	°C
Čas merania	2000	s
Priemerný tep. roz.	31,58	°C
Priemerná tep. med. bloku	73,94	°C
Priemerná tep. chladiča	42,36	°C

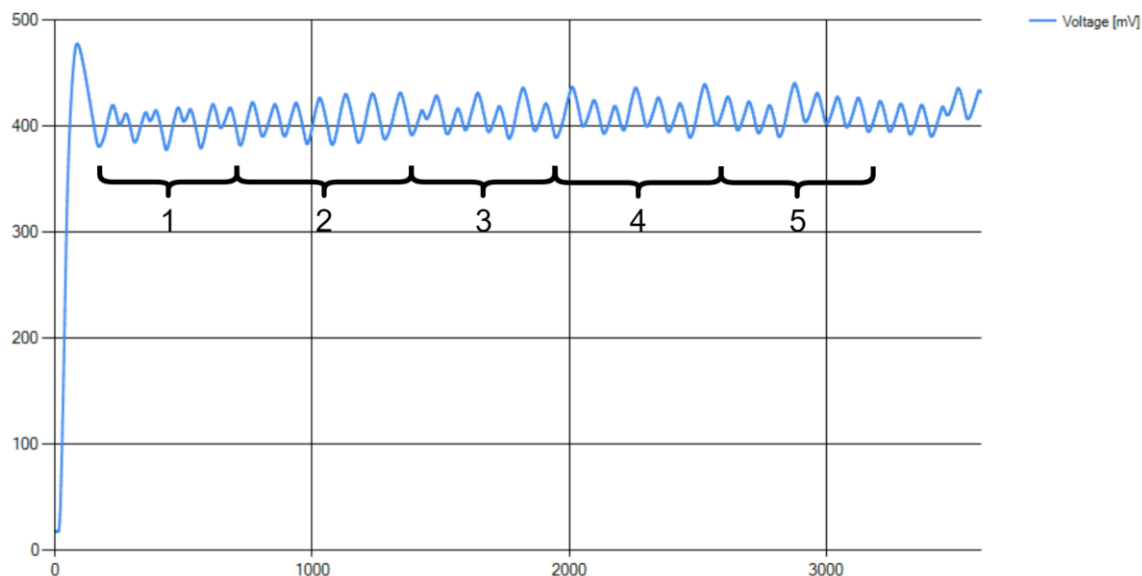
4.14 Výsledky merania veličín termočlánku pri rozdieloch teplôt

Termoelektrický generátor (TEG) SP1848 mal v porovnaní s termoelektrickými chladičmi z nášho pohľadu najzaujímavejšie hodnoty pri jednotlivých meraniach. Z toho dôvodu sme sa rozhodli porovnať jeho výkon pri troch rôznych teplotných rozdieloch - 20 °C, 30 °C a 55 °C (60 °C). Tak by sme získali reálne údaje o výkone tohto typu článku. Prvé meranie (Graf 29) sme nastavili tak, aby bol rozdiel teplôt medzi vyhrievaným medeným blokom a hliníkovým chladičom v blízkosti hodnoty 20 °C po dobu jednej hodiny.



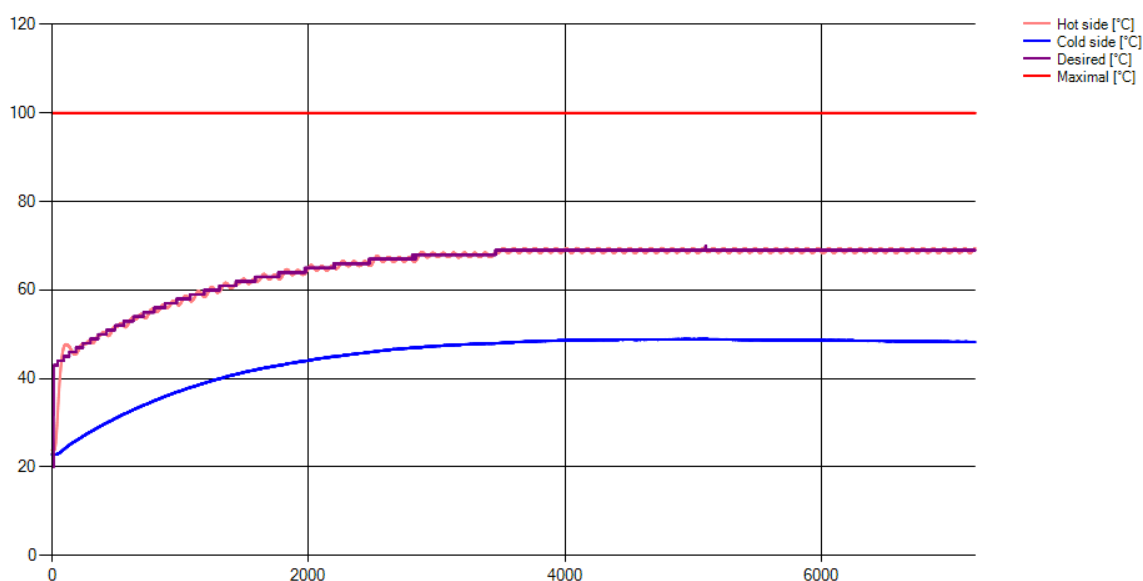
Graf 29 Priebeh teploty pri rozdieli 20 °C SP1848

Priebeh napätia bol pre nás prekvapujúci a zaujímavý. Tvorili sa akési “skupiny” alebo cyklicky sa opakujúce časti zaznamenávaných hodnôt stúpania a klesania napätia (Graf 30). Touto skupinou myslíme časť priebehu merania, ktorá je rovnaká určitý čas. Končí sa iným, zmeneným tvarom oscilácie v porovnaní s predchádzajúcim typom oscilácie napätia (stúpania a klesania). Napätie sa pohybovalo v rozmedzí 375 mV až 430 mV. Priebeh výkonu uvádzať nebudeme, pretože stúpala rovnomerne .



