

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Termografie pro domácí aplikace

bc. Michal Kochman

Vedoucí: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.
Květen 2024

Poděkování

Rád bych na tomto místě vyjádřil svou vděčnost všem členům Studentské unie ČVUT aktivně se podílejícím na jejich chodu, bez jejichž důvěry v mé schopnosti by tato práce nikdy nevznikla.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 17. května 2024

Abstrakt

Cílem této práce je navrhnout a otestovat levné, převážně open source zařízení pro protipožární prevenci nabíjecích a nabíjených zařízení v domácích podmínkách, s důrazem na snadnou rozšiřitelnost a upravitelnost navrženého přípravku. Diskutovány jsou vlastnosti nejpoužívanějších baterií a komerčně dostupné systémy kontroly nabíjení a prevence požárů. V závěru jsou ověřeny vlastnosti navrženého řešení.

Klíčová slova: bolometr, termokamera, měření teploty, baterie, bezpečnost, open-source

Vedoucí: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.
katedra radioelektroniky FEL

Abstract

The aim of this work is to design and test an inexpensive, mainly open source device for fire prevention in charging and charged devices in domestic conditions, with an emphasis on the easy expandability and modifiability of the proposed device. The properties of the most commonly used batteries and commercially available charging control and fire prevention systems are discussed. The properties of the proposed solution are verified in the conclusion.

Keywords: bolometer, thermal camera, temperature measurement, batteries, safety, open-source

Title translation: Thermography for home applications

Obsah

| | | | |
|---|----------|---|-----------|
| 1 Úvod | 1 | 4 Přehled dostupných systémů pro kontrolu nabíjecích procesů | 13 |
| 2 Bezpečnost nabíjení baterií | 3 | 4.1 Řízení nabíjení | 13 |
| 2.1 Konstrukce Li-ion baterie | 3 | 4.2 Externí požární ochrana | 14 |
| 2.2 Konstrukce Li-ion baterie | 4 | 4.2.1 Existující řešení | 14 |
| 2.3 Konstrukce Ni-MH baterie | 5 | 4.3 Dostupné senzory pro stavbu systému | 15 |
| 2.4 Ochranná elektronika | 5 | 4.3.1 SWIR | 15 |
| 3 Bezdotykové senzory teploty | 7 | 4.3.2 MWIR | 15 |
| 3.1 Základy bezdotykového měření teploty, zdroje chyb | 8 | 4.3.3 LWIR | 16 |
| 3.2 Pyrometry | 8 | 5 Popis navrhovaného hardwareového řešení | 17 |
| 3.2.1 Poměrové pyrometry | 9 | 5.1 Výpočetní jednotka | 17 |
| 3.2.2 Úhrnné, pásmové a monochromatické pyrometry | 9 | 5.2 Senzory | 18 |
| 3.3 Termokamery | 9 | 5.2.1 I ² C | 19 |
| 3.3.1 Field of view | 10 | 5.2.2 Video over SPI | 19 |
| 3.3.2 Homogenita obrazu | 10 | 5.3 Akční členy | 20 |
| 3.4 Termogram | 11 | 6 Programové vybavení navrženého systému | 23 |
| | | 6.1 Struktura operačního systému - použité pojmy | 24 |

| | | | |
|---|-----------|---|-----------|
| 6.1.1 Rozdělení user space a kernel space | 24 | 8.2 Vytížení HW prostředků | 35 |
| 6.1.2 Device tree | 25 | 8.3 Přesnost a stabilita | 36 |
| 6.2 Přizpůsobení operačního systému | 25 | 8.4 Časová stabilita | 36 |
| 6.2.1 Změny device tree | 25 | 8.5 Závislost na vzdálenosti měřeného objektu | 37 |
| 6.2.2 Přepnutí režimu WiFi | 26 | 8.5.1 Emissivita baterie | 38 |
| 6.2.3 Inicializace pinů pro akční člen | 26 | 8.6 Detekce | 39 |
| 6.3 Spouštění aplikace | 26 | 8.6.1 Nabíjení baterií | 39 |
| 6.4 Systémové závislosti a použité knihovny | 26 | 9 Závěr | 41 |
| 6.4.1 Přenos obrazu ze senzoru ... | 27 | A Literatura | 43 |
| 6.5 Protokoly a možnosti ovládání .. | 29 | B Licence závislostí programu | 47 |
| 7 Uživatelské rozhraní | 31 | B.1 Raspbian OS | 47 |
| 7.1 Grafické UI | 31 | B.1.1 Qt Framework | 47 |
| 7.2 Vzdálený přístup | 31 | B.1.2 Boost | 48 |
| 7.2.1 Ovládací rozhraní | 32 | B.1.3 OpenCV | 48 |
| 7.2.2 Vzdálený přístup k videu | 32 | B.1.4 gcc | 48 |
| 8 Zhodnocení parametrů systému | 35 | C Obsah přiloženého adresáře | 49 |
| 8.1 Výkonová náročnost | 35 | C.1 Závislosti | 49 |

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| C.1.1 FLIR Lepton SDK | 49 |
| C.1.2 Driver | 49 |
| C.2 Aplikace | 50 |
| C.2.1 hlavní aplikace | 50 |
| C.2.2 konfigurační soubory | 50 |
| D Zadání práce | 51 |

Obrázky

| | |
|--|----|
| 3.1 Znázornění správného FOV/vzdálenosti, převzato z [1] . . . | 9 |
| 3.2 Vizualizace FOV a IFOV termokamery převzatá z [2] | 11 |
| 5.1 Raspberry Pi Zero 2W, foto výrobce. | 18 |
| 5.2 Senzor v breakout board | 19 |
| 5.3 Elektronické propojení vývojové desky a breakout boardu s kamerou | 21 |
| 7.1 Grafické UI | 32 |
| 8.1 Srovnání využití HW prostředků při použití dedikovaného ovladače vs. při použití generického SPI ovladače a vyčítání do ser space. | 36 |
| 8.2 Průběh detekované teploty při testu dlouhodobé stability | 37 |
| 8.3 Srovnání obrazu při pohledu na homogenní černé těleso | 38 |
| 8.4 Názorné využití přípravku | 40 |
| 9.1 Třetí prototyp v 3D vytištěném obalu. | 41 |

Tabulky

| | |
|--|----|
| 2.1 Tabulka rozpuštědel elektrolytů a jejich vlastností podle [3] | 4 |
| 4.1 Přehled vybraných kamer pro požární prevenci | 14 |
| 4.2 Některé moduly se senzorem SWIR na trhu a vypočtená maximální vzdálenost pro měření objektu 10x10cm (podle (3.4)) pro objektiv s typickým HFOV 45° | 15 |
| 4.3 Některé senzory LWIR na trhu a vypočtená maximální vzdálenost pro umístění objektu 10x10cm (podle (3.4)) do jednoho pixelu (pro oblast 3x3 pixelů nutné vydělit 3) | 16 |
| 7.1 Základní příkazy pro ovládání zařízení prostřednictvím textového TCP/IP protokolu | 33 |
| 8.1 Srovnání teploty černého tělesa a teploty detekované senzorem na různých vzdálenostech | 38 |
| 8.2 Srovnání teplot měřených kontaktní a bezkontaktní metodou pro nastavení emisivity 0,65 | 39 |



Kapitola 1

Úvod

Dnešní společnost vyspělých států přikládá velký důraz na ideologický odklon od fosilních paliv, ať už formou podpory elektromobility nebo ukončováním či omezováním provozu elektráren a tepláren uvolňujících velké množství CO_2 a jiných nežádoucích látek do ovzduší.

Přechod k většímu využití obnovitelných (nestálých) zdrojů energie, jako i větší míra využití elektrické energie v dopravě nutně vyžaduje energii ukládat. Jakkoliv uložená energie skýtá potenciální hrozbu v podobě svého nechtěného, často destruktivního, uvolnění.

V případě v běžných domácnostech nejčastějšího uložení energie, tj. chemických článků (baterií) je typickým příkladem takového uvolnění přehřátí baterie a její následný výbuch či požár. I závada na relativně malém zdroji tak snadno může vést k mnohamilionovým škodám.

Tato práce si klade za cíl navrhnout levný a univerzální přípravek cílený na předcházení těchto nežádoucích jevů, založený na principu bezkontaktního měření teploty používaného článku. Tato volba umožňuje případné nejen přenositelnost systému pro sledování a ovládání systémů různých konstrukcí od různých výrobců, ale i jiné využití systému v protipožární bezpečnosti, např. sledování stavu fotovoltaických instalací, které jsou na vzestupu - zejména v poslední době, v souvislosti s plány jako je evropský Green Deal a s rizikem narušení zásobovatelských řetězců fosilních paliv, se zvyšuje poptávka po středně velkých FV instalacích (např. na střechách výrobních hal) a instalacích domácích. Specifickou kategorií pak jsou malé autonomní systémy na chatách a chalupách, které jsou často instalovány z dodaných sad svépomocí, zcela

bez požárně-bezpečnostních prvků a případné kontroly (revize) zapojení osobou s adekvátním elektrotechnickým vzděláním; u těchto systémů se pak také opět můžeme vrátit k možnosti kontroly baterie zmiňované výše. U všech typů FV instalací je pak možné se zaměřit také na kontrolu ostatních prvků instalace (kromě samotných modulů a případných baterií) - invertory, regulátory, balancery atp., které se mohou vlivem poruchy nebo zatížení nadměrným proudem také přehřívat a tedy zkracovat vlastní životnost, ve vzácných případech pak i způsobit požár.

V práci jsou nejprve ukázány typické konstrukce baterií a jejich úskalí, následně jsou shrnuty základy bezkontaktního měření teploty . V praktické části je pak popsán navržený systém z hlediska hardwarového a softwarového vybavení a ověřena jeho použitelnost.

Kapitola 2

Bezpečnost nabíjení baterií

Nejrozšířenějším typem baterií ve spotřebitelské elektronice je lithium-iontová (li-ion) baterie, a to díky své vysoké energetické hustotě. Její nevýhodou je především hořlavý organický elektrolyt, který právě ve spojitosti s uloženou energií představuje vysoké požární riziko. Dalším hojně používaným typem baterií jsou stále ještě baterie Ni-MH (nikl-metal hydridové články). Základní nevýhodou Ni-MH baterií je kromě nižší energetické hustoty jejich samovybití a paměťový efekt (snížení kapacity při opakovaném nabíjení ne zcela vybité baterie), na druhou stranu jsou mnohem odolnější vůči kritickému přehřátí.

2.1 Konstrukce Li-ion baterie

Nejběžnější konstrukcí lithium iontové baterie je grafitová anoda (alternativou ke grafitu může být např. lithiový titanát), katoda je typicky tvořena solí lithia (resp. LiCoO_2 , LiFePO_4 , LiMn_2O_4 nebo jiná sloučenina)[4]. a elektrolyt schopný přenosu lithiových iontů; typicky hexafluorofosforečnan lithný (LiPF_6), případně jiná sůl lithia (vždy rozpuštěná v organickém rozpouštědle). Tyto soli se působením vlhkosti rozkládají na kyselinu fluorovodíkovou, a další organické komponentů, proto je nutné zamezit vniknutí vlhkosti do obalu baterie. Fyzikální vlastnosti některých z těchto komponentů uvádí Mikolajczak ([3]) v tabulce 2.1.

