



Střední průmyslová škola
strojní a elektrotechnická
České Budějovice

The TESSERACT – Trojrozměrný LED displej ve tvaru krychle

Ročníková práce

Jméno a příjmení: Denis Majrich

Třída: 3. EA

Vedoucí ročníkové práce: Ing. Lubomír Krejsa

Předmět: Mikroprocesorová technika

Školní rok: 2023 – 2024

Střední průmyslová škola strojní a elektrotechnická České Budějovice, Dukelská 13

Zadání ročníkové odborné práce

Zadání je vystaveno pro studenta :

Jména a příjmení: Denis Majrich

Datum narození: 2. 5. 2006

Třída: 3. EA

Téma ročníkové práce:

Trojrozměrný LED displej ve tvaru krychle

Požadované dílčí body práce:

1. Cílem ročníkové práce je vytvořit LED displej složený z jednoho tisíce jednotlivě programovatelných LED diod uspořádaných do tvaru kostky o velikosti 10 x 10 x 10 diod.
2. Pro řízení displeje je nutné z důvodu vysokého výpočetního výkonu využít mikrokontroler TEENSY 4.1.
3. K interakci s uživatelem bude sloužit dotykový TFT LCD displej s rozlišením 480 x 320 pixelů a úhlopříčkou 4“.
4. Řídící software bude napsán v programovacím jazyce C++.

Cíl ročníkové odborné práce:

Provéřit znalosti studentů získané po dobu studia z odborných předmětů (elektronika, mikroprocesorová technika a IT) návrhem praktického zařízení.

Rozsah práce:

Práce bude obsahovat textovou část, která bude doplněná stručnou charakteristikou řešené problematiky, potřebnými náčrtky, schémata a tabulkami, vše v rozsahu minimálně 4 strany strojně psaného textu. Výkresová dokumentace bude obsahovat schéma zapojení, či jiná schémata potřebná k pochopení práce. Celá práce bude obsahovat obsah, přehled použitých značek s jejich názvem a jednotkami a zdroje. Práce se odevzdává ve dvou výtiscích – jedno pro vedoucího práce, druhý zůstává v archivu školy. Oba výtisky předá student vedoucímu práce.

Konzultace:

Student může po dobu zpracování ročníkové práce zkonzultovat výsledky doposud zpracované práce s vedoucím práce. Poslední konzultace je však nejpozději čtrnáct dní před odevzdáním.

Termín odevzdání práce: **29.2.2024**

Vedoucí práce: Ing. Lubomír Krejsa
Podpis

Předseda předmětové komise: Ing. Lubomír Krejsa
Podpis

Kritéria hodnocení: Hodnocení provádí vedoucí práce. Hodnotí se kvalita vypracování dokumentace, správnost výpočtů a funkčnost navrženého zařízení.

Výsledné hodnocení:

- výborný
- chvalitebný
- dobrý
- dostatečný
- nedostatečný

V Českých Budějovicích 03.10.2023

Převzetí zadání dlouhodobé ročníkové práce

Dne:.....
Podpis studenta

Obsah

1.	ÚVOD	5
2.	POSTUP PRÁCE.....	6
2.1	KONSTRUKCE.....	6
2.1.1	CAD.....	6
2.1.2	Podstava.....	6
2.1.3	Nosné desky.....	7
2.1.4	Uchycení displeje.....	7
2.1.5	LED diody.....	8
2.2	ŘÍDÍCÍ ELEKTRONIKA.....	9
2.2.1	Napájení.....	9
2.2.2	Řízení krychle a periférií	9
2.2.3	Systém Home Assistant	10
2.3	THE OMNITOUCH.....	10
2.4	SOFTWARE.....	11
2.4.1	Teensy 4.1.....	11
2.4.2	Home Assistant.....	12
2.4.3	The Omnitouch	12
3.	ZÁVĚR	14
	SEZNAM ZKRATEK	15
	ZDROJE.....	16
	SEZNAM PŘÍLOH.....	188

1. Úvod

Cílem mé ročníkové práce je vytvořit LED displej složený z jednoho tisíce jednotlivě programovatelných LED diod uspořádaných do tvaru kostky o velikosti 10 x 10 x 10 diod. Pro řízení displeje plánuji z důvodu nutnosti vysokého výpočetního výkonu využít mikrokontroler TEENSY 4.1. K interakci s uživatelem bude sloužit dotykový TFT LCD displej s rozlišením 480 x 320 pixelů a úhlopříčkou 4".