Graf 30 Pribeh napätia pri rozdieli 20 °C SP1848

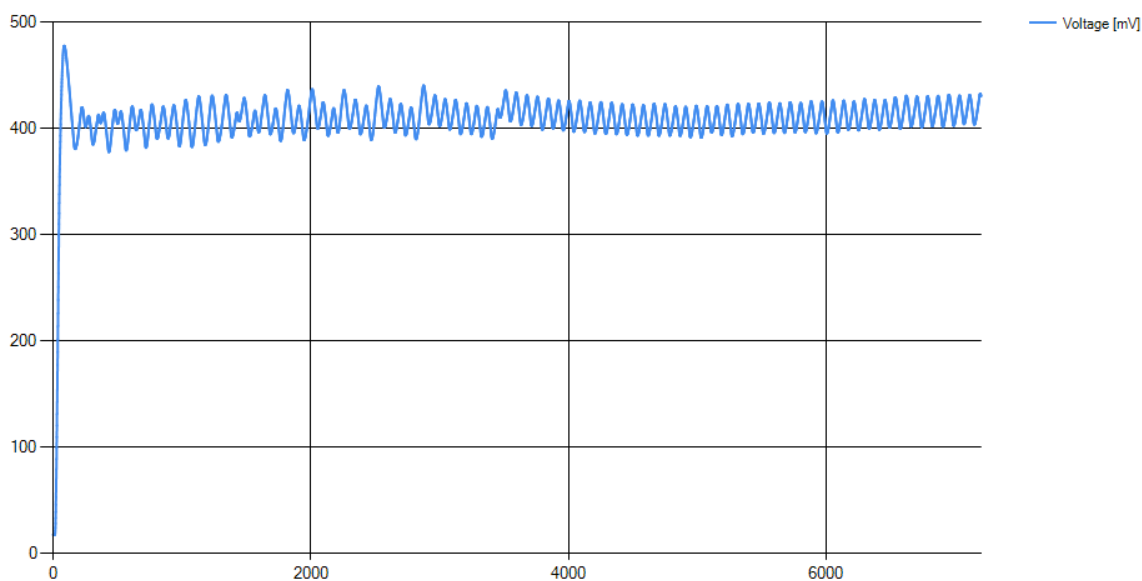
Na základe predchádzajúcich zaujímavých výsledkov sme sa rozhodli pokračovať v meraní a získať čo najväčšie množstvo dát o termočlánku SP1848. Meranie sme preto dvojnásobne predĺžili, aby sme tak získali väčšie množstvo informácií. Na Grafe 31 so zaznamenaným priebehom meranej teploty sme zistili ustálenie teploty hliníkového chladiča. Teplota medeného bloku nebola stála, pohybovala sa medzi hodnotami 68,50 °C až 69,50 °C, pričom chladič bol stabilizovaný na teplote 48,87 °C.



Graf 31 Pribeh teploty pri rozdieli 20 °C SP1848 - 2 hodina

Z Grafu 32 môžeme zreteľne vidieť už v prvej hodine merania napätia vyššie spomínané “skupiny” oscilácie meraného napätia. Počas druhej hodiny merania sa napätie ustálilo až

potom, čo sa teplota prestala zvyšovať. Môžeme vidieť, že napätie bolo nižšie v závislosti od nižšej teploty. Začalo stúpať so zvyšujúcou sa teplotou medeného bloku. Výsledné napätie sa pohybovalo v rozmedzí 404,49 mV až 431,67 mV.



Graf 32 Priebeh napätia pri rozdiel 20 °C SP1848 - 2. hodina

Z nižšie uvedenej Tabuľky 15 vyplýva, že výsledné množstvo energie vyrobenej termoelektrickým generátorom SP1848 pri priemernom teplotnom rozdiel 20,23 °C je 40,86 mWh. Toto meranie trvalo 2 hodiny. Z týchto pozorovaní a získaných údajov môžeme vyvodiť, že reálny výkon článku bol 20,43 mW pri teplotnom rozdiel 20 °C a záťaži 8,22 Ω .

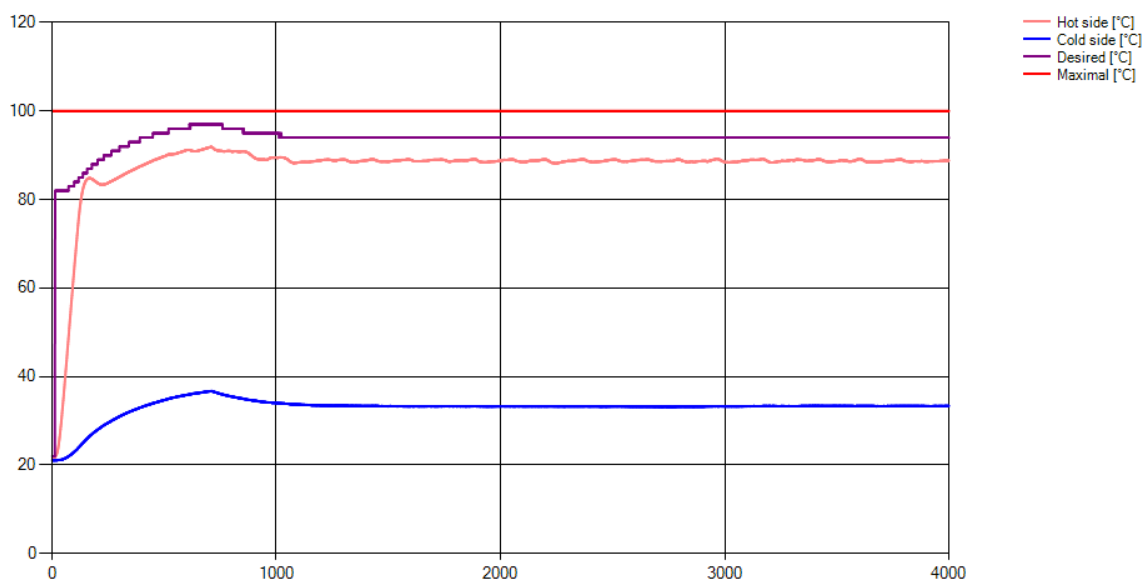
Tabuľka 15 Výstupné hodnoty pri rozdiel 20 °C SP1848 počas 2 hodín

Výstupné hodnoty z aplikácie		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Napätie	430,63	mV
Prúd	52,39	mA
Výkon	22,56	mW
Energia	40,86	mWh
Teplota med. bloku	69,44	°C
Teplota chladiča	48,25	°C
Teplotný rozdiel	21,19	°C

Čas merania	2000	s
Priemerný tep. roz.	20,23	°C
Priemerná tep. med. bloku	64,89	°C
Priemerná tep. chladiča	44,66	°C