Z údajů v tabulce vyplývá že v některých případech může dojít ke vzplanutí

i u relativně málo zvýšených teplot.

2.2 Konstrukce Li-ion baterie

Nejběžnější konstrukcí lithium-iontové baterie je grafitová anoda (alternativou ke grafitu může být např. lithiový titanát), katoda je typicky tvořena solí lithia (resp. LiCoO_2 , LiFePO_4 , LiMn_2O_4 nebo jiná sloučenina) [4], a elektrolyt schopný přenosu lithiových iontů; typicky hexafluorofosforečnan lithný (LiPF_6), případně jiná sůl lithia (vždy rozpuštěná v organickém rozpouštědle). Tyto soli se působením vlhkosti rozkládají na kyselinu fluorovodíkovou a další organické komponenty, proto je nutné zamezit vniknutí vlhkosti do obalu baterie. Fyzikální vlastnosti některých z těchto komponentů uvádí Mikolajczak ([3]) v tabulce 2.1.

Z údajů v tabulce vyplývá, že v některých případech může dojít ke vzplanutí i při relativně malém zvýšení teplot.

| Elektrolyt | Molekulární vzorec | Teplota tání | Teplota varu | Teplota vzplanutí | Teplota samovznícení |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| Propylenkarbonát (PC) | $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_3$ | -49°C | 242°C | 135°C | 455°C |
| Ethylenkarbonát (EC) | $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$ | 36°C | 248°C | 145°C | 465°C |
| Dimethylkarbonát (DMC) | $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$ | 2°C | 91°C | 18°C | 458°C |
| Diethylkarbonát (DEC) | $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_3$ | -43°C | 126°C | 25°C | 445°C |
| Ethyl methylkarbonát (EMC) | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_3$ | -14°C | 107°C | 25°C | 440°C |

Tabulka 2.1: Tabulka rozpouštědel elektrolytů a jejich vlastností podle [3]

Další důležitou součástí konstrukce baterie je separátor, zabraňující přímému styku elektrod. Nejčastěji se používají porézní polyethylenové nebo polypropylenové fólie o tloušťkách okolo $20\mu\text{m}$. Tyto porézní materiály umožňují přenos lithiových iontů difuzí při normálních procesech nabíjení a vybíjení baterie, ale při zvýšených teplotách (okolo 140°C) změni své fyzikální vlastnosti, přestanou ionty propouštět a přerušují tak elektrický obvod v daném bodě. Pokud však teplota stoupne nad cca 150°C , dojde k úplnému roztavení separátoru a přímému kontaktu obou elektrod. Jedním z možných způsobů zvýšení kapacity článku může být např. volba tenčího separátoru, což zvyšuje pravděpodobnost selhání článku (snazší poškození separátoru).

Posledními nezbytnými konstrukčními částmi jsou vnější obaly (ať už ve formě kovových válcových kontejnerů, hermetických kovových fólií apod.) a kolektory (připojení elektrod k vnějšímu obvodu). Tyto součásti jsou z hlediska požární bezpečnosti důležité především kvůli funkci mechanické ochrany.

Většina baterií je také vybavena vnitřní elektronikou s ochrannými funkcemi proti nežádoucím jevům (tato ochrana může být implementována i na straně spotřebiče).

2.3 Konstrukce Ni-MH baterie

Ni-MH baterie má většinu základních stavebních prvků podobnou s Li-ion baterií. Kladnou elektrodu v tomto případě tvoří oxid-hydroxid nikelnatý ($\text{NiO}(\text{OH})$), zápornou elektrodu slitina schopná vázat vodík (typicky obsahující nikl, kobalt, mangan a vzácné kovy). Jako elektrolyt slouží vodní roztok hydroxidu draselného (KOH), separátory jsou běžně tvořeny polyamidy, polyolefiny nebo jejich kombinací. Vnější obaly mají obvykle ventil pro případ nadměrného tlaku uvnitř baterie (typicky vzniklého např. uvolňováním plynů z elektrolytu elektrolýzou při přebíjení, nebo přehřátím baterie při nabíjení/vybíjení neúměrně vysokými proudy) a nejsou náchylné k výbuchům či požárům. Únik části elektrolytu ventilem nicméně snižuje jejich kapacitu.

2.4 Ochranná elektronika

Ochranná elektronika má za úkol zabránit poškození baterie. Typicky nežádoucími jevy jsou:

- Přebíjení baterie, t.j. překročení maximálního bezpečného napětí. Přebíjení vede k přehřívání baterie (a následnému tepelnému rozkladu elektrolytu, uzavírání pórů separátoru atp.), a tedy riziku vznícení nebo exploze [5].
- Nadměrné vybíjení baterie, t.j. pokles minimálního napětí. To samo o sobě nemusí vést k okamžité zkáze baterie, nicméně výrazně snižuje celkovou životnost baterie (může vést ke korozi kolektorů a tedy ke

Kapitola 3

Bezdotykové senzory teploty

Bezdotykové měření teploty je zpravidla založeno na principu vyhodnocení intenzity elektromagnetického záření vyzařovaného měřeným objektem. Podle Stefan-Boltzmannova zákona vyzařují všechny objekty o teplotě vyšší než 0K záření o intenzitě I , kde intenzita je přímo závislá na teplotě podle vztahu

$$I = \epsilon\sigma T^4 \text{ [Wm}^{-2}\text{]}, \quad (3.1)$$

ve kterém ϵ je vlastnost povrchu tělesa vyjadřující schopnost tepelné záření vyzařovat (emisivita, $0 < \epsilon \leq 1$) a σ je Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. Toto záření nazýváme tepelným zářením.

Podle Wienova posunovacího zákona

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (3.2)$$

($b = 2,898\text{mmK}$, Wienova konstanta) vyzařují objekty o běžných teplotách (řádově stovky K) maximum energie na vlnových délkách v IR spektru. IR podle nejběžnějších definic pokrývá rozsah vlnových délek $0,7 - 1000\mu\text{m}$, ze kterého většina dostupných senzorů vyhodnocuje pouze určité pásmo. U měřicích zařízení se většinou používá následující dělení na vybrané podoblasti spektra [9], kterého se tato práce drží:

- LWIR (Long Wavelength Infrared, $8 - 14 \mu\text{m}$).
- MWIR (Middle Wavelength Infrared, $3 - 5 \mu\text{m}$).
- SWIR (Short Wavelength Infrared, $0.9 - 1.7 \mu\text{m}$).

3.1 Základy bezdotykového měření teploty, zdroje chyb

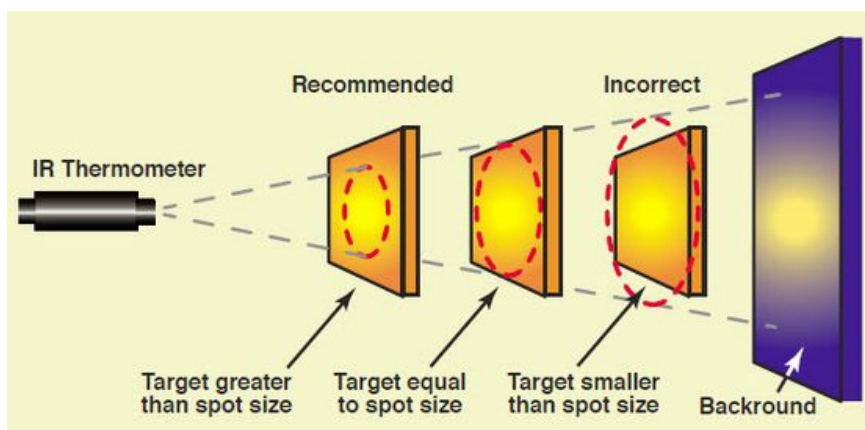
Vztah (3.1) napovídá jeden častý zdroj chyb, kterým je chybně zvolená emisivita ϵ . Dosazením chybné hodnoty ϵ snadno znehodnotíme celé měření a zjištěná teplota nebude odpovídat realitě. Pokud hodnotu ϵ neznáme, nebo je příliš nízká (tedy těleso má vysokou odrazivost, viz dále), můžeme využít úpravu měřeného povrchu na známou hodnotu emisivity, např. nalepením nálepky nebo barvy o známé emisivitě. Další možností je emisivitu experimentálně zjistit (změřením tepelného toku při známé teplotě). Obecně je emisivita závislá na konkrétní vlnové délce. Běžně jsou tělesa, která mají pro určitý rozsah vlnových délek konstantní emisivitu, označována jako šedá. Pokud hodnota emisivity takového tělesa je $\epsilon = 1$, mluvíme o černém tělese. Je-li zároveň rozsah pohlcovaných vlnových délek celé spektrum, mluvíme o tělese absolutně černém [10].

Dalším zdrojem chyb je IR záření z okolí - pokud se těleso nechová jako absolutně černé, tak odráží určité procento dopadajícího záření od svého povrchu. Pokud má měřené těleso vysokou odrazivost, může naměřená hodnota odpovídat teplotě odražené a nikoliv teplotě tělesa. IR záření od těles s výrazně jinou teplotou je vhodné odstínit, a emisivita měřeného povrchu by měla být co nejvyšší (povrch co nejméně odrazivý).

Třetím zdrojem chyb je výběr senzoru s vhodnými parametry - vhodně zvolená citlivost na určité vlnové délky a vhodně zvolené zorné pole senzoru (FOV, Field of View). Při měření je nezbytné, aby měřený objekt zcela zaplnil FOV měřicího senzoru, v opačném případě společně s měřeným objektem měříme i pozadí (typicky chladnější). Při příliš širokém FOV je možné objekt "napasovat" do správné polohy zmenšením vzdálenosti měřený objekt - senzor. Jinak řečeno, každý senzor nám svým FOV definuje maximální vzdálenost pro měření objektu dané velikosti.

3.2 Pyrometry

Nejjednodušším senzorem k bezdotykovému měření je pyrometr, který lze považovat za termální kameru o rozlišení 1px. Při měření pyrometrem je pro správný výsledek nutné, aby měřené těleso zcela vyplnilo zorné pole (Field of View, FOV), jinak dochází k chybě měření.



Obrázek 3.1: Znázornění správného FOV/vzdálenosti, převzato z [1]

■ 3.2.1 Poměrové pyrometry

Poměrové pyrometry měří intenzitu záření na dvou rozdílných vlnových délkách. Z Planckova zákona lze ukázat, že poměr intenzit vyzařování na dvou různých vlnových délkách je pro každou teplotu unikátní. Tyto pyrometry jsou technicky náročné (tedy drahé) a obecně vhodné pro měření teplot v řádech stovek °C a výše.