Řídící software bude napsán v programovacím jazyce C++.

S použitím zvukového senzoru by animace na displeji mohly reagovat na okolní zvuky a hudbu.

Rád bych do projektu zakomponoval dva SNES ovladače s USB rozhraním, které umožní hrát na kostce různé hry pro jednoho nebo dva hráče jako např. PONG a do budoucna např. i TETRIS.

Dotykový displej bude obsahovat dvě různá menu, z nichž první bude určeno pro přehrávání animací nebo statických obrázků, druhé menu bude sloužit k volbě obtížnosti, počtu hráčů a zahájení her.

2. Postup práce

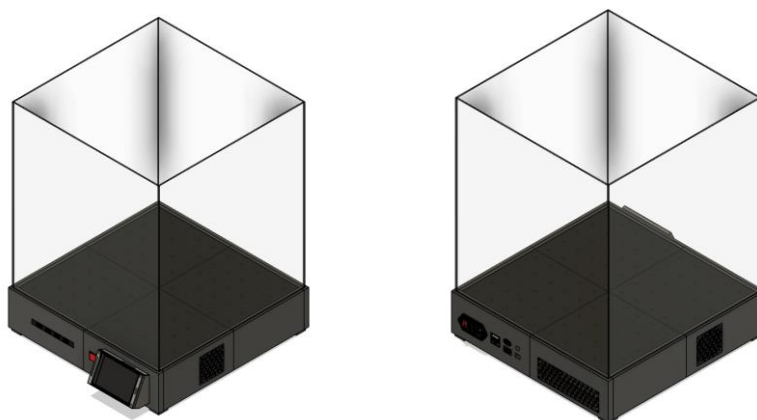
Veškeré tištěné díly jsou vytvořeny v programu Autodesk Fusion 360 a vytištěny na 3D tiskárně Prusa i3 Mk3S+ (viz příloha Modely) z černého materiálu PLA. Schémata zapojení a DPS jsou vytvořena v programu EasyEDA (viz příloha PCBs).

2.1 Konstrukce

2.1.1 CAD

Prvním krokem mé práce bylo sestavení požadavků na design mechanické konstrukce projektu.

Pro vytvoření modelu jsem využil software Autodesk Fusion 360, ve kterém jsem vymodeloval prototyp nosné konstrukce, u kterého jsem si určil rozteč jednotlivých diod a propočítal velikost finální krychle a její podstavy. Na základě toho jsem zjistil, kolik vznikne v podstavě prostoru na napájení, řídicí elektroniku a kabeláž.



2.1.2 Podstava

Výsledné rozměry podstavy jsou 375 x 375 mm, proto jsem se rozhodl rozdělit ji na čtyři části, které jsem poté spojil rybinovými ozuby, díky čemuž bylo možné je vytisknout na 3D tiskárně.

Spodní část podstavy tvoří sololitová deska natřená šedou barvou o tloušťce 4 mm z důvodu nutnosti udržení veškeré elektroniky.

Vrchní část je vyztužena dvěma na sebe kolmými hliníkovými profily ve tvaru T za účelem jejího osazení osmi nosnými deskami pro LED diody.

Do stran podstavy jsou vymodelovány otvory o různých rozměrech a tvarech, do kterých jsou zasazeny vstupní a výstupní periferie (např. chladicí ventilátory, USB hub, hlavní vypínač, přívodní konektor nebo ethernet port).

Podstava má v každém rohu umístěnou nohu s pěnovým čtvercem z důvodu ochrany stolu.

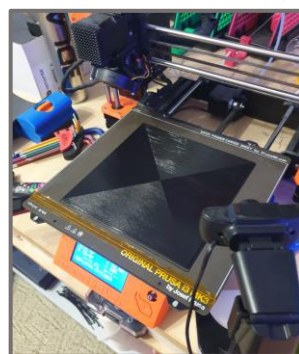
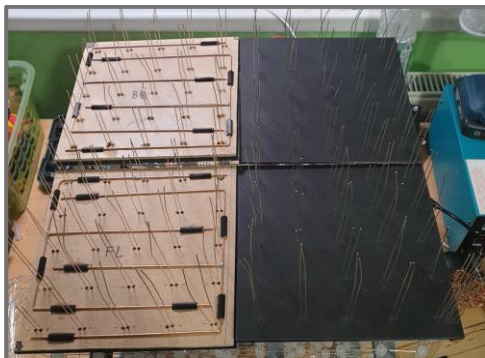


2.1.3 Nosné desky

Konstrukce LED diod je osazena na osmi nosných deskách o rozměrech 175 x 175 x 3 mm s přesně určenými dírami pro lepší stabilitu.