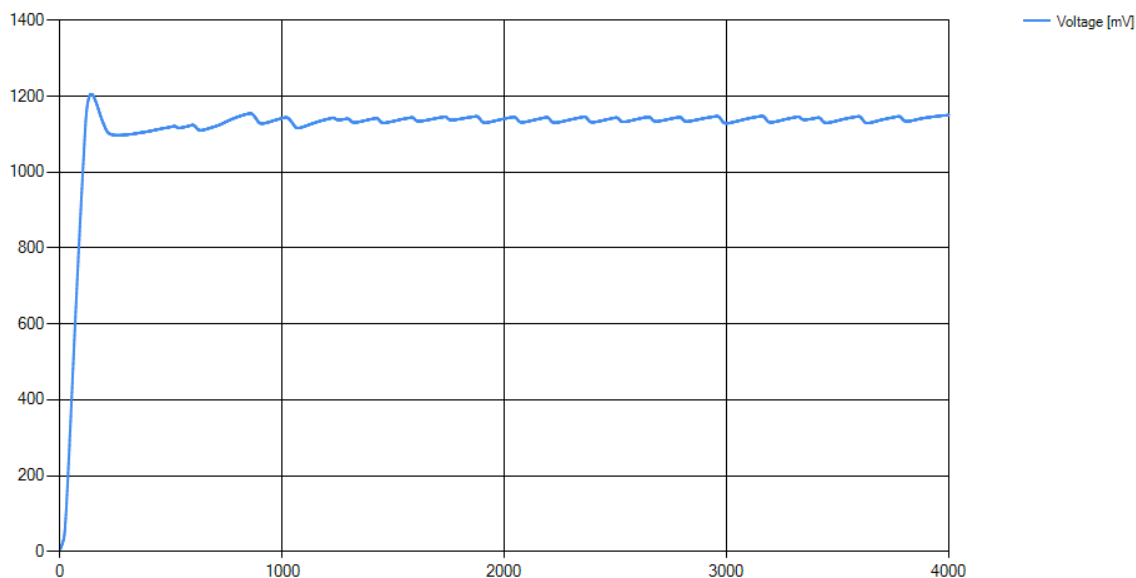
Meranie dynamických veličín ako v predchádzajúcich podkapitolách pri **teplotnom rozdieli 30 °C** uvádzame ako súčasť prílohy našej záverečnej práce. Dôvodom boli podobné priebehy meraní, ako pri meraniach s teplotným rozdielom 20 °C.

Naše merania pokračovali ďalej za upravených teplotných podmienok a nastavení. Zvolili sme teplotný rozdiel 60 °C a zablokovali sme jeden z ventilátorov, aby chladenie nebolo príliš silné. Počas merania sa nám túto hodnotu nepodarilo dosiahnuť. Dôvodom bol príliš vysoký teplotný rozdiel. Ak by sme chceli dosiahnuť 60 °C, museli by sme teplotný rozdiel o niekoľko °C navýšiť. Tento krok sme nemohli urobiť, pretože by sa prekročila maximálna stanovená teplota meracieho systému. Požadovaná teplota vyhrievaného medeného bloku nemohla prekročiť 100 °C. Toto meranie budeme z uvedených dôvodov uvádzať ako zaznamenávanie merania dynamických vlastností termodiferenciálneho generátora SP1848 pri **rozdiel teplôt 55 °C** (Graf 33). V 760. sekunde, kedy požadovaná teplota stúpala na 97 °C, sme museli odblokovať aj druhý ventilátor, aby táto nastavená teplota nepresiahla hodnotu 100 °C.



Graf 33 Priebeh teploty pri rozdieli 55 °C SP1848

V nasledujúcom priebehu (Graf 34) vidíme zobrazenie najvyššieho dosiahnutého napätia 1206,24 mV pri teplote medeného bloku 82,81 °C a hliníkového chladiča 25,12 °C. Napätie kleslo na hodnotu 1097,76 mV v 4. minúte merania (262 sekúnd). Po ustálení teploty (1023 sekúnd) sa hodnota napätia po zvyšok merania pohybovala v rozmedzí 1130,94 mV až 1146.35 mV.



Graf 34 Priebeh napätia pri rozdiel 55 °C SP1848

Zo zaznamenaných výstupných hodnôt (Tabuľka 16) vidíme, že množstvo vyrobenej energie termodiferenciálnym generátorom SP1848 bolo 170,88 mWh za celú dĺžku merania. Meranie sme ukončili chvíľu po 66. minúte (4000 sekúnd). Množstvo energie sme vydělili 1,111 násobkom (4000/3600 sekúnd) pre získanie výkonu po dobu jednej hodiny, čím sme získali konečnú hodnotu 153,79 mW. Z nášho merania môžeme vyvodit', že táto hodnota predstavovala reálny výkon termočlánku SP1848 pri rozdiel teplôt 55 °C.

Tabuľka 16 Výstupné hodnoty pri rozdieli 55 °C SP1848

Výstupné hodnoty z aplikácie		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Napätie	1150,99	mV
Prúd	140,02	mA
Výkon	161,17	mW
Energia	170,88	mWh
Teplota med. bloku	88,81	°C
Teplota chladiča	33,38	°C
Teplotný rozdiel	55,43	°C
Čas merania	4000	s
Priemerný tep. roz.	54,35	°C
Priemerná tep. med. Bloku	87,34	°C
Priemerná tep. chladiča	32,99	°C