■ 3.2.2 Úhrnné, pásmové a monochromatické pyrometry

Úhrnné a pásmové pyrometry vyhodnocují teplotu z celého spektra vlnových délek nebo jeho části aplikací Stefan-Boltzmannova zákona. I u úhrnných pyrometrů dochází vlivem optiky k omezení jejich citlivosti na určité vlnové délky a de facto fungují jako (široko)pásmové. Naopak monochromatické pyrometry v ideálním případě vyhodnocují pouze diskretní vlnovou délku (prakticky pak jde spíše o úzkopásmové). U monochromatických pyrometrů se pak používají kvantové detektory. Ty ovšem vyžadují chlazení, což opět zvedá cenu a složitost přístroje.

■ 3.3 Termokamery

Vícepixelové detektory IR záření označujeme jako termokamery, jejichž výstup je obvykle prezentován ve formě obrazu, kde jednotlivé barvy reprezentují

úrovně teploty jako termogram. Snímače nejrozšířenějších termokamer jsou obvykle realizovány jako dvourozměrné mikrobolometrické pole (bolometr je teplotně závislé odporové čidlo ohříváné dopadajícím IR zářením).

3.3.1 Field of view

Oproti jednopixelovému pyrometru není nutné, aby měřený objekt zabíral celé FOV. Důležitým parametrem zde je IFOV (Instantaneous Field of View), což lze chápat jako FOV jednoho pixelu. Také zde již rozlišujeme zorné pole horizontální (HFOV, HIFOV) a vertikální (VFOV, VIFOV). IFOV je možné stanovit ze znalosti FOV a rozlišení kamery ($V \cdot H$). [2]

$$IFOV_{horizontal,angle} = \frac{FOV_{horizontal}}{H} \frac{\pi}{180} [Rad] \quad (3.3)$$

$$IFOV_{horizontal} = IFOV_{horizontal,angle} \cdot distance [m] \quad (3.4)$$

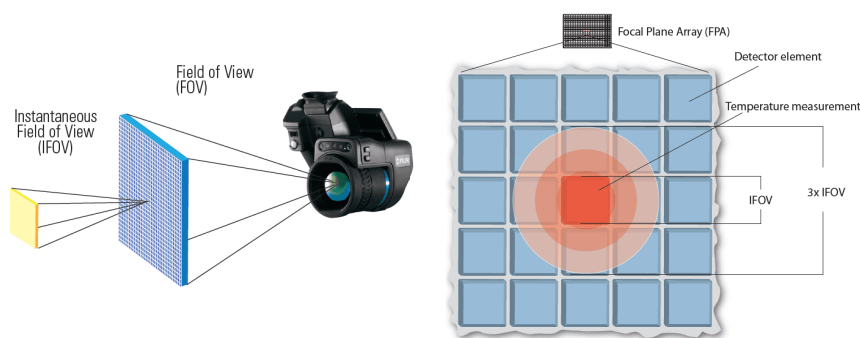
U některých výrobců se namísto $IFOV$ uvádí poměr mezi maximální vzdáleností a velikostí měřeného objektu značený SSR (spot size ratio) definovaný jako

$$SSR = IFOV_{horizontal} : distance. \quad (3.5)$$

Například kamerou mající SSR 1 : 36 je možné teoreticky korektně měřit objekty velikosti 1cm ze vzdálenosti 36cm (resp. objekt velikosti 1cm zabere na snímači plochu 1px). V reálné aplikaci chceme, aby měřený objekt zabíral co nejvíce pixelů, pro správné vyhodnocení teploty alespoň plochu 3x3px - IFOV pak počítáme třetinové oproti výsledku vzorce (3.4). Dražší termokamery mají vyměnitelné objektivy umožňující změnu FOV (a tedy i IFOV), v případě levnějších čipů je běžné IFOV v řádech setin až desetin rad , tedy pro měření objektů velikosti řádově 1dm je zapotřebí vzdálenost senzor-objekt nejméně několik jednotek metrů.

3.3.2 Homogenita obrazu

Každý pixel snímače (mikrobolometr v matici) má mírně odlišnou citlivost, která je závislá na teplotě senzoru. Protože se během provozu senzor nerovnoměrně zahřívá, musí být výrobcem kompenzován teplotní drift jednotlivých pixelů, aby byla zajištěna homogenita obrazu. Tento proces se běžně nazývá NUC (non-uniformity correction) nebo FFC (flat field correction) [11]. Pro



Obrázek 3.2: Vizualizace FOV a IFOV termokamery převzatá z [2]

kompensaci teplotního driftu je nutné jednou za čas (typicky periodicky po několika minutách nebo při výrazné změně teploty senzoru) získat homogenní obraz o známé teplotě pohledem na černé těleso známé teploty (mnoho sensorů pro tento účel využívá interní závěrku; případně je možné použít externí černé těleso - takový přístup umožňuje korigovat i odchylky způsobené tepelným zářením objektivu a samotného těla termokamery). Na takto získaném obraze vypočte sensor nové korekční koeficienty, které následně aplikuje na měřená data. Během získávání homogenního obrazu a výpočtu koeficientů nejsou na výstupu senzoru k dispozici aktuální obrazová data, celý proces typicky trvá okolo 1 s.

Protože závěrka je náchylná k poškození (mechanický prvek) a směřovat termokameru periodicky na černé těleso nebývá vždy možné, existují i bezzávěrkové (shutterless) senzory, jejichž princip popisuje např. [12]. Tyto senzory namísto výpočtu korekčních koeficientů během provozu drží v paměti z výroby předpočítané koeficienty pro různé teploty elektroniky. Tento přístup ale neumožňuje korekci při nerovnoměrně zahřátém senzoru.

3.4 Termogram

Digitální obraz je definován jako funkce $f(x, y)$, která každému bodu o souřadnicích $[x, y]$ na dané ploše přiřadí barevnou hodnotu [13]. Pokud tuto definici rozšíříme tak, aby kromě obrazové hodnoty byla součástí přiřazené hodnoty i informace o teplotě, mluvíme o termogramu.

Kapitola 4

Přehled dostupných systémů pro kontrolu nabíjecích procesů

4.1 Řízení nabíjení

Řízení nabíjení baterie je jednou z nejdůležitějších funkcí systému řízení baterie (Battery Management System, BMS). Kontrola nabíjecího procesu umožňuje zabránit přebíjení, přepětí, řídit rychlost nabíjení atd. Tyto funkce vedou k lepšímu výkonu baterie, prodloužení její životnosti a snížení rizika bezpečnostních hrozeb a úbytku kapacity. Řízení je většinou implementováno v nabíjecím zařízení [14].

Ačkoliv existují i BMS, které kromě nejběžnějších přístupů k řízení nabíjení, založených na měření proudu a napětí, využívají i složitější modely včetně hlídání teploty [15], tyto nejsou příliš rozšířené pro svou složitost a cenu. Primárním účelem těchto zařízení je optimalizace procesu nabíjení. Vzhledem k tomu, že až 80 % případů požáru baterie elektrického vozidla vznikne v průběhu nabíjení [16], mají tato zařízení výrazný vliv na eliminaci těchto jevů.

4.2 Externí požární ochrana

Kromě ochranných prvků, které jsou přímo součástí nabíjecího zařízení (nebo spotřebiče), je vhodné použít i externí ochranné prvky. Tyto mohou mít podobu různých typů detektorů požáru, např. externích senzorů teploty (termokamera, pyrometr), které na rozdíl od ostatních typů detekce (detektory kouře) mohou vzniku požáru zcela zabránit. Na trhu se aktuálně objevují řešení cílená především na velká bateriová úložiště - senzory určené pro průmyslovou integraci a nikoliv pro domácí použití.

4.2.1 Existující řešení

Na trhu se začínají objevovat komerční varianty navrhovaného systému. Zpravidla se jedná o zařízení navržená pro kontrolu velkých průmyslových zařízení (nejen bateriových úložišť) s primárním zamýšleným použitím v součinnosti s průmyslovými PLC systémy, příklady jsou uvedeny v tabulce 4.1. Možnosti jejich nasazení v domácím prostředí jsou velmi omezené (nevhodné komunikační protokoly, vysoká cena). Pro domácí aplikace jsou dostupná především různá zařízení určená pro ruční manipulaci jako např. Secutek HT-04D [17] nebo Bosch GTC 400 C [18], popř. moduly pro připojení k chytrému telefonu jako Seek Thermal Compact [19]. Žádný ze zmíněných produktů se nehodí ke stacionární aplikaci. V současnosti se na trhu nenachází žádné open-source řešení vhodné pro domácí bezpečnostní aplikaci.

| Kamera | Cena | Rozlišení | Viditelné Spektrum | Rozhraní |
|-----------------------------|-----------|-----------|--------------------|-------------------------------|
| Hikvision DS-2TD1217-2 [20] | 16000Kč | 160 × 120 | Ano | Webserver ONVIF MODBUS |
| FLIR A50 [21] | 200 000Kč | 640 × 480 | Ano | TCP/IP MODBUS webserver |
| Workswell Safetis EV [22] | 30 000Kč, | 160 x 120 | Ne | Webserver MODBUS |

Tabulka 4.1: Přehled vybraných kamer pro požární prevenci

Všechny kamery zmíněné v tabulce 4.1 jsou navrženy především pro průmyslové aplikace (jak vyplývá např. z použití průmyslového protokolu MODBUS).

4.3 Dostupné senzory pro stavbu systému

Dále je ukázán přehled čipů a modulů vhodných pro stavbu vlastního systému, které se nachází na trhu

4.3.1 SWIR

SWIR kamery jsou kamery pracující typicky v pásmu vlnových délek 0,9 – 1,7 μm . Jejich hlavní výhodou je průchodnost záření vodními mraky a také snadná rozpoznatelnost měřených objektů laikem (díky své blízkosti viditelnému spektru). Nevýhodou bývá zejména cena - senzory jsou složitější, vyžadují zpravidla aktivní chlazení, a také nejsou zcela ideální pro přesné měření běžných teplot vzhledem ke vzdálenosti užité části spektra od optimálních vlnových délek, na kterých vyzařují objekty o běžných teplotách nejvíce energie (v měřeném rozsahu mají maximum vyzářené energie objekty o teplotách v řádech tisíců $^{\circ}\text{C}$). Moduly na trhu mají zpravidla vyměnitelný objektiv umožňující změnu zorného pole v širokém rozsahu.

| Označení čipu | Cenová hladina [Kč] | Rozlišení [px] | FOV [$^{\circ}$] | Max. vzdálenost [m] |
|--------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|
| Atlas Swir [23] | >100 000 Kč | 640 x 512 | 45 x 37 | 81,5 |
| Widy [24] | >100 000 Kč | 320 x 540 | 20 x 15 | 206,3 |
| Allied vision [25] | >100 000 Kč | 640 x 512 | 45 x 37 | 81,5 |

Tabulka 4.2: Některé moduly se senzorem SWIR na trhu a vypočtená maximální vzdálenost pro měření objektu 10x10cm (podle (3.4)) pro objektiv s typickým HFOV 45 $^{\circ}$

4.3.2 MWIR

MWIR kamery se zpravidla k měření teplot vůbec nepoužívají, jsou totiž náchylné na atmosférické podmínky (záření v této části spektra je pohlcováno vodní párou a oxidem uhličitým), vyžadují kryogenické chlazení (násobně vyšší ceny). Jejich hlavní užití je detekce úniků plynů, právě díky tomu, že velké množství plynů tuto část spektra pohlcuje. Takové užití je zcela mimo rámec této práce.

