



Středoškolská technika 2025

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

The Tesseract

Denis Majrich, František Antoš

SPŠ strojní a elektrotechnická, Dukelská 13,
Dukelská 13, České Budějovice



ODBORNÁ MATURITNÍ PRÁCE

TÉMA:

Trojrozměrný displej ve tvaru krychle

The Tesseract

Jméno a příjmení: *Denis Majrich*
Vedoucí práce: *Ing. Krejsa Lubomír*
Školní rok: 2024/2025
Třída: *4.EA*



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem maturitní práci na téma Trojrozměrný displej ve tvaru krychle – The Tesseract vypracoval/a samostatně a s použitím uvedené literatury a pramenů.

Místo a datum: *České Budějovice, 13. 2. 2025*

.....

Denis Majrich



Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu maturitní práce *Ing. Lubomíru Krejsovi* za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce.



Obsah

1. Úvod	5
2. Postup práce	6
2.1. Konstrukce	6
2.1.1. CAD.....	6
2.1.2. Podstava.....	7
2.1.3. Nosné desky	8
2.1.4. Uživatelské rozhraní.....	9
2.1.5. LED diody	9
2.2. Elektronika	11
2.2.1. Základní deska.....	11
2.2.2. Hlavní mikrokontroler	12
2.2.3. Periferie.....	13
2.3. Napájení.....	13
2.4. Software.....	14
3. Github.....	17
4. Závěr.....	18
Seznam zkratk	19
Zdroje	20
Seznam příloh.....	21



1. Úvod

Cílem mé maturitní práce je vytvořit LED displej složený z jednoho tisíce jednotlivě programovatelných RGB LED diod uspořádaných do tvaru krychle o velikosti 10 x 10 x 10 diod.

Plánuji využít jednotlivě adresovatelné diody se zabudovaným IC za účelem zjednodušení řídicí elektroniky.

Jako hlavní mikrokontroler krychle použiji z důvodu nutnosti vysokého výpočetního výkonu TEENSY 4.1.

K interakci s uživatelem bude sloužit dotykový TFT LCD displej s rozlišením 480 x 320 pixelů a úhlopříčkou 4".

Řídicí software bude napsán v programovacím jazyce C++.

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

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

Řídicí program bude obsahovat různá podmenu, která budou určena pro přehrávání efektů nebo spouštění her.

Napájení celé krychle bude zajištěno pouze jediným napájecím kabelem C13.

K tvorbě mechanické konstrukce projektu využiji běžně dostupnou 3D tiskárnu Prusa i3 MK3S+ a materiál PETG.

Závěrečným úkolem je zveřejnění volně dostupného návodu na replikaci projektu na platformě Github v anglickém jazyce.

2. Postup práce

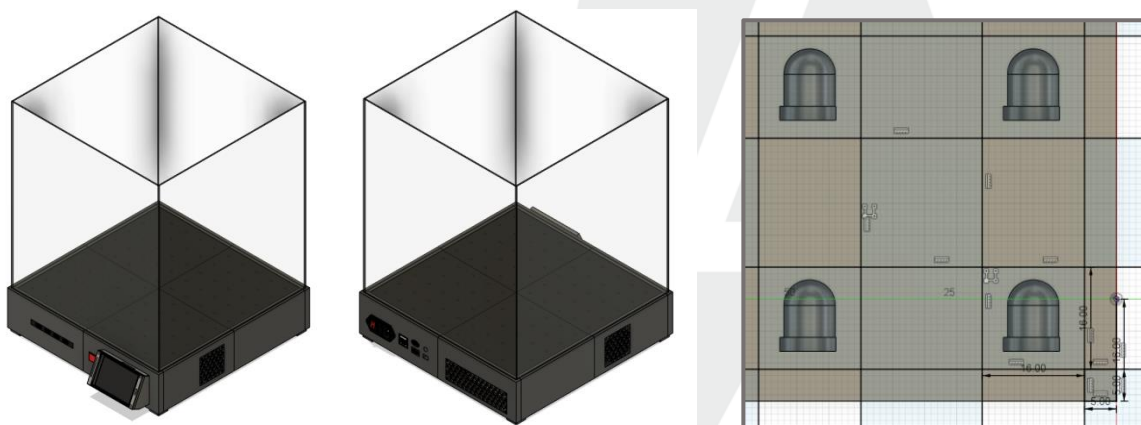
Krychle se skládá ze tří částí: mechanické konstrukce, elektroniky a softwaru.

Souběžně s vytvářením 3D modelu projektu v CADu jsem pracoval také na prototypech řídicí elektroniky. Teprve po zhotovení fyzické krychle bylo možné začít programovat a následně testovat software.

2.1. Konstrukce

2.1.1. CAD

Prvním krokem mé práce bylo sestavení požadavků na design mechanické konstrukce projektu. Pro vytvoření modelu jsem využil CAD software Autodesk Fusion 360, ve kterém jsem vymodeloval prototyp nosné konstrukce, u něhož jsem si určil rozteč jednotlivých diod a propočítal velikost finální krychle a její podstavy. Na základě toho jsem zjistil objem prostoru pro napájení, řídicí elektroniku a kabeláž.



¹. 3D model mikrokontroleru Teensy 4.1 [online]. 2024 Stratasy Inc. Grabcad.com. [cit. 12.1.2025]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/teensy-4-1-3>

Finální rozteč diod činí 35 mm. Záměrem bylo, aby hustota diod nebyla příliš velká z důvodu špatné viditelnosti diod ve středu krychle a soustředění veškerého světla do malého prostoru. Zároveň nesměla být hustota příliš malá, jelikož by celkový dojem krychle působil nevýrazně a bylo by náročné vyrobit podstavu.

2.1.2. Podstava

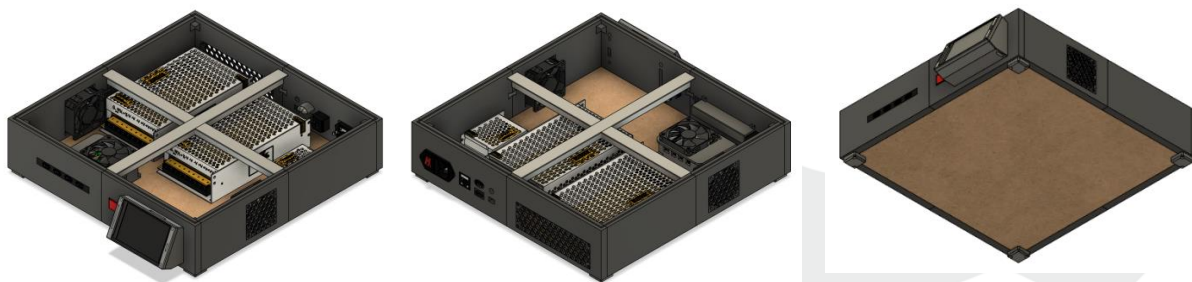
Výsledné rozměry podstavy jsou 375 x 375 mm, proto jsem se rozhodl rozdělit ji na