5 Diskusia

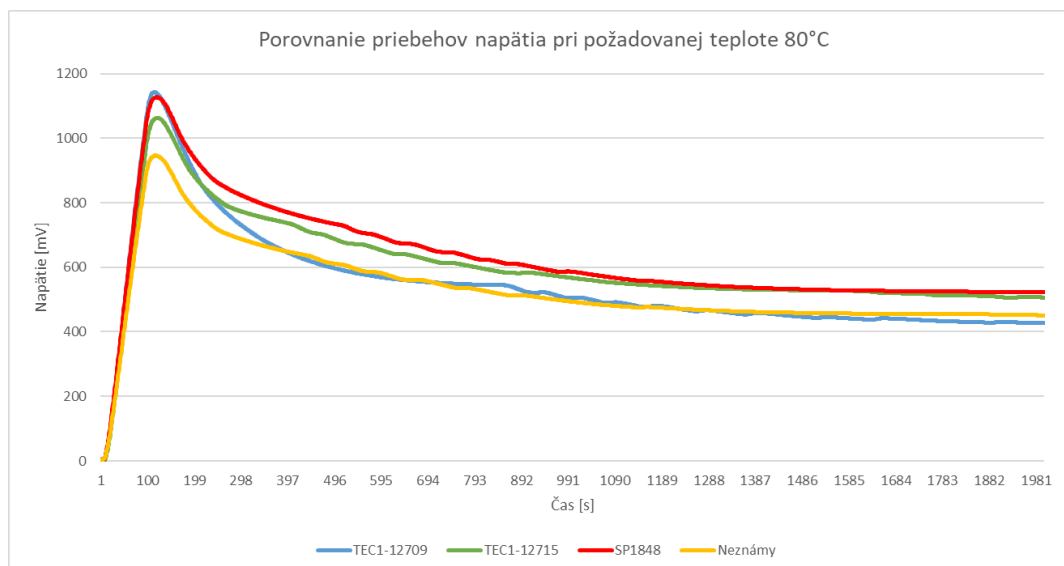
Uskutočnili sme dostatočný počet výskumných meraní, ktoré sme uviedli v prehľadných tabuľkách 4. kapitoly a znázornili sme ich aj graficky. To nám umožnilo získať kvalitný prehľad o priebehoch a samotných výsledkoch konkrétnych meraní. Merania uskutočnené pri teplote 50 °C neboli z nášho pohľadu natoľko zaujímavé ako tie, ktoré sa realizovali pri teplote 80 °C. Na základe konkrétnych čísel a hodnôt sme dospeli k záverom, ktoré uvádzame v porovnávajúcich sumárnych tabuľkách.

Existuje viacero výskumov o meraní termočlánkov, ich dynamických vlastnostiach a možnostiach využitia v praktickej oblasti. Pri našom výskume sme našli podobné i rozdielne merania. V prílohe uvádzame tabuľku hodnôt zaznamenaných pri meraní termoelektrického článku od Arsyad (et al, 2023). Autor vo svojom výskume uvádza meranie (vid' Tabuľka 18 v Prílohe) rovnakého modelu termočlánku (SP1848-27145SA). Pri porovnaní s našim výskumom vidíme **rozdiel medzi vo výkone** pri daných teplotných rozdieloch:

- naše meranie pri rozdieli teplôt 20 °C zaznamenalo výkon 20,43 mW. Arsyad et al. uvádza pri podobnom rozdieli teplôt výkon 0,05 W (50 mW);
- takisto je badateľný rozdiel pri teplote 30 °C. V našom výskume sme mali priemerný výkon 44,86 mW, autor daného výskumu uvádza výkon 0,07 W (70 mW);
- pri 55 °C sme v našom výskume namerali výkon 153,79 mW, Arsyad et al. pri tom istom rozdieli teplôt výkon 90 mW.

Z tohto porovnania môžeme vidieť značné rozdiely vo výkonoch pri meraniach termočlánkov pri jednotlivých teplotách. Arsyad et al. uvádza vo vyššie spomenutej tabuľke pravdepodobne chybný údaj teplotného rozdielu (rozdiel T_h 49 °C a T_c 39 °C nie je 19 °C).

Nestretli sme však s kompletnými informáciami o termočlánoch a naše merania viedli k istým záverom. Keďže sme nezískali žiadne informácie napríklad o výkone termoelektrických chladičov, ktoré sme použili pri meraní ich dynamických vlastností, podarilo sa nám ich získať a doplniť práve prostredníctvom nášho meracieho systému. Dospeli sme k výsledkom, ktoré uvádzame v nižšie priloženom prehľadnom Grafe 35.



Graf 35 Porovnanie všetkých priebehov napätia pri požadovanej teplote 80°C

Z daných parametrov vložených do grafu môžeme porovnať priebehy napätia, ktoré sme opisali vyššie. Rozdiel medzi nimi nebol taký veľký, ako sme predpokladali. Dôležitým faktorom bolo tiež časové rozpätie merania, keďže z grafu vyplýva, kedy sa napätie generované článkom TEC1-12709 začalo meniť (bola zaznamenaná zmena v priebehu napätia v určitom bode merania).

S našim meracím systémom vieme získať veľmi presné hodnoty napätia. Zapojenie, vloženie článku do meracieho systému a nastavenia parametrov merania trvá veľmi krátky čas. Program prijaté hodnoty zaznamená, spracuje, vyhodnotí a priamo vykreslí prostredníctvom grafu automaticky. Vďaka tomu je možné veľmi dobré spracovanie prehľadu údajov a ich vzájomné porovnanie (prípadne porovnanie s údajmi z iných výskumov). Tento proces je možné ďalej automatizovať napríklad pridaním časovača, ktorý po uplynutí stanoveného limitu ukončí meranie. Ovládanie celého meracieho systému postačuje počítačové zariadenie, ktoré disponuje bezdrôtovým sériovým bluetooth pripojením. Všetky uvedené možnosti sú výhodami nášho meracieho systému, využiteľné pri ďalšej výskumnej činnosti.

Počas celého obdobia jednotlivých meraní sme sa stretli aj s niekoľkými nedostatkami, resp. nevýhodami. Zistili sme, že šírka medeného bloku je pomerne obmedzujúca. Počas merania sme boli limitovaní maximálnym rozmerom článku 94x60 mm. Určité časti meracieho systému (motor, ventilátory) pôsobia rušivo, pretože sú pri svojej činnosti zdrojom hluku. Ďalšou nevýhodou sa javí zle umiestnený posúvač, ktorý spôsobuje vychýlenie hliníkového chladiča. Kompenzovali sme toto vychýlenie pomocou pružín na medenom bloku. Najväčším obmedzením presnosti pri meraniach je snímač teploty, ktorý má odchýlku $\pm 0,5$

°C až do 85 °C. Z toho dôvodu sme si limit požadovanej teploty stanovili na 80 °C. V predchádzajúcom odseku sme pripojenie k počítačovému zariadeniu uviedli ako jednu z výhod. Môžeme toto pripojenie chápať na druhej strane ako nevýhodu. Merací systém nedokáže pracovať a riešiť proces merania priamo, bez potreby počítačového zariadenia.

Po zaznamenaní a analýze všetkých dát, postupov a celého procesu sme objavili aj možnosti efektívnejšieho zlepšenia celého systému. Ak by bol v ďalších výskumných meraniach pri zaznamenávaní veličín použitý rovnaký alebo podobný merací systém, mohol by viac unifikovať výsledky meraní termoelektrických článkov. Tým by sa získali špecifickejšie informácie o “správaní” sa rôznych typov termočlánkov v závislosti od ich materiálového zloženia.