4.3.3 LWIR

LWIR kamery jsou kamery pracující typicky v pásmu vlnových délek 8–14 μm . V těchto vlnových délkách je vyzařovací maximum objektů na běžné (pokojevé) teplotě (podle Wienova posunovacího zákona vyzařují objekty o teplotě 30 °C maximum energie na vlnové délce přibližně $\lambda = 10 \mu\text{m}$). Tyto senzory jsou poměrně rozšířené, zpravidla nevyžadují aktivní chlazení snímače. Nevýhodou je např. nepropustnost běžného křemíkového skla na těchto vlnových délkách (senzor "nevidí" skrz okno, jakékoliv objektivy a čočky musí být ze speciálního, např. germaniového skla). Pro zamýšlenou aplikaci se jeví jako nejvhodnější. Také všechny systémy diskutované v 4.2.1 využívají LWIR senzory.

| Označení čipu | Cenová hladina [Kč] | Rozlišení [px] | FOV [°] | Max. vzdálenost [m] |
|-----------------|------------------------|-------------------|-------------|------------------------|
| AMG8833 [26] | <1000 | 8 x 8 | 60 x 60 | 0,76 |
| MLX90640 [27] | <3500 | 32 x 24 | 55 x 35 | 3,93 |
| M256 [28] | >100 000 | 256 x 192 | 42 x 32,1 | 34,92 |
| 265IR [29] | >100 000 | 256 x 192 | 44,9 x 33,4 | 32,94 |
| Lepton 3.5 [30] | <5000 | 160 x 120 | 56 x 50 | 13,75 |
| Lepton 2.5 [31] | <4000 | 80 x 60 | 50 x 50 | 6,88 |
| MIR8060B1 [32] | <4000 | 80 x 60 | 78 x 53 | 5,88 |

Tabulka 4.3: Některé senzory LWIR na trhu a vypočtená maximální vzdálenost pro umístění objektu 10x10cm (podle (3.4)) do jednoho pixelu (pro oblast 3x3 pixelů nutné vydělit 3)

Kapitola 5

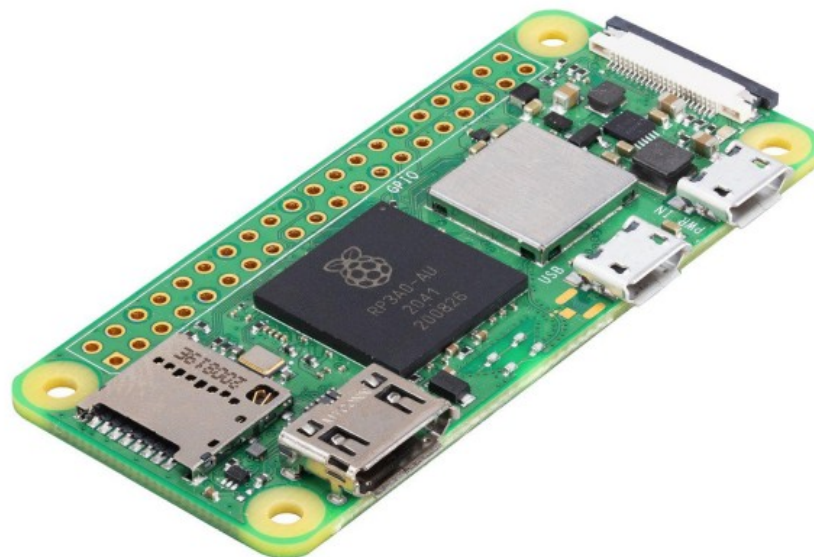
Popis navrhovaného hardwareového řešení

Cílem této práce je navrhnout levné, snadno implementovatelné zařízení, které je schopné monitorovat teplotu sledovaného objektu (baterie) a signalizovat poruchu či přes aktivní prvek (relé) zařízení přímo odpojit.

5.1 Výpočetní jednotka

Jako základ přípravku byla zvolena vývojová deska Raspberry Pi Zero 2W, open-source hardware s čtyřjádrovým procesorem Arm Cortex-A53 taktovaným na frekvenci 1 GHz, 512 MB RAM, integrovanou WiFi anténou a možností připojit další periferie přes konektor HAT (Hardware on Top). Jedná se o dostupný, levný (méně než 500 Kč) a celosvětově rozšířený mikropočítač. Při pokusech s téměř identickým počítačem Banana Pi Zero (jedná se o jeden z mnoha "klonů" vyráběných jiným výrobcem, který disponuje méně výkonným procesorem ARM Cortex-A7) se ukázala nedostatečnost nižšího výkonu procesoru, projevující se zejména mnohem častějšími výpadky komunikace se senzorem (více v 6.4.1).

Výhodou zvolené výpočetní jednotky je především její dostupnost a rozšířenost, nesoucí s sebou velkou komunitu uživatelů, nízká cena a možnost výběru již odzkoušeného operačního systému pro základní práci s periferiemi.

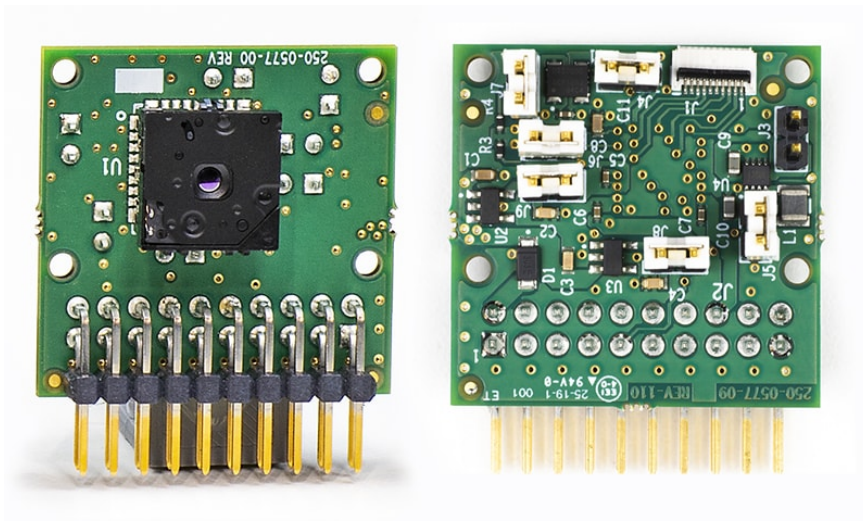


Obrázek 5.1: Raspberry Pi Zero 2W, foto výrobce

5.2 Senzory

Zdrojem obrazových a teplotních dat je senzor FLIR Lepton 3.5 s uváděným teplotním rozsahem $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $85\text{ }^{\circ}\text{C}$, volitelně až $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, s udávanou chybou okolo 2 K a rozlišením $160 \times 120\text{ px}$. Pokud vycházíme z vlastností uvedených v datovém listu [30], s použitím vzorce (3.4) získáme IFOV $0,4^{\circ} \times 0,4^{\circ}$, tedy pokud chceme objekt o velikosti $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ umístit do obrazu tak, aby pokryl alespoň plochu 3×3 pixely, nesmí být od senzoru vzdálenější než $4,3\text{ m}$. Senzor disponuje připojením pomocí VoSPI (Video Over SPI) a I²C sběrnic, snadno hardwarově přístupných v kombinaci s tzv. breakout boardem (rozvedení výstupních pinů senzoru na konektor typu HAT), který je uveden na trh přímo výrobcem senzoru.

Senzor společně s breakout boardem je možné zakoupit za méně než 5000 Kč .



Obrázek 5.2: Senzor v breakout board

■ 5.2.1 I²C

I²C (Inter-Integrated Circuit) je počítačová sběrnice používána k připojování nízkorychlostních periférií. Flir Lepton se hlásí adresou `0x2a`. Toto rozhraní senzoru je využito pro nastavování jeho parametrů, jako je formát výstupu (RGB/teplotní data) nebo proměnné prostředí (emisivita) použité senzorem pro korekci výpočtu teploty objektu z detekovaného teplotního toku.

■ 5.2.2 Video over SPI

VoSPI (Video over Serial Peripheral Interface) je rozhraní pro přenos videa pomocí sériové periferní sběrnice (SPI). Protože VoSPI je použito pouze pro přenos dat ze senzoru do CPU, není použit vodič MOSI (Master Out Slave In, popř. podle nově používaného značení PICO; Peripheral In Controller Out); pro zapojení jsou tedy zapotřebí pouze vodiče.

■ VSYNC

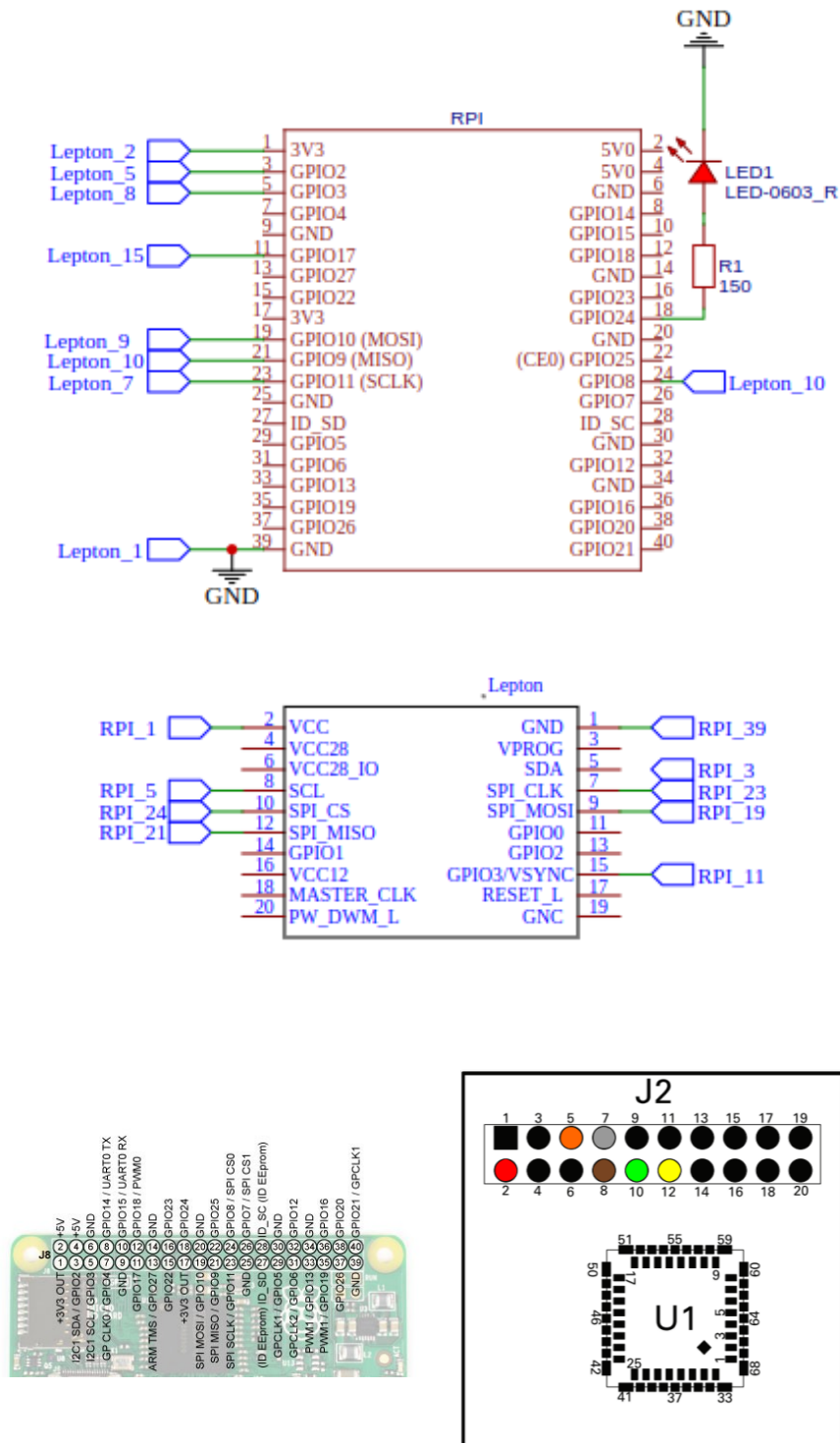
Pro zlepšení parametrů přenosu (popsáno v 6.4.1) se ukázalo nezbytné využití VSYNC signálu senzoru, signalizujícího začátek nového snímku, nad rámec