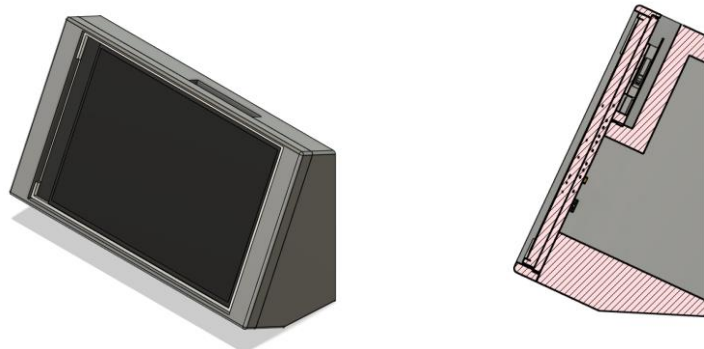
Vrchní čtyři desky jsou vytištěny ze stejného materiálu jako podstava s koncentrickou vrchní výplní a slouží pouze pro zakrytí spodních čtyř desek ze 3 mm tlustého sololitu, na které jsou připevněné napájecí rozvody. Díry jsou vymodelované pouze do poloviny vrchních desek, kdy následně každá z nich představuje předlohu pro ruční vrtání spodní desky ze sololitu.

V levé přední desce se v levém předním rohu nachází deset těsně u sebe vyvrtaných děr pro protažení datových rozvodů jednotlivých vrstev krychle.



2.1.4 Uchycení displeje

4" TFT LCD displej je na pravé přední straně podstavy uchycen pod úhlem 25° tak, aby při pohledu na displej nebyly nikde patrné uchycovací šrouby a zároveň byl přístupný slot na SD kartu v horní části displeje.



2.1.5 LED diody

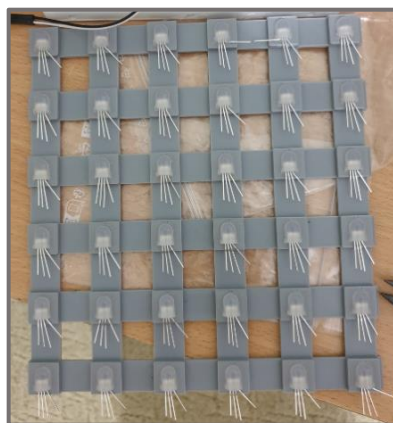
Krychle se skládá z jednoho tisíce adresovatelných RGB LED diod (pixelů) se zabudovaným ic WS2811¹, jenž umožňuje diody řídit 12 bity pro každou diodu; tedy celkem 2553 barev pro každý pixel.

Deset diod v každém ze sta sloupců je vertikálně připevněno na dvou měděných postříbřených drátech o průměru 0,8 mm.

Dráty zajišťují napájení každé diody v paralelním zapojení (viz bod 2.2.1).

Jednotlivé sloupce diod jsou spojeny v každé vrstvě stejným postříbřeným drátem. Stěny jsou mezi sebou propojovány drátem vždy střídavě ob jeden sloupec.

V levém předním rohu se nachází 10 datových vodičů, díky kterým lze řídit každou vrstvu nezávisle na ostatních devíti.



Pro usnadnění pájení jednotlivých vrstev jsem si vymodeloval a vytiskl plastové přípravky.

¹ Stránky prodejce diod s dokumentací [online]. [cit. 12.2.2024]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/4000720415203.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.9.76c81802TY4kjk

2.2 Řídící elektronika

2.2.1 Napájení

Napájení celého projektu zajišťují tři zdroje, z toho dva s nominálním napětím 5V a maximálním proudem 40A a třetí s nominálním napětím 12V a maximálním proudem 2A.