Všetky dostupné a získané informácie nás priviedli k možnostiam a zamysleniu sa nad tým, akým spôsobom by bolo možné náš merací systém využiť v praxi. Merania, ktoré sme uskutočnili, by mohli viesť k lepšej analýze termočlánkov, ku ktorým chýbajú niektoré informácie alebo všetky úplne absentujú (ako termočlánok v našom prípade). Náš merací systém dokáže so správnym nastavením základných parametrov a aplikácie nielen merať a zbierať dáta, ale aj analyzovať, porovnať a identifikovať rôzne termočlánky.

Negatívnym momentom by sme mohli nazvať neustále klesanie a stúpanie teploty. Pri použití materiálu, ktorý by rýchlejšie prenášal teplo, by mohla byť teplota vyhrievanej strany (v našom prípade medeného bloku) stabilnejšia. Druhým negatívom bola rýchlosť prenosu tepla v chladiči. Pri meraniach, kde napätie dosiahlo najvyššiu hodnotu a následne začalo klesať, sme videli, že rozdiel teplôt stále stúpal. Dôvodom bola reálna teplota termočlánku. Čiže medený blok vyhrieval termočlánok; teplo prechádzalo termočlánkom až do hliníkového chladiča, čím sa hliníkový chladič ohrieval. Videli sme, že keď napätie dosiahlo svoj najvyšší bod a začalo klesať, tak rozdiel teplôt stále stúpal. Bolo to spôsobené tým, že teplo ešte len prechádzalo do chladiča. Strana článku, ktorá sa chladiča dotýkala, bola teplejšia než dokázal snímač teploty v danom momente zaznamenávať. To vytváralo permanentnú odchýlku rovnú rýchlosti prenosu tepla v hliníku.

Ak by sme mali možnosť realizovať celý výskum znova, určite by sme urobili niekoľko zmien. Prvou by bola veľkosť profilov a celková veľkosť konštrukcie. S väčším meracím systémom by bola jednoduchšia manipulácia a mohli by sme použiť aj väčší motor, ktorý by mal snímač polohy a robustný lineárny posúvač.

Záver

Skonštruovaný merací systém sa stal základom práce, v ktorej sme sa inšpirovali našou predchádzajúcou bakalárskou prácou. V podobnej téme sme sa rozhodli urobiť niekoľko meraní s termočlánkami. V prípravnej etape merania sme uskutočnili návrh, neskôr praktické prevedenie meraní pre konkrétne teploty za použitia viacerých článkov. Cieľom nami vytvoreného meracieho systému bolo vykonať základné merania pri požadovanej teplote a tak získať prehľad o dynamických vlastnostiach termočlánkov.

Samotné merania predstavovali takmer záver nášho výskumu. Predchádzala tomu dostatočná teoretická príprava v podobe plánu práce, zabezpečenie potrebného materiálu, samotná konštrukcia meracieho zariadenia, práca s aplikáciou a čas samotných meraní. Veľmi dôležitý bol priestor potrebný na celkové vyhodnotenie dát a spracovanie záverov do záverečnej podoby

Pokúsili sme sa využiť náš pomerne presný merací systém na získanie reálneho výkonu termočlánku tak, že sme si nastavili teplotný rozdiel vyhrievanej a chladiacej plochy. Tým bolo možné skontrolovať a porovnať, aký bol skutočný výkon termočlánku pri záťaži. Podarilo sa nám zistiť, že nameraný výkon pri záťaži a daných teplotných rozdieloch bol odlišný od informácie, ktorú uvádzal výrobca použitého termočlánku (SP1848). Dokázali sme nastaviť podobné meracie podmienky pre každý použitý článok.

V našej práci a celom výskume sme využili dostupné zdroje, predchádzajúce vedomosti, poznatky a prehľad skúsenosti v danej oblasti. Prišli sme k záverom, ktoré sme v počiatkoch našej práce nevedeli a nemohli s istotou predpokladať. Podarilo sa nám dosiahnuť stanovený cieľ, ktorým bolo zistenie dynamických vlastností termodiferenciálnych článkov.

V prípade možnosti presnejšieho merania viacerých veličín by na základe nášho výskumu bolo možné sledovať a zaznamenať i výsledky nepatrných zmien vo vlastnostiach termoelektrických článkov. Práve toto poznanie je využiteľné pri vytvorení, meraní a porovnaní vlastností článkov, alebo pri ďalšej práci s navrhovaným meracím systémom pri vytváraní vlastných termočlánkov.

Zoznam použitej literatúry

BAKSHI, Late Ajay V. - BAKSHI, Uday A. 2020. *Electrical Measurements*. Pune: Technical Publication, 2020. 504 s. ISBN 978-81-843-1244-7.

KOLLÁR, Vojtech. 2013. *Manažment kvality*. Bratislava : VŠEMvs, 2013. 212 s. ISBN 978-80-89600-11-3.

TRITT, Terry. 2002. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier, 2002. 10388 s. ISBN 978-0-08-043152-9.

VOBECKÝ, Jan - ZÁHLAVA, Vít. 2005. *Elektronika: Součástky a obvody, principy a příklady*. 3. rozšířené vydání. Grada, 2005. 220 s. ISBN 978-80-247-1241-3.

ZDRÁHAL, Jindřich. 2015. *Zákon zachování energie* In *Fyzika jinak /mechanika/*. Kap. Mechanická energie. [online] Martin Koláček : E-knihy jedou, 63-66. ISBN 978-80-7589-516-5.

Článok v domácom časopise

VYBÍRAL, Bohumil. 2016. *Zamyšlení nad pojmem energie* In *Matematika - fyzika - informatika*. roč. 25, č. 3. Praha : PROMETHEUS, 2016. s. 189-202. ISSN 1805-7705.

Online dostupná elektronická kniha

ARSYAD, Haripuddin – IRFAN, Muhammad – SUHARDI, Iwan. 2023. *Analýza termoelektrického potenciálu SP 1848-27145 SA ako elektrárne s využívaním elektrickej tepelnej energie spaľovania* In *Journal od Electrical Engineering and Informatics 1* (1) 16-25. DOI [10.59562/jeeni.v1i1.419]. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/373746718_ANALYSIS_OF_THERMOELECTRIC_POTENTIAL_SP1848-27145_SA_AS_A_POWER_PLANT_WITH_UTILIZING_THE_HEAT_ENERGY_OF_COMBUSTION>

BASUDEB, Karmakar - RADEMANN, Klaus - ANDREY, Stepanov. 2016. *Crystallization and Growth Mechanisms of Nanostructures in Silicate Glass: From Complete Characterization Toward Applications In Glass Nanocomposites*. Kap. 3.5.1. Cambridge : Elsevier, 2016. 408 s. ISBN 978-0-323-39309-6. DOI [10.1016/B978-0-323-39309-6.00003-1].