synchronizace přenosu VoSPI rozhraní. V závislosti na nastavení senzoru na VoSPI rozhraní může senzor poskytovat různé výstupy:

- RGB888 - RGB data (stupně šedi) obrazu, normalizovaná s použitím AGC (Automatic Gain Control, automatický rozsah obarvení). Tato data nenesou informaci o přesné teplotě.
- RAW14 - teplotní data, jednokanálový obraz 16-bitových unsigned hodnot (samotný detektor předává 14 bitů, horní 2 bity jsou vždy 0) reprezentující teplotu v kelvinech vynásobenou 100.

■ 5.3 Akční členy

Na demonstračním přípravku je namísto akčních členů zapojena pouze signalizační LED. Tyto lze nahradit spínacími (odpojovacími) prvky, bzučáky atp.



Obrazek 5.3: Elektronické propojení vývojové desky a breakout boardu s kamerou



Kapitola 6

Programové vybavení navrženého systému

Programové vybavení je založeno na nejrozšířenějším operačním systému pro zvolený hardware, tj. OS Raspbian verze 12 (označení bookworm), linuxovou distribucí vycházející z rozšířeného Debianu s linuxovým jádrem 6.6 (verze s prodlouženou podporou vydaná 30. 11. 2023 s koncem životnosti v závěru roku 2026). Veškeré programové vybavení přípravku je navrženo jako open source projekt, opírající se o existující open source knihovny.

Oproti out-of-the-box operačnímu systému je nutné udělat několik změn, jmenovitě aplikovat změny v device-tree, které umožní využití potřebných sběrnic procesoru. V této kapitole se nachází návodný popis těchto změn a popis samotné aplikace vyhodnocující data ze senzoru z hlediska implementace.

6.1 Struktura operačního systému - použité pojmy

6.1.1 Rozdělení user space a kernel space

Kernel-space

Kernel space je oblast virtuální paměti, ve které běží jádro operačního systému (kernel) a kde mají běžet všechny procesy, které potřebují přímý přístup k hardwaru a systémovým prostředkům. Tato část paměti je vysoce chráněná; pouze kód jádra a privilegované procesy (obvykle ovladače periferií) mají právo v ní operovat. Omezený přístup do kernel space zabraňuje uživatelským procesům způsobení pádu nebo poškození systému; chyby v kernel space mohou vést k závažným problémům, jako jsou pády systému (kernel panics).

User-space (uživatelský prostor)

User space je oblast virtuální paměti, kde běží všechny uživatelské aplikace a procesy. Tento prostor je oddělený od kernel space, aby se zajistila stabilita a bezpečnost systému. Aplikace běžící v user space nemají přímý přístup k hardwaru ani k systémovým prostředkům. Pokud potřebují přístup k těmto prostředkům, musí komunikovat s jádrem prostřednictvím systémových volání (system calls, syscalls). Tím, že uživatelské aplikace nemají přímý přístup k systémovým prostředkům, se minimalizuje riziko, že chyba v aplikaci ovlivní jiné běžící procesy; procesy běžící v user space jsou oddělené, což znamená, že selhání jednoho procesu obvykle neovlivní ostatní procesy ani jádro operačního systému.

Komunikace mezi kernel-space a user-space

Komunikace mezi těmito dvěma prostory se uskutečňuje prostřednictvím systémových volání. Když proces v user space potřebuje vykonat operaci, která vyžaduje přístup k hardwaru nebo jiným chráněným prostředkům, provede systémové volání. Toto volání způsobí přechod do kernel space, kde jádro (ovladač) vykoná požadovanou operaci a poté se vrátí zpět do user space s výsledkem.

6.1.2 Device tree

Device tree (strom zařízení, český ekvivalent se ale běžně nepoužívá) je strukturovaný popis hardware. Skládá se z hierarchie uzlů, které představují jednotlivá zařízení a jejich vlastnosti. Tyto informace jsou používány operačním systémem při inicializaci a konfiguraci hardwaru počítače (kontroléru). Operační systém mimo jiné z device tree vyčte, jaké dostupné ovladače jsou případně pro danou periferii vhodné, a to bez nutnosti dalšího ručního konfigurování.

Device tree je obzvláště užitečný pro systémy s velkým množstvím různých zařízení, jako jsou například embedded systémy nebo systémy s mnoha sběrnicemi. Obvykle se ukládá do textového souboru, a je nutné jej přeložit do binárního souboru, tzv. device tree blobu (dtb), se kterým následně pracuje zavaděč (bootloader) a kernel operačního systému. U vývojových desek jako je Raspberry Pi Zero je časté, že je k dispozici připravený základní device tree blob nutný pro běh systému (popis základních rozhraní procesoru pro přístup k operační paměti a na jiné nutné periferie) a volitelných device tree overlay (dto), které vznikly také překladem dts souboru a fungují jako moduly/knihovny připojené k základnímu dtb.

6.2 Přizpůsobení operačního systému

6.2.1 Změny device tree

Pro připojení konfiguračního rozhraní detektoru přes sběrnici I²C je možné použít device tree overlay, který je již součástí operačního systému ("`i2c0.dtb`"). Jak bude vysvětleno dále, pro přenos obrazu se použití SPI ovladače ukázalo jako nevhodné, je tedy nutné zkompileovat a použít overlay "`flir-lepton-RPI`", který využívá SPI, ale odpovídající ovladač vystaví do user-space jako videozařízení (viz 6.4.1).

Výběr použitých overlayů se v operačním systému Raspbian provede úpravou konfiguračního souboru bootladeru, dostupného v cestě `/boot/firmware/config.txt` (ve verzích Raspbian 11 a starších pak `/boot/config.txt`), přičemž overlay se musí nacházet v cestě `/boot/firmware/overlays`. Pro správnou funkci ovladače senzoru je také nutné zvětšit výchozí velikost bufferu SPI přenosu tak, aby obsáhl celý rámec přenášený senzorem (z výchozí velikosti

9600B na 20480B) úpravou parametrů předávaných bootloaderem operačnímu systému. Tyto parametry jsou uvedeny v cestě `"/boot/cmdline.txt"`.

■ 6.2.2 Přepnutí režimu WiFi

Pro jednoduchost připojení k navrženému systému je vhodné nakonfigurovat interní Wi-Fi adaptér do režimu hot-spot. Tento přístup má kromě izolace zařízení od veřejně dostupných sítí výhodu při počáteční konfiguraci, neboť není nutné zjišťovat parametry a nastavení existující sítě k určení IP zařízení, chceme-li se k němu připojit; jako router sítě bude vždy dostupné na své výchozí IP (10.42.0.1). Přesto pro integraci do IoT aplikací je možné zařízení přenastavit a připojit k existující domácí bezdrátové síti (běžnými prostředky operačního systému), popřípadě je možné připojení zajistit přes běžně dostupný adaptér USB-Ethernet.

■ 6.2.3 Inicializace pinů pro akční člen

Inicializace GPIO výstupních pinů poskytujících logickou úroveň pro signalizaci či spínání akčního členu je možná pouhým nastavením daného pinu jako výstupního za běhu systému pomocí zápisu čísla pinu do souboru `/sys/class/gpio/export`.

■ 6.3 Spouštění aplikace

Veškeré vyhodnocování a komunikaci obstarává jedna aplikace napsaná v jazyce C/C++, která je službou operačního systému, a tedy spustí se automaticky při každém startu OS.

■ 6.4 Systémové závislosti a použité knihovny

Díky zvolenému kitu je možné se při návrhu firmware zařízení opřít o standardní knihovny jazyka C++ a linuxového prostředí (`thread`, `unistd` atd.),

knihovny Qt frameworku (obojí pod open source licencí GPL), a knihovny boost (Boost Software License, také open source). Další zásadní knihovnou je rozhraní pro nastavování senzoru poskytnuté výrobcem pod proprietární FLIR licencí, umožňující volné použití pro většinu open source aplikací (zakazující především využití SW v aplikacích využívaných v obranném sektoru). Při zpracování RGB dat je využita také rozšířená knihovna OpenCV (apache licence, open source).

6.4.1 Přenos obrazu ze senzoru

Jak bylo zmíněno v 5.2.2, pro přenos obrazových dat je využito VoSPI rozhraní. Senzor je schopný předávat buď obarvená data (RGB 888, z těchto dat není možné zpětně dopočítat teplotu objektu), nebo 16-bitový jednobitový obraz reprezentující teploty. Dále se budeme zabývat pouze druhou variantou.

VoSPI protokol

Lepton 3 VoSPI protokol je založen na hierarchických typech: [30]

- VoSPI Packet je minimální přenášená jednotka, každý paket obsahuje
 - 2 byty ID
 - 2 byty CRC (použitý polynom $x^{16} + x^{12} + x^4 + x^0$)
 - 160 bytů dat
- VoSPI Segment je souvislá sekvence paketů obsahující data pro 1/4 framu (pro případ použitého Leptonu 3.5, předchozí generace měla rozlišení 80×60 px; segment byl tedy celý frame).
- VoSPI Stream je definován jako souvislý stream framů.