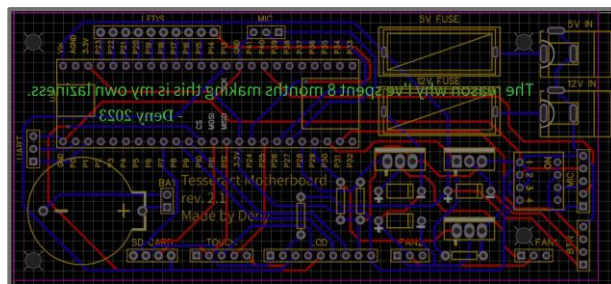
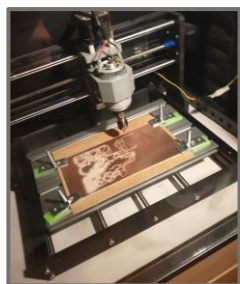
5V zdroje slouží k napájení diod a veškeré řídicí elektroniky. 12V zdroj je určen pro dva chladicí ventilátory umístěné po bocích podstavy.

Distribuce proudu LED diod je realizována paralelním spojením všech pixelů na spodní části nosných desek. Jednotlivé kvadranty jsou se sloupci spojené měděným drátem o průřezu 1,5 mm a k příslušnému napájecímu zdroji jsou připojeny lankovým vodičem o průřezu 2,5 mm. Toto spojení minimalizuje úbytek napětí mezi diodami.

2.2.2 Řízení krychle a periferií

Pro snadnější zapojení řídicí elektroniky jsem se rozhodl navrhnout vlastní DPS, která umožní snadné propojení řídicího mikrokontroleru, vrstev krychle a veškerých periferií.

První verzi DPS jsem vyrobil pomocí CNC frézy, po zjištění a opravě veškerých nedostatků jsem finální verzi DPS objednal od externího dodavatele.



Jako hlavní mikrokontroler jsem zvolil TEENSY 4.1, a to např. kvůli jeho vysoké pracovní frekvenci až 1,08 GHz, paměti Flash o velikosti 8 MB, paměti RAM o velikosti 1024 kB, 55 vstupně/výstupním pinům, matematickému koprocesoru a užitečné funkci DMA, která umožňuje řídit všechny vrstvy krychle najednou a dosáhnout tak obnovovací frekvence ca 320 fps.

Mikrokontroler dále řídí také přes sběrnici SPI:

4" TFT LCD displej

dotykovou vrstvu displeje

slot na SD kartu

Funkce USB host zajišťuje komunikaci mezi zařízeními USB připojenými přes hub v přední části podstavy a jeho primární využití je pro dva SNES ovladače určené pro hraní her, např. TETRIS nebo PONG (prozatím pro jednoho hráče; v budoucnu plánuji přidat režim pro více hráčů).

Pomocí dvou unipolárních tranzistorů typu MOS s N-kanálem jsou ovládány dva chladicí ventilátory s možností regulace výkonu prostřednictvím PWM.

Tlačítko se zabudovaným podsvícením se stejnou regulací jako ventilátory slouží pro nouzové vypnutí a reset mikrokontroleru.

Některé světelné efekty mohou reagovat na okolní zvuk (hudbu) ze dvou zdrojů:

mikrofon MAX9814 se zabudovaným zesilovačem s nastavitelným zesílením pomocí DIP přepínačů na DPS

dvoukanálový audiojack s RC filtrem připojený do Raspberry Pi 4 (viz bod 2.2.3)

Mikrokontroler je propojen s Raspberry Pi 4 (viz bod 2.2.3) přes sériovou linku typu UART.

DPS obsahuje slot na baterii CR2032, která slouží k záložnímu napájení interních hodin reálného času uvnitř mikrokontroleru v případě výpadku hlavního zdroje.

2.2.3 Systém Home Assistant

V podstavě krychle je umístěn jednodeskový počítač Raspberry Pi 4B určený pro běh systému Home Assistant na ovládání chytré domácnosti. Tento systém umožňuje propojení zařízení pro chytrou domácnost od různých výrobců a jejich následnou integraci do vlastních programů, skriptů a automatizací.