BING, Benny. 2001. *Wireless Lans And Home Networks. Connecting Offices And Homes - Proceedings Of The International Conference*. Singapore : World Scientific Publishing Company, 2001. 376 s. ISBN 978-9-814-48956-0. DOI [10.1142/4866].

GUREVICH, Yuri - VELAZQUEZ-PÉREZ, Jesús. 2014. *Peltier Effect in Semiconductors* In ResearchGate. [online] s. 1-21. ISBN 978-0-471-34608-1. DOI [10.1002/047134608X.W8206]. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/figure/Main-Advantages-and-Disadvantages-of-Thermoelectric-Coolers_tbl2_262179901>

MAHTO, Dalgobind. 2016. *Introduction In Engineering metrology and measurements*. [online]. Jaipur : Institute of Engineering and Technology, 2016. s. 15-16. DOI [10.2139/ssrn.3015752] Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/318587932_Engineering_Metrology_and_Measurements_A_PRACTICAL_GUIDE_FOR_RELIABLE_PRODUCTS_ENGINEERING_METROLOGY_AND_MEASUREMENTS_A_PRACTICAL_GUIDE_FOR_RELIABLE_PRODUCTS>

PRABHU, C. S. R. - REDDI, Prathap A. 2004. *Bluetooth technology: and Its Applications with Java and J2ME*. [online]. Delhi: PHI Learning, 2004. 340 s. ISBN 978-81-203-2443-5.

Online dokument

HARANGOZO, Jozef. 2008. *Elektrotechnické meranie III - teória*. [online]. Prešov : SPŠE, 2008. Dostupné na:<https://cloud-6.edupage.org/cloud/Elektrotechnicke_meranie_I_-_teoria_1_.pdf?z%3A0ZNOLkzLAhrrkTD1mvIq1V5%2BZ2p%2F%2BxFzRFE%2FztOZVnWj1CpnmjFOM%2BzuIXU7AahL> [zobrazené 2024-03-11].

ORGON, Miloš. 2006. *Satelitná komunikácia In Veda na dosah* [online]. <<https://vedanadosah.cvtisr.sk/wpcontent/uploads/importovane/img/uploads/xzqhzI7P.pdf>> [zobrazené 2023-10-11].

Online monografia

MOJŽIŠ, Miroslav. 2011. *Priemyselné meranie*. 1. vydanie. [online]. Košice : Technická univerzita v Košiciach. 2011. [cit. 2023-12-10]. ISBN 978-80-553-0683-4. Dostupné na: <<http://ktpe.fei.tuke.sk/dokumenty/PM.pdf>>.

PAVLOVKIN, Ján - NOVÁK, Daniel - BACHMAN, Paweł. 2017. *Merania v elektrotechnike*. [online]. Zelená Hora : Univerzita Zelená Hora, 2017. [cit. 2023-12-10]. ISBN 978-83-941516-5-2. Dostupné na: <http://www.iibnp.uz.zgora.pl/monografie/MERANIA_V_ELEKTROTECHNIKE.pdf>

Online článok

ABBAS, Naveed. 2023. [online]. *UART vs I2C (vs SPI): Understanding the Differences In Wevolver*. Dostupné na: <<https://www.wevolver.com/article/spi-vs-i2c-vs-uart-in-depth-comparison>> [zobrazené 2024-03-08].

AUGUSTYN, Adam. 2024. Peltier effect. In Britannica. [online]. 13.03.2024. Dostupné na: <<https://www.britannica.com/science/Peltier-effect>> [zobrazené 2024-04-01].

AYODELE, Abiola. 2024. [online]. *N-Type Vs P-Type: What's the Difference Between P-Type and N-Type Semiconductors?* In Wevolver. Dostupné na:<<https://www.wevolver.com/article/understanding-n-type-vs-p-type-semiconductors>> [zobrazené 2024-02-10].

BARTOŠOVIČOVÁ, Marta. 2016. [Online]. *Obnoviteľné a alternatívne zdroje energie*. In *Veda na dosah*. Dostupné na:<<https://vedanadosah.cvtisr.sk/priroda/zem/obnovitelne-a-alternativne-zdroje-energie/>> [zobrazené 2024-03-08].

CURLEY, Robert. 2024. *Britannica*. [online]. 13.3.2024. Dostupné na: <<https://www.britannica.com/technology/resistance-electronics>>.[zobrazené 2024-03-20].

GROMOV, G. 2002. *Thermoelectric Cooling Modules*. In: *Business briefing: Global photonics applications & Technology 2002*. [online]. 11.3. 2024. Dostupné na: <https://www.rmtltd.ru/docs/technology/publications/Thermoelectric_Cooling_Modules.pdf> [zobrazené 2024-03-11].

GREGERSEN, Erik. 2024. *International System of Units*. In *Britannica*. [online]. 13.4.2024. Dostupné na: <<https://www.britannica.com/science/International-System-of-Units>>. [zobrazené 2024-04-15].

GREGERSEN, Erik. 2024. *Electric current*. In *Britannica*. [online]. 8.3.2024. Dostupné na: <<https://www.britannica.com/science/electric-current>>. [zobrazené 2024-04-02].

HUBINSKY, Marián. 2020. [online]. *Čo je to multimeter?* In *Elso*. Dostupné na: <<https://www.else.sk/sk/blog/technologie/co-je-to-multimeter>> . [zobrazené 2024-02-05].

SAINI, Manish Kumar. 2022. [online]. *Basic Electrical Quantities – Charge, Current, Voltage, Power and Energy*. In *Tutorials point*. Dostupné na: <<https://www.tutorialspoint.com/basic-electrical-quantities-charge-current-voltage-power-and-energy>>. [zobrazené 2024-04-15].

WELLER, Tomer. 2016. [online]. *Intro*. In *ESP32 - FIRST STEPS*. Dostupné na: <<https://fab.cba.mit.edu/classes/863.16/doc/tutorials/ESP32/index.html>> [zobrazené 2024-1-10].

WOSTL, Marek. 2019. [online]. *Co je mikrokontrolér?* In *Zonepi*. Dostupné na: <<https://blog.zonepi.cz/maker-uno-ve-vyuce-1-5-co-je-to-mikrokontroler/>> [zobrazené 2024-01-05].