Přenos vždy probíhá tak, aby jednotlivé segmenty přicházely s frekvencí 106Hz (tj. frame rate $\frac{106}{4}$ Hz = 26.5Hz), přičemž senzor splňuje exportní omezení USA, které nepovoluje volnou distribuci termokamer s frekvencí 9Hz nebo vyšší. Každý frame je tedy odeslán třikrát duplicitně, což znamená, že framerate unikátních framů je $\frac{26.5}{3}$ Hz = 8.8Hz, a 2/3 přijatých dat lze bez dalšího zpracování ignorovat.

■ Synchronizace přenosu dat

Pro úspěšný přenos streamu je nutné stanovit a udržovat synchronizaci přenosu jednotlivých framů nad rámec synchronizace stanovené SPI protokolem. Stanovení synchronizace probíhá následujícím způsobem: nejprve se signál chip select deaktivuje na dobu delší než 185ms, aby se senzor vrátil do výchozího stavu. Ve výchozím stavu posílá senzor s opětovně aktivovaným CS neplatné pakety, dokud není nějaký paket korektně vyčten ovládacím zařízením. Tím je synchronizace stanovená a následují datové pakety. Každý paket je nutné na straně přijímače vyčíst celý, jinak dojde ke ztrátě synchronizace a je nutné celým procesem projít znovu. Z tohoto důvodu není možné vyčítat pouze unikátní framy, ale i duplicitní framy (každý frame 3x).

Během návrhu zařízení se ukázalo, že senzor je velice náchylný na ztráty synchronizace a že i malé odchylky v časování, způsobené například vytížením procesoru kopírováním dat, vedou k nutnosti často přerušovat přenos a znovu navazovat synchronizaci, zejména při použití výchozích ovladačů systému pro SPI. Protože navázání synchronizace z user space může trvat až 10 sekund, jsou ztráty velice omezující pro využitelnost senzoru v jakékoliv automatické aplikaci včasného varování.

Tento nežádoucí jev jde výrazně omezit za použití dedikovaného ovladače pro VoSPI Leptonu, který využívá možnost získat ze senzoru VSYNC signál signalizující začátek framu a zabránit tak driftu hodin přenosu. Takový ovladač byl napsán a uvolněn pod GPL licenci pro vývojové desky BeagleBone a Raspberry Pi 3 [33] používající kernel 5.10 v kombinaci s předchozí generací FLIR Lepton 2.5. Tento ovladač byl v rámci této práce naportován na použitý Rpi Zero 2W a použitý kernel 6.6. Ovladač je navržen jako out-of-tree modul, není tedy nedílnou součástí kernelu operačního systému a lze jej zavést za běhu OS před startem user space aplikace. Pro jeho korektní funkčnost je nutné nejprve senzor nakonfigurovat pro přenos konkrétního formátu dat (16-bitové hodnoty jednonábového obrazu nesoucí teplotní data) a především aktivovat VSYNC signál, který Lepton volitelně poskytuje. O to se musí postarat user-space aplikace prostřednictvím I²C rozhraní.

Ovladač využívá fyzické SPI rozhraní a VSYNC signál pro synchronizaci a do user-space vystaví již deskriptor video zařízení (`/dev/videoX`). Protože velikost segmentu se mezi verzemi Leptonu nezměnila, pouze jednotlivé segmenty nesou pouze část obrazu, hlavní aplikace běžící v user space pouze seskládá obraz.

■ Zpracování obrazu

Přijaté segmenty je nutné identifikovat (poskládat z jednotlivých segmentů celý frame; vypořádat se s duplicitními framy a nevalidními framy přijímanými během korekce homogenity). Následně jsou data zpracována. Nejprve je vyhodnocena maximální teplota v obraze, v závislosti na ní je případně aktivován digitální výstup (LED, akční člen).

Poté je 16-bitový výstup senzoru (platných je vždy pouze 14 bitů) normalizován na 8 bitů, a to oříznutím krajních hodnot (změna zobrazeného rozsahu, saturace) a následně přemapováním zbylých hodnot na rozsah 0-255. Takto získané hodnoty lze chápat jako hodnoty obrázku ve stupních šedi, nebo jim přiřadit barvy podle předem definované look-up tabulky pro lepší vizualizaci. V případě navrženého přípravku je obraz prezentován ve stupních šedi s červeným překryvem pixelů překračujících nastavený práh (hodnotu maximální bezpečné teploty, jejíž překročení má vyvolat alarm).

■ 6.5 Protokoly a možnosti ovládání

Pro ovládání kamery a zobrazení výsledků je možné využít přímo monitor a klávesnici připojenou k zařízení a využít grafické UI navržené pomocí frameworku Qt widgetů. To však není příliš přívětivé; druhou možností je využít rozhraní telnet na portu 80 a RTSP stream enkódovaného videa. Bohužel v takovém případě je nutné počítat s několikasekundovým zpožděním videa, vynuceným omezením na straně enkodéru. Pro další iteraci by mohlo být vhodné prozkoumat možnosti webserveru na straně zařízení, který by umožnil ovládání přímo přes webový prohlížeč bez nutnosti další aplikace na straně klienta.

Kapitola 7

Uživatelské rozhraní

7.1 Grafické UI

Grafické okno pro ovládání pomocí klávesnice a myši přímo na zařízení obsahuje veškeré základní nastavení (volba jednotek, volba teplotního prahu pro sepnutí digitálního výstupu) a zobrazení obrazu v reálném čase. Případné změny nastavení na úrovni operačního systému (změna nastavení připojení k bezdrátové síti) je zatím možné dělat pouze přes UI samotného systému a nejsou zatím implementovány do navrženého programu.

7.2 Vzdálený přístup

Pro vzdálený přístup a ovládání přípravku je využita konektivita wi-fi (volitelně je možné s převodníkem USB-Ethernet využít i připojení přes ethernet). Ve výchozím nastavení přípravek vysílá vlastní wifi hotspot s SSID `BatteryGuard` a heslem `betterSafeThanSorry`, na který je možné se připojit. V této síti má přípravek statickou IP adresu `10.42.0.1`.



Obrázek 7.1: Grafické UI

7.2.1 Ovládací rozhraní

Na portu 2240 je přístupný TCP/IP server pro textový protokol. Zařízení se po připojení chová jako podřízená periferie, pouze odpovídá na přijaté zprávy a samo o sobě nic nevysílá. K odemknutí rozhraní je potřeba na počátku každého spojení zadat nastavitelné heslo. Seznam dostupných příkazů je uveden v tabulce 7.1.

7.2.2 Vzdálený přístup k videu

Pro zobrazení videa např. v mobilním telefonu nebo v domácím počítači je implementován RTSP (real time streaming protokol) server dostupný na portu 8554, poskytující dva video streamy o rozlišení 160×120 pixelů a 9 FPS:

- `rtsp://15.42.0.1:8554/streamRaw` - neenkódovaný stream obarveného videa se zpožděním $<1s$
- `rtsp://15.42.0.1:8554/streamH264` - enkódovaný stream podle standardu H.264, hardwarem omezení enkóderu použitého hardware způsobují

| Příkaz | Argument [typ] | Význam |
|--------|------------------------|--|
| cpw | heslo[string] | Zadáním hesla zpřístupní ostatní příkazy Výchozí heslo "nofire" |
| spw | heslo[string] | Nastaví heslo pro připojení |
| stv | thresh [float] | Nastaví hodnotu thresh (v aktuálně nastavených jednotkách) jako hranici alarmu |
| gtv | | Vrátí hranici alarmu (v aktuálně nastavených jednotkách) |
| stu | unit index [int] | Nastaví používané jednotky podle indexu (0 = K, 1 = °C, 2 = °F) |
| gtu | | Vrátí aktuálně používané jednotky (K, C, F) |
| srv | min[float] max [float] | Nastaví namísto auto rozsahu pro obarvení daný rozsah (v aktuálně nastavených jednotkách) |
| sra | | Nastaví automatický rozsah pro obarvení |
| gaa | | Vrátí aktuální stav překročení hranice alarmu (TRUE, FALSE) |
| glm | | Vrátí aktuální teplotní maximum v obrazu v nastavených jednotkách |
| sem | emisivita [float] | Nastaví emisivitu pro radiometrické výpočty |
| gem | | Vrátí aktuální nastavení emisivity |

Tabulka 7.1: Základní příkazy pro ovládání zařízení prostřednictvím textového TCP/IP protokolu

zpoždění přenášeného obrazu o zhruba 7 sekund oproti realitě.

Tento přístup umožňuje zobrazení streamu pomocí řady běžně dostupných a používaných media přehrávačů, jako je např. ffmpeg, gstreamer nebo mpv.

Kapitola 8

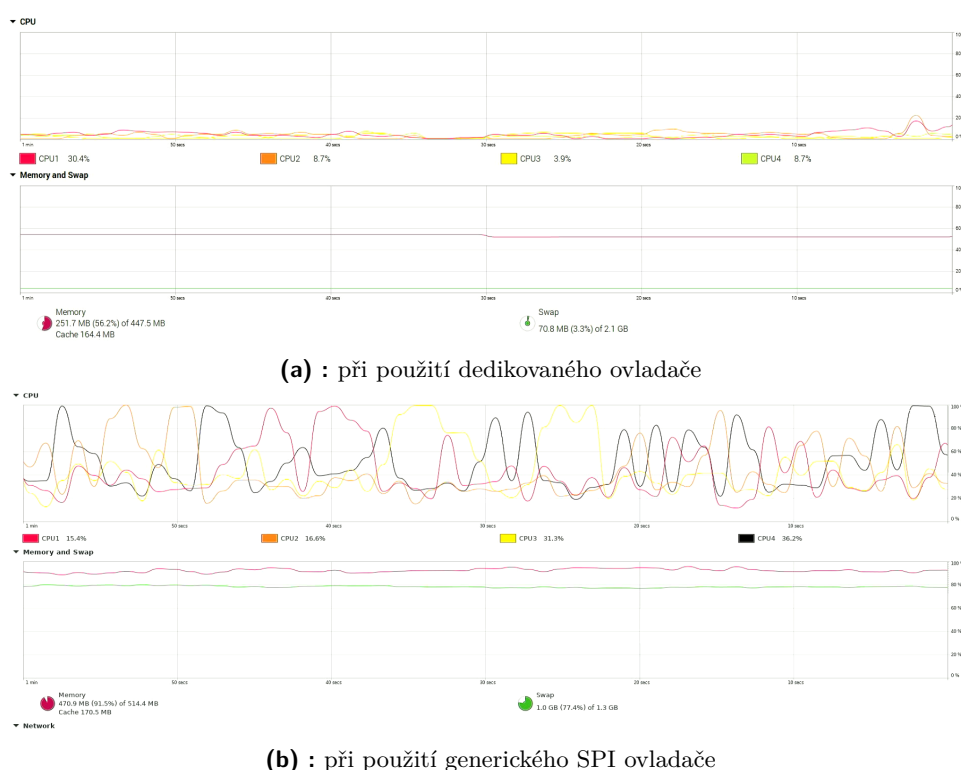
Zhodnocení parametrů systému

8.1 Výkonová náročnost

Spotřeba přípravku s běžící aplikací na přípravku je průměrně 210mA při napájení z 5V USB portu, tedy nižší než je maximální možná spotřeba elektrospotřebiče ve Stand-by režimu (0,5W podle nařízení Evropské komise 1275/2008); takový příkon lze považovat za přijatelně nízký. V případě požadavků na nižší spotřebu je možné např. namísto wifi využít drátové připojení a deaktivovat bezdrátové připojení.