Systém komunikuje s TEENSY 4.1 pomocí skriptu v jazyce Python přes protokol UART, přičemž posílá data o entitách v systému a příkazy z ovladače The Omnitouch (viz bod 2.3). Tím je zajištěna interakce mezi zařízeními chytré domácnosti (např. světly, zásuvkami, počítači, senzory atd.) a krychlí TESSERACT.

Do projektu plánuji zahrnout vizualizaci hlasového asistenta na krychli.

2.3 The Omnitouch

Pro názornou ukázkou univerzálnosti platformy Home Assistant jsem vytvořil zařízení, které lze přes tuto platformu s krychlí propojit, a tím je The Omnitouch.

Jedná se o „rukavici“ s osmi senzory a čtyřmi přepínači, tlačítkem, RGB diodou, OLED displejem o rozlišení 128 x 32 pixelů a připojením prostřednictvím wifi skrze platformu a protokol ESPHome.

Základem je mnou navržená a vyrobená DPS s vývojovou deskou ESP32-WROOM-32D. Napájení přes konektor USB-C na vývojové desce zajišťuje powerbanka umístěná pod DPS.

Jednotlivé senzory The Omnitouch:

třiosý magnetometr a kompas HMC5883L

šestiosý akcelerometr MPU6050

detektor teploty a tlaku BMP388

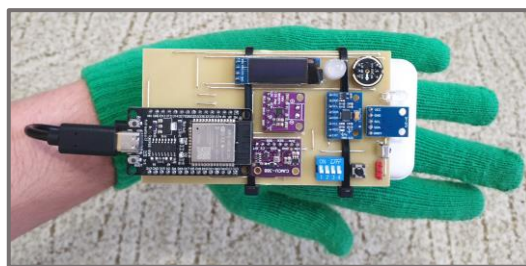
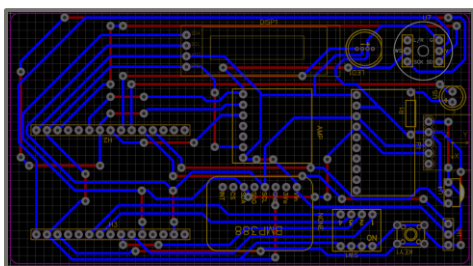
Hallův senzor magnetického pole

mikrofon INNP441

IR přijímač VS1838B

Primární využití zařízení je při prezentaci krychle pro bezdrátové přepínání mezi efekty, vizualizaci teploty nebo magnetického pole.

I2S mikrofon slouží pro možnost hlasového ovládání chytré domácnosti.



2.4 Software

2.4.1 Teensy 4.1

Řídící software pro mikrokontroler Teensy 4.1 je napsán v jazyce C++ pomocí deseti volně dostupných knihoven. Skládá se z hlavního skriptu main.cpp a pomocných souborů typu .h pro jednotlivé efekty a podřízené funkce.

Hlavní funkcí pro řízení diod je funkce void setLed(int x, int y, int z, CRGB color), jež je určena k nastavení jednoho pixelu krychle na určitou barvu. Jejím vstupem jsou kartézské souřadnice [x, y, z] následně převedené na index diody ve virtuálním poli pomocí funkce int getLedIndex(int x, int y, int z), kam funkce ukládá barevná data příslušné diody.

Celý kód mikrokontroleru je složen z přibližně 5000 řádek rozdělených do 22 souborů.

Jednotlivé soubory obsahují proměnné a funkce pro řízení částí a činností krychle, např.:

soubor pro řízení a zpracování dat SNES ovladačů

soubor pro virtuální mikrokontroler k řízení všech 10 vrstev krychle najednou pomocí DMA

soubor pro hraní hry TETRIS

soubor pro zpracování a vykreslování textu

soubor pro zpracování zvuku (hudby) a jeho převedení na frekvenční spektra za použití Fourierovy transformace a následné zobrazení jednotlivých pásem na krychli

pomocný soubor s funkcemi pro řízení SD karty, ladícími funkcemi nebo např. funkcí pro vykreslování virtuálních desetinných pixelů

soubor pro vykreslování hlavního menu, různých podmenu na LCD displeji, zpracování a filtraci dat z dotykové vrstvy

14 souborů týkajících se jednotlivých efektů LED diod

```
int getLedIndex(int x, int y, int z) {
    int index = 0;

    if (y % 2 == 0) {
        index = ((y * 10) + x + (100 * z));
    } else {
        index = (y * 10) + (9 - x) + (100 * z);
    }

    return index;
}

void setLed(int x, int y, int z, CRGB color) {
    int index = getLedIndex(x, y, z);
    pixels[index] = color;
}
```

2.4.2 Home Assistant

Většina konfigurace systému Home Assistant probíhá ve vizuálním prostředí.