Blogový príspevok

Elektrolab, 2023. *Výpočet zdanlivého, činného a jalového výkonu elektrického motora*. [blogový článok]. 23.01. 2023, Dostupné na: <<https://www.elektrolab.eu/blog/vypocet-zdanliveho-cinneho-a-jaloveho-vykonu-elektrickeho-motora>> [zobrazené 2024-01-18].

Just Energy, 2020. *Potential and Kinetic Energy Explained*. [blogový článok]. 15.04.2024, Dostupné na: <<https://justenergy.com/blog/potential-and-kinetic-energy-explained/>> [zobrazené 2024-04-16].

uPesi, 2023. *ESP32 Wroom Devkit Pinout: Use the ESP32 GPIO pins*. In *ESP32 Pinout* [blogový článok]. 21.03. 2023. Dostupné na: <<https://www.upesy.com/blogs/tutorials/esp32-pinout-reference-gpio-pins-ultimate-guide#>> [zobrazené 2024-01-06].

Slovník

Aktuality, 2024. *Energia*. In *Slovník aktuality*. [online]. Dostupné na: <<https://slovník.aktuality.sk/pravopis/?q=energia>> [zobrazené 2024-01-14].

Javys, 2024. *Energia*. In *Energetický slovník*. [online]. Dostupné na: <<https://www.javys.sk/sk/informacny-servis/energeticky-slovník/E/energia#r>> [zobrazené 2024-01-15].

Javys, 2024. *Elektrický prúd*. In *Energetický slovník*. [online]. Dostupné na: <<https://www.javys.sk/sk/informacny-servis/energeticky-slovník/E/elektricky-prud#r>> [zobrazené 2024-01-16].

Javys, 2024. *Tepelná energia*. In *Energetický slovník*. [online]. Dostupné na: <<https://www.javys.sk/sk/informacny-servis/energeticky-slovník/T/tepelna-energia#r>> [zobrazené 2024-01-17].

Javys, 2024. *Činný výkon*. In *Energetický slovník*. [online]. Dostupné na: <<https://www.javys.sk/sk/informacny-servis/energeticky-slovník/%C4%8C/cinny-vykon#r>> [zobrazené 2024-01-20].

Javys, 2024. *Elektrický výkon*. In *Energetický slovník*. [online]. Dostupné na: <<https://www.javys.sk/sk/informacny-servis/energeticky-slovník/E/elektricky-vykon#r>> [zobrazené 2024-01-20].

Javys, 2024. *Jalový výkon*. In *Energetický slovník* [online]. Dostupné na: <<https://www.javys.sk/sk/informacny-servis/energeticky-slovník/J/jalovy-vykon#r>> [zobrazené 2024-01-18].

Javys, 2024. *Zdanlivý výkon*. In *Energetický slovník* [online]. Dostupné na: <<https://www.javys.sk/sk/informacny-servis/energeticky-slovník/Z/zdanlivy-vykon#r>> [zobrazené 2024-01-03].

Javys, 2024. *Termoelektrický článok*. In *Energetický slovník*. [online]. Dostupné na: <<https://www.javys.sk/mobile/sk/informacny-servis/energeticky-slovník/T/termoelektricky-clanok>> [zobrazené 2024-01-08].

Slovenská energetika, 2024. *Slovník pojmov* [online]. Dostupné na: <<https://sle.sk/se-asistent/slovník/>> [zobrazené 2024-04-10].

Slovenská technická univerzita, 2015. *Zdanlivý výkon*. In *Energetický slovník* [online]. Dostupné na: <<http://uef.fei.stuba.sk/moodleopen/mod/glossary/showentry.php?courseid=117&eid=1515&displayformat=dictionary>> [zobrazené 2024-02-10].

Použitý softvér

Autodesk, 2013. Fusion 360. [softvér]. Version 2.0.18477. Dostupné na: <<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/personal>> [prístup 2022-06-20].

BENSON, David; ALDER, Gaudenz, 2005 *Draw.IO*. [softvér]. Version 20.8.16. Dostupné na: <<https://www.drawio.com/>> [prístup 2021-05-16].

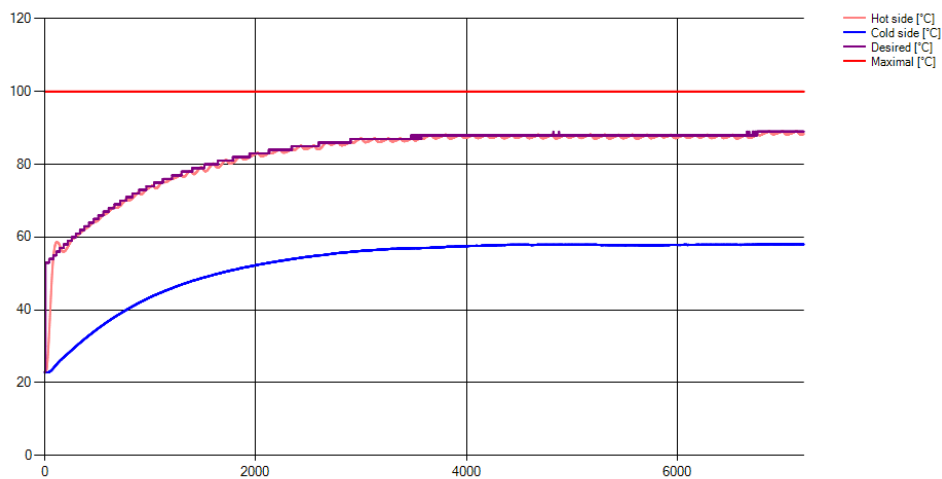
BANZI, Massimo; CUARTIELLES, David, 2005. *Arduino*. [softvér]. Version 2.3.1. Dostupné na: <<https://www.arduino.cc/en/software>> [prístup 2021-10-15].

HIRSCHTICK, Jon, 1995. *SolidWorks*. [softvér]. Version 3.0. Dostupné na: <<https://www.solidworks.com/product/all-products>> [prístup 2023-09-20].