8.2 Vytížení HW prostředků

Ve srovnání s původně uvažovaným přístupem vyčítání dat z SPI přímo do user space aplikace se i díky použití dedikovaného driveru podařilo snížit vytížení operační paměti o zhruba 50% a procesoru o zhruba 30%, a to i přes to že do aplikace postupně přibývají další možnosti (oproti prvním měřením např. digitální výstup). Toto zlepšení je možné připsat zejména omezení množství dat přenášených z kernel space do user space. Systém tak získal dostatečnou rezervu využití procesoru pro případné další rozšíření o další operace ne termogramu, např. definice menších oblastí pro vyhodnocení alarmu.



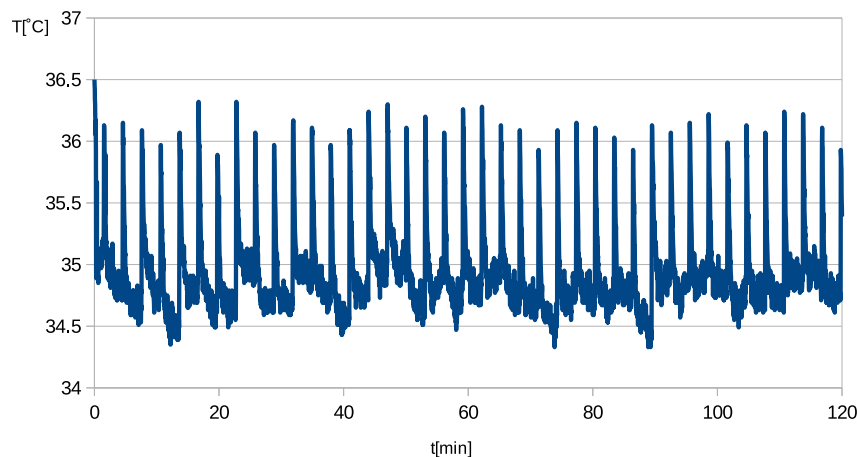
Obrázek 8.1: Srovnání využití HW prostředků při použití dedikovaného ovladače vs. při použití generického SPI ovladače a vycítání do ser space.

8.3 Přesnost a stabilita

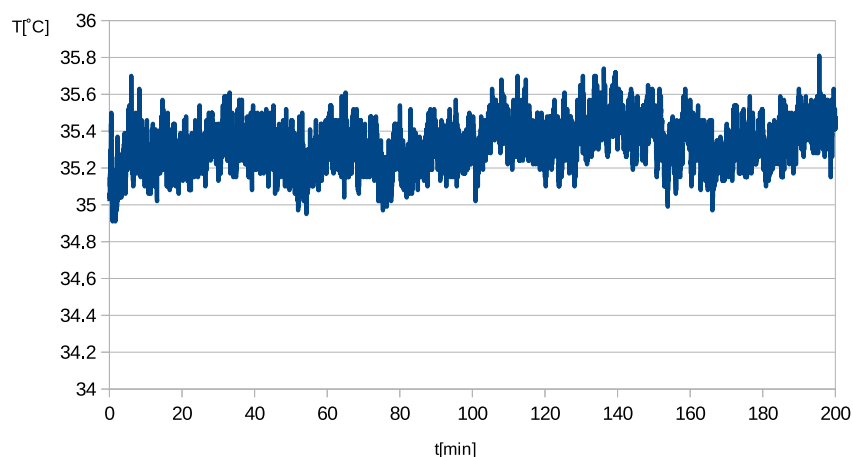
8.4 Časová stabilita

Při ověřování dlouhodobé stability sledováním černého tělesa je také splněna výrobcem udávaná přesnost, nicméně jsou znatelné (např. v průběhu měření černého tělesa o teplotě periodické špičky detekované teploty 35°C , viz obr. 8.2a) v okamžicích bezprostředně po automatickém provedení korekce homogenity (viz kap. 3.3.2). Ustálení těchto špiček trvá do 10s, a oproti střední hodnotě dosahují rozdílu až 2K (2,5K rozdíl naměřeného minima a maxima). Tato nepřesnost je stále v akceptovaném rozmezí, resp. v chybě udávané výrobcem. V případě že by takové špičky pro nějakou aplikaci přípravku výrazně negativně ovlivňovaly chování, je možné přepnout senzor do režimu manuální korekce, korekci vždy vyvolat z ovládací aplikace a definované 10s okno dat bezprostředně po korekci nebrat při vyhodnocování v potaz. Druhou možností je korekci neprovádět vůbec, testy ukazují že v takovém případě je maximální měřená teplota bez těchto špiček (obr. 8.2b), nicméně obraz je

mnohem víc zatížen šumem (obr. 8.3). Protože předpokládáme dlouhodobé využití přípravku a míra zašumění obrazu se s časem zhoršuje, nelze tento přístup obecně doporučit, nicméně za předpokladu stálých okolních podmínek je možné výrazně prodloužit intervaly mezi jednotlivými korekcemi.



(a) : Se zapnutou korekcí homogenity

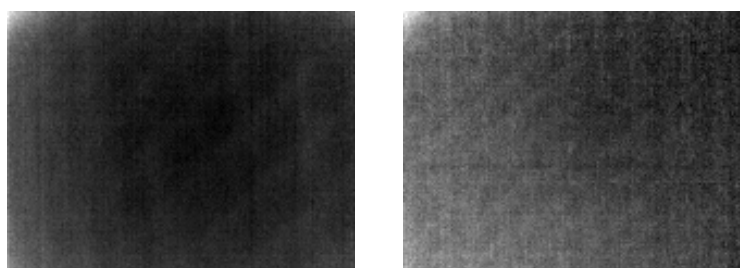


(b) : S vypnutou korekcí homogenity

Obrázek 8.2: Průběh detekované teploty při testu dlouhodobé stability

8.5 Závislost na vzdálenosti měřeného objektu

Pro reálné ověření přesnosti měření bylo použito dlouhodobé měření kalibračního černého tělesa o známé teplotě a emisivitě, měřeného ze známé vzdálenosti. Jak vyplývá z tabulky 8.1, výrobcem udávaná přesnost $\pm 5\text{K}$ (výrobcem garantovaná na černém tělese o teplotě 25°C [30]) je dodržena



(a) : Se zapnutou korekcí homogenity

(b) : S vypnutou korekcí homogenity

Obrázek 8.3: Srovnání obrazu při pohledu na homogenní černé těleso

do vzdálenosti 2m od měřeného tělesa, nejpřesnějších výsledků je dosaženo na vzdálenosti 1m. Kontrolní měření probíhalo při stále okolní teplotě 22°C po dobu 30 minut na každé kombinaci teploty černého tělesa a vzdálenosti senzoru s odečtem každou sekundu se zapnutou korekcí homogenity, v tabulce uvedené hodnoty jsou průměrem takto získaných hodnot.

| Teplota černého tělesa | Vzdálenost senzoru | 30cm | 100cm | 200cm | 300cm |
|---------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 30°C | | 30,7°C | 30,2°C | 29,6°C |
| 35°C | | 35,6°C | 34,9°C | 33,7°C | 32,9°C |
| 40°C | | 40,0°C | 38,9°C | 37,7°C | 37,2°C |
| 45°C | | 46,2°C | 44,0°C | 43,4°C | 42,0°C |
| 50°C | | 51,3°C | 48,9°C | 47,4°C | 46,3°C |
| 55°C | | 57,2°C | 54,0°C | 52,3°C | 50,5°C |
| 60°C | | 62,1°C | 59,6°C | 57,7°C | 55,7°C |
| 65°C | | 67,9°C | 64,9°C | 62,3°C | 59,9°C |
| 70°C | | 72,7°C | 69,5°C | 67,2°C | 67,0°C |
| 75°C | | 78,5°C | 74,6°C | 71,9°C | 70,6°C |
| 80°C | | 78,1°C | 74,0°C | 76,4°C | 75,3°C |

Tabulka 8.1: Srovnání teploty černého tělesa a teploty detekované senzorem na různých vzdálenostech

8.5.1 Emisivita baterie

Jak bylo diskutováno v kapitole 3.1, nejběžnějším zdrojem chyb při bezkontaktním měření teploty je nevhodně zvolená emisivita. Pro ověření emisivity běžných baterií bylo provedeno měření na úmyslně přehřáté (vyzkratované) chladnoucí baterii navrženým přípravkem a kontaktním teploměrem (termočlánek Voltcraft K204) s různými nastaveními emisivity. Touto metodou byla

stanovena emisivita běžných AA a AAA NiMH baterií na $\epsilon = 0,65$. Tato emisivita je relativně nízká, a je tedy třeba při instalaci dbát na to aby se v okolí kontrolované baterie nenacházel jiný výrazný zdroj tepla, jehož záření by mohlo být měřenou baterií odraženo. Bateriové packy uzavřené v plastovém obalu mají emisivitu blízkou hodnotám 0,9 [34], u takových je pak riziko odrazu mnohem nižší.

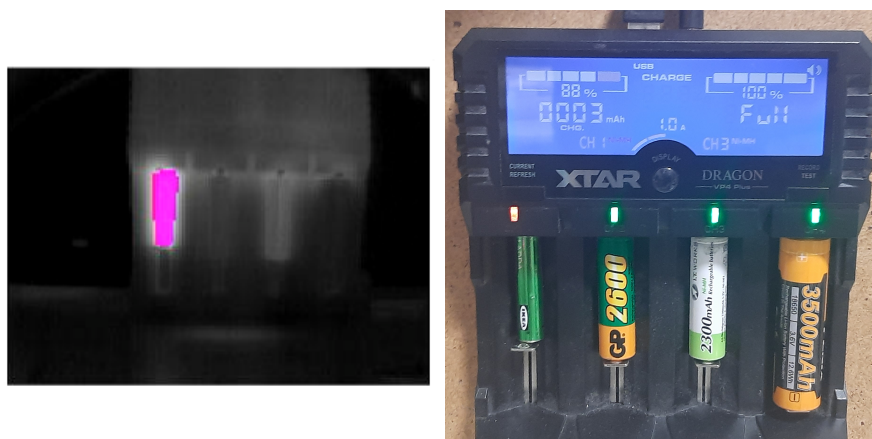
| Teplota měřené přípravkem [°C] | Teplota měřená kontaktním teploměrem [°C] |
|--------------------------------|---|
| 77,8 | 77,5 |
| 77,4 | 77,0 |
| 76,61 | 75,6 |
| 75,68 | 73,2 |
| 72,7 | 69,0 |
| 57,3 | 59,7 |
| 56,7 | 57,7 |
| 51,3 | 51,3 |
| 47,6 | 49,7 |
| 44,01 | 44,7 |
| 43,45 | 44,0 |
| 40,1 | 40,1 |
| 38,3 | 38,6 |
| 35,7 | 34,8 |

Tabulka 8.2: Srovnání teplot měřených kontaktní a bezkontaktní metodou pro nastavení emisivity 0,65

8.6 Detekce

8.6.1 Nabíjení baterií

Pro znázornění zamýšleného použití systému byl proveden test s nabíjecí stanicí XTAR Dragon VP4 plus pro NiMH a Li-ion baterie různých typů (AA, AAA, 18650). Na snímku 9.1 je znázorněný stav baterií po 5 minutách nabíjení proudem 1A, přičemž výrobcem doporučený nabíjecí proud AAA baterie (vlevo) je 75mA, baterií typu AA (střední sloty nabíječky) je 0,5A a Li-ion (zcela vpravo) 1,75A. Měřená teplota mikrotužkové baterie dosáhla po 5 minutách 46°C.