Pro pokročilejší funkce lze využít programovacího jazyka YAML. Dále lze pomocí rozšíření pyskript vytvářet a spouštět v pozadí systému podprogramy v jazyce Python, např. pro sériovou komunikaci s krychlí prostřednictvím UART.

2.4.3 The Omnitouch

Software pro The Omnitouch je vytvořen pomocí platformy ESPHome v programovacím jazyce YAML. Tato platforma umožňuje snadné propojení několika periférií skrze jednoduchou deklaraci jejich typů a atributů.

Pokročilejší funkce lze naprogramovat pomocí funkcí typu lambda.

```
display:
- platform: ssd1306_i2c
  model: "SSD1306 128x32"
  address: 0x3C
  id: omnitouch_display
  update_interval: 1s
  pages:
    - id: online
      lambda: |-
        it.print(0, 10, id(comic_sans), "Omnitouch online!");
    - id: listening
      lambda: |-
        it.print(0, 10, id(comic_sans), "Listening...");
```

V přiložené složce Foto a video se nachází videa a fotografie práce.

3. Závěr

V souladu s cílem práce se podařilo vytvořit LED krychli s 1000 pixely s deseti funkčními efekty, z toho dvěma reagujícími na hudbu.

Základním efektem je duha, při které je vyplněna celá krychle jednou barvou, jež se vždy v čase mění. Mezi další efekty patří např. vykreslování textu či hodin, náhodné hvězdy v bílé nebo barevné variantě, planety obíhající kolem středu nebo dvojité spirály otáčející se kolem vertikální osy.

Na krychli je možné hrát známou hru TETRIS ve 3D pro jednoho hráče pomocí USB SNES ovladače (do budoucna plánuji rozšíření pro více hráčů).

Celá krychle obsahuje zabudovaný funkční systém Home Assistant pro řízení a automatizaci chytré domácnosti.

Efekty na krychli je možné např. pro účely prezentace přepínat pomocí chytré rukavice The Omnitouch, prostřednictvím níž lze také hlasově řídit chytrou domácnost.

Nejsložitější částí práce byl návrh a následná stavba konstrukce všech diod zejména z důvodu rozměrů krychle, a tudíž nestability tenkých měděných drátů. Často docházelo k přetržení pájených spojů nebo dokonce zničení některých diod.

Odhad celkových finančních nákladů na vytvoření LED krychle této ročníkové práce se pohybuje kolem 17 tis. Kč. Práce byla zhotovena v období 8 měsíců, největší časový prostor zabral CAD a pájení diod.

Hlavním přínosem zpracování projektu pro mne bylo zlepšení dovednosti pájení, programování v různých jazycích, modelování v CADu a návrh elektronických schémat a DPS.

Rozhodl jsem se celý projekt vč. softwaru, CADu ve formátu .step, fotografií a dokumentace zveřejnit na platformě GitHub pod licencí typu MIT (<https://github.com/The-Automation-Warehouse/The-Tesseract.git>)



Seznam Zkratek

TFT	Thin-film transistor (tenkovrstvé tranzistory)
LCD	Liquid crystal display (Displej z tekutých krystalů)
PLA	Polylactic acid (materiál pro 3D tisk)
CAD	Computed aided design (počítačem podporované projektování)
ic	Integrated circuit (zabudovaný čip)
DPS (PCB)	Printed circuit board (deska plošného spoje)
CNC	Computer numeric control (počítačové numerické řízení)
RAM	Random access memory (paměť s náhodným přístupem)
DMA	Direct memory access (přímý přístup k paměti)
fps	Frames per second (snímky za vteřinu)
SNES	Super nintendo entertainment system (herní platforma)
MOS	Metal oxide semiconductor (tranzistor řízený polem)
PWM	Pulse width modulation (pulzně šířková modulace)
DIP	Dual in-line package (pouzdro integrovaných obvodů)
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter (typ počítačové sběrnice)
OLED	Organic light-emitting diode (technologie displeje)
I2S	Inter-IC Sound (typ počítačové sběrnice)

Zdroje

Internetové zdroje

1. *Web prodejce LED diod s dokumentací* [online]. Aliexpress. (2024). [cit. 12.2.2024]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/4000720415203.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.9.76c81802TY4kjk
2. *Web výrobce mikrokontroleru Teensy 4.1 s dokumentací* [online]. 2024 PJRC. [cit. 12.12.2024]. Dostupné z: <https://www.pjrc.com/store/teensy41.html>
3. *Web výrobce jednodeskového počítače Raspberry Pi 4B s dokumentací* [online]. 2024 Raspberry Pi. [cit. 12.12.2024]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>
4. *3D model Raspberry Pi 4B* [online]. 2024 Stratasys Inc. Grabcad.com. [cit. 12.12.2024]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/raspberry-pi-4-model-b-5>
5. *3D model Chladícího ventilátoru* [online]. 2024 Stratasys Inc. Grabcad.com. [cit. 12.12.2024]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/60-x-60-x-25-exhaust-fan>
6. *3D model 12V zdroje* [online]. 2024 Stratasys Inc. Grabcad.com. [cit. 12.12.2024]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/fuente-conmutada-12v-2a-12v-3a-12v-5a-12v-10a-12v-30a-12v-50a-1>
7. *3D model 5V zdroje* [online]. 2024 Stratasys Inc. Grabcad.com. [cit. 12.12.2024]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/fuente-conmutada-5v-3a-5v-10a-5v-40a-1>
8. *3D model napájecího konektoru* [online]. 2024 Stratasys Inc. Grabcad.com. [cit. 12.12.2024]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/ac-power-socket-3-pin-250v-10a-ac-17-iec3-c14-1>
9. *3D model konektoru RJ45* [online]. 2024 Stratasys Inc. Grabcad.com. [cit. 12.12.2024]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/rj45-panel-mount-1>
10. *3D model mikrokontroleru Teensy 4.1* [online]. 2024 Stratasys Inc. Grabcad.com. [cit. 12.12.2024]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/teensy-4-1-3>
11. *3D model vypínače* [online]. 2024 Dassault Systèmes. 3dcontentcentral.com. [cit. 12.12.2024]. Dostupné z: <https://www.3dcontentcentral.com/download-model.aspx?catalogid=171&id=345299>
12. *3D model 5V ventilátoru* [online]. 2024 CUI Devices. Cuidevices.com. [cit. 12.12.2024]. Dostupné z: <https://www.cuidevices.com/product/resource/3dmodel/cfm-6010v-130-205-20>
13. *3D model USB portu* [online]. 2024 CUI Devices. Cuidevices.com. [cit. 12.12.2024]. Dostupné z: <https://www.cuidevices.com/product/resource/3dmodel/uj3-ah-4-th>

Počítačové programy

1. Autodesk Inc, Fusion 360 [software]. 24. 9. 2013. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/fusion-360>.
2. Prusa Research a.s., Prusaslicer 2.5 [software]. 19. 8. 2022. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/stranka/prusaslicer_424/.
3. Microsoft corp, Visual Studio Code [software]. 29. 4. 2015. Dostupné z: <https://code.visualstudio.com/>.
4. PlatformIO Labs, PlatformIO [software]. 6. 1. 2015 Dostupné z: <https://platformio.org/>.
5. LCSC, EasyEDA [software]. 14. 9. 2021. Dostupné z: <https://easyeda.com/>.
6. Nabu Casa, Home Assistant [software]. 19. 10. 2017 Dostupné z: <https://www.home-assistant.io/>.
7. Nabu Casa, ESPHome [software]. 7. 12. 2023 Dostupné z: <https://esphome.io/index.html>

Seznam příloh

Příloha I. – elektronická složka Foto a video (videa různých efektů; videa o tisku dílů; video o zkoušce diod; 83 fotografií)

Příloha II. – elektronická složka Code (kód krychle – The Tesseract; kód ovladače Omnitouch – The Omnitouch)

Příloha III. – elektronická složka PCB (elektronická schémata v formátu .png a .json; soubory DPS ve formátu .png a gerber)

Příloha IV. – elektronická složka Modely (vlastní modely ve formátech .3mf, .step a .f3d)