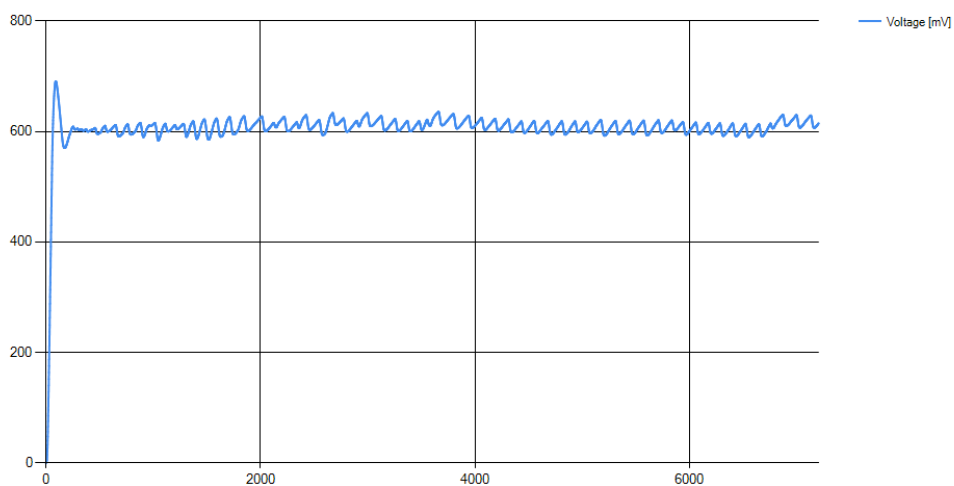
KIMBALL, Spencer; MATTIS, Peter. 1998. Gimp. [softvér]. Version 2.10.36, 2023-11-07. Dostupné na:

Microsoft, 1997. *Visual Studio*. [softvér]. Version 17.4, 2022-11-08. Dostupné na: <<https://visualstudio.microsoft.com/downloads/>> [prístup 2022-12-10].

Prílohy



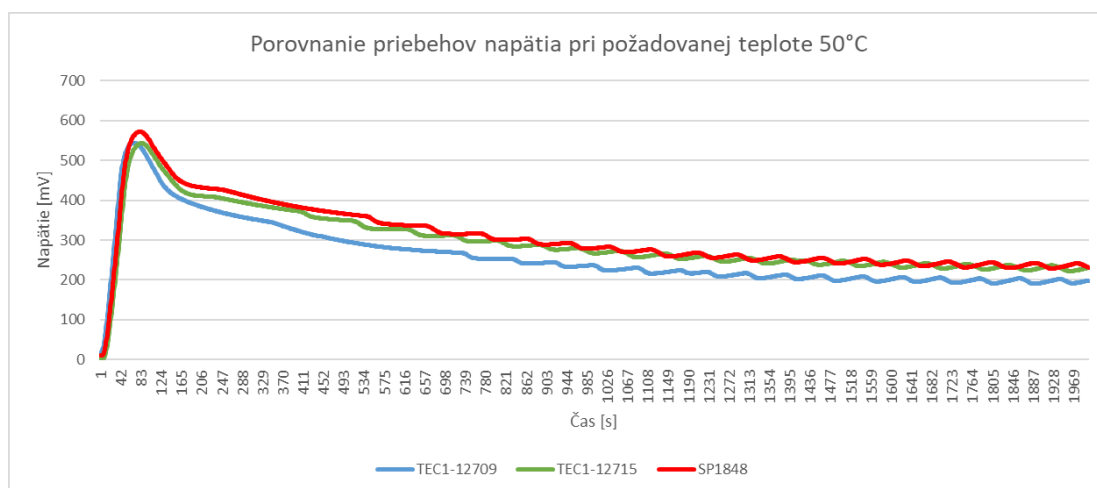
Graf 36 Pribeh teploty pri rozdiel 30 °C SP1848



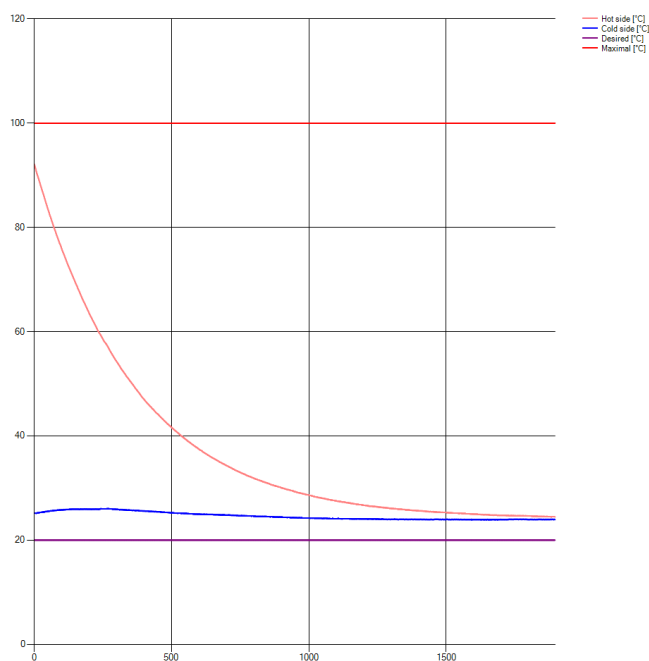
Graf 37 Pribeh napätia pri rozdiel 30 °C SP1848

Tabuľka 17 Výstupné hodnoty pri rozdiel 20 °C SP1848 počas 2 hodín

Výstupné hodnoty z aplikácie		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Napätie	614,89	mV
Prúd	74,8	mA
Výkon	45,99	mW
Energia	89,72	mWh
Teplota med. bloku	88,37	°C
Teplota chladiča	58	°C
Teplotný rozdiel	30,37	°C
Čas merania	7200	s
Priemerný tep. roz.	29,77	°C
Priemerná tep. med. Bloku	82,44	°C
Priemerná tep. chladiča	52,67	°C



Graf 38 Porovnanie všetkých priebehov napätia pri požadovanej teplote 50°C



Graf 39 Chladenie meracieho systému medzi meraniami

Tabuľka 18 Meranie termočlánku SP1848, zdroj: Arsyad et al., 2023

Table 4. Module Measurements with Electronic Loads							
Time (Minute)	Temperature (°C)		ΔT (°C)	Voltage (V)	Current (A)	Power (VA)	Resistance in (Ω)
	Th (°C)	Tc (°C)					
5	49	39	19	2,18	0,03	0,05	3k
10	72	40	32	2,22	0,04	0,07	3k
15	86	46	40	2,23	0,04	0,08	3k
20	96	50	46	2,25	0,05	0,09	3k
25	98	61	37	1,73	0,06	0,09	3k
30	95	58	37	1,68	0,06	0,10	3k
Average				2,05	0,05	0,05	3k