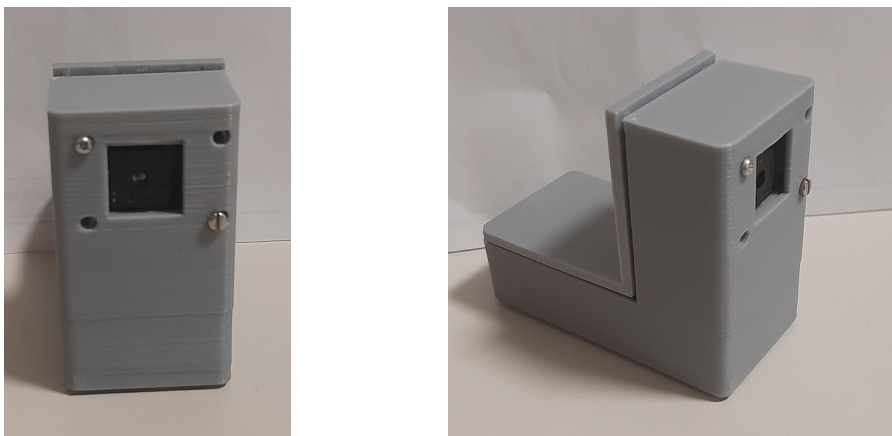
Obrázek 8.4: Názorné využití přípravku

Kapitola 9

Závěr

V této práci bylo navrženo a zkonstruováno zařízení pro bezkontaktní měření teploty z na trhu běžně dostupných součástí s celkovou cenou pod 7 000Kč. Zařízení je z hlediska svého programového vybavení převážně open-source, jedinou výjimku představují knihovny Lepton SDK, poskytované výrobcem zvoleného senzoru pod licencí povolující volné využití v open-source projektech které nemají využití v rozporu s legislativou Spojených států amerických.

Navržené zařízení není energeticky náročné, lze jej napájet z powerbanky nebo pomocí libovolné USB nabíječky, celkové rozměry navrženého prototypu jsou $6\text{cm} \times 3,5\text{cm}$ nejsou limitující (a je možné je v případě potřeby dále optimalizovat).



Obrázek 9.1: Třetí prototyp v 3D vytištěném obalu

Zařízení při testování reálných vlastností plně odpovídá předpokladům, je

schopné měřit s přesností $\pm 5K$ na testovacím černém tělese i na běžných domácích bateriích a nabíječkách, korektně vyhodnotit přehřívání baterie a problém okamžitě signalizovat na výstupním pinu, na který je možné připojit spínací prvky pro ochranu zdraví a majetku (odpojení sledovaného zařízení) a jako takové je plně použitelné.

Na práci je možné dále navázat rozšířeními pro specifické využití a umístění, jakými jsou připojení konkrétního akčního členu namísto LED, úprava FW pro definici podoblastí v obraze pro vyhodnocování atp., případně změnou ovládacího rozhraní na webserver.

Příloha A

Literatura

- [1] S. Jenkins, “Infrared temperature measurement,” <http://avibert.blogspot.com/2011/04/infrared-temperature-measurement.html>, 2011, online, cit. 13. 4. 2024.
- [2] J. Mönnig. (2020) Understanding distance:size ratio. Cit. 4. 4. 2023. [Online]. Available: <https://www.flir.com/discover/professional-tools/understanding-distancesize-ratio/>
- [3] C. Mikolajczak *et al.*, *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment*, 2011th ed. New York, NY: Springer, 2012.
- [4] W. van Schalkwijk and B. Scrosati, *Advances in Lithium-Ion Batteries*. New York: Springer US, 2013.
- [5] Y. li Zhu, C. jie Wang, F. Gao, M. xin Shan, P. long Zhao, Q. fen Meng, and Q. bing Wu, “Rupture and combustion characteristics of lithium-ion battery under overcharge,” *Journal of Energy Storage*, vol. 38, p. 102571, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X21003169>
- [6] C. Söderhielm, “Investigation of battery parameters for li-ion battery state of health estimation,” Second Cycle, Stockholm University, Stockholm, Sweden, 2021.
- [7] H. Wenzl, “Batteries | capacity,” in *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, J. Garche, Ed. Amsterdam: Elsevier, 2009, pp. 395–400. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527455000435>

- S000000313/S000000314/S000005350/OFR007591/M000011576/User_Manual/UD37042B_Thermal-Optical-Bi-spectrum-Network-Camera_UM_V5.5.98_en-US_20240509.PDF
- [21] T. FLIR, 2023, accessed: 2024-04-16. [Online]. Available: <https://flir.netx.net/file/asset/38894/original/attachment>
- [22] W. s.r.o., 2023, accessed: 2024-04-16. [Online]. Available: <https://my.workswell.eu/download/file/162/en>
- [23] “Atlas swir 0.3mp ip67 model,” <https://thinklucid.com/product/atlas-swir-0-3mp-model-imx991/>, official product page, online, cit. 30. 3. 2022.
- [24] “Widy sens 320,” <https://new-imaging-technologies.com/product/widy-sens-320/>, official product page, online, cit. 30. 3. 2022.
- [25] “Goldeye cl-033 tec1,” https://cdn.alliedvision.com/fileadmin/pdf/en/Goldeye_CL-033_TEC1_DataSheet_V5.2.0_en.pdf, datasheet, online, cit. 30. 3. 2022.
- [26] “Amg8833 ir array sensor,” https://cz.mouser.com/datasheet/2/315/panasonic_04262016_AMG88-1480161.pdf, datasheet, online, cit. 30. 3. 2022.
- [27] “Mlx90640 32x24 ir array,” <https://cdn.sparkfun.com/assets/7/b/f/2/d/MLX90640-Datasheet-Melexis.pdf>, datasheet, online, cit. 30. 3. 2022.
- [28] “M256 uncooled thermal imaging module,” <https://www.dyt-ir.com/m256-uncooled-thermal-imaging-moudule-product/>, datasheet, online, cit. 30. 3. 2022.
- [29] “Type-256 infrared thermal camera,” <https://www.dyt-ir.com/type-256-infrared-thermal-camera-product/>, datasheet, online, cit. 30. 3. 2022.
- [30] Teledyne FLIR, *FLIR Lepton 3.5 Micro Thermal Imaging Core*, release 400 ed., Teledyne FLIR, Nov 2023, Product datasheet. [Online]. Available: <https://groupgets-files.s3.amazonaws.com/lepton/Lepton%20Engineering%20Datasheet%20Rev%20400%20%28500-0659-00-09%29.pdf>
- [31] “Flir lepton 2.5,” https://cz.mouser.com/datasheet/2/227/lepton_2pt5_datasheet_04195-2580098.pdf, datasheet, online, cit. 30. 3. 2022.
- [32] “M256 uncooled thermal imaging module,” <https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/php/eTypeNoProfile.php?TYPENO=MIR8060B1&FOLDER=/product/driversensor/infraredsensor/>, datasheet, online, cit. 30. 3. 2022.
- [33] F. Systems, “Flir lepton uncooled thermal imager,” <https://github.com/FLIR/Lepton/tree/main>, 2024, accessed: 2024-05-17.

- [34] Unknown, “TABLE OF EMISSIVITY OF VARIOUS SURFACES,”
Online, Unknown, available at: https://www.transmetra.ch/images/transmetra_pdf/publikationen_literatur/pyrometrie-thermografie/emissivity_table.pdf.



Příloha B

Licence závislostí programu



B.1 Raspbian OS

dostupné z www.raspberrypi.com/software/operating-systems/, licencované kombinací

- GNU GPLv3 licence <https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html>
- BSD 3 clause licence <https://opensource.org/license/BSD-3-Clause>
- MIT license <https://opensource.org/license/MIT>

Dále uvedené softwary jsou instalovatelné přes správce balíčků operačního systému



B.1.1 Qt Framework

dostupné z <https://www.qt.io/download-open-source>, licencované kombinací

- GNU GPLv3 licence <https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html>

- GNU LGPLv3

■ B.1.2 Boost

dostupné z <https://www.boost.org/>, licence <https://www.boost.org/users/license.html>

■ B.1.3 OpenCV

dostupné z <https://opencv.org/>, dostupné pod Apache 2 licencí <https://github.com/opencv/opencv/blob/master/LICENSE>

■ B.1.4 gcc

dostupné z <https://gcc.gnu.org/>, dostupné pod GNU GPLv3 licencí <https://gcc.gnu.org/onlinedocs/libstdc++/manual/license.html>



Příloha C

Obsah přiloženého adresáře

■ C.1 Závislosti

■ C.1.1 FLIR Lepton SDK

dostupné z <https://flir.app.box.com/s/joj0dgmug054oowh84x35rn9zcs4077v>,
licence FLIR

■ C.1.2 Driver

dostupné z <https://github.com/FLIR/Lepton>, GNU GPLv2 licence

■ C.2 Aplikace

■ C.2.1 hlavní aplikace

Kód aplikace vzniklé v rámci této práce.

■ C.2.2 konfigurační soubory

Konfigurační soubory operačního nutné pro správné fungování systému.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kochman** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **465880**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Termografie pro domácí aplikace

Název diplomové práce anglicky:

Thermography for home applications

Pokyny pro vypracování:

1. Na základě rešerše identifikujte vhodné řešení pro termodiagnostiku použitelnou pro zvýšení zabezpečení domácnosti proti požáru při nabíjení baterií.
2. S využitím RPI-Zero a senzoru Teledyne FLIR Lepton realizujte prototyp pro monitoring teploty nabíjecích stanic.
3. Systém ověřte a změřte jeho parametry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Said, M. S. M., Tohir, M. Z. M., Visual and thermal imaging of lithium-ion battery thermal runaway induced by mechanical impact, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 79, 2022, 104854, ISSN 0950-4230
- [2] Sousa, M. J. et al., Thermal Infrared Sensing for Near Real-Time Data-Driven Fire Detection and Monitoring Systems. Sensors (Basel, Switzerland) vol. 20,23 6803, 2020
- [3] Mikołajczak, C. et al., Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment. 2011th ed. New York, NY: Springer, 2012. ISBN 978-1-4614-3485-6

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **15.02.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2024/2025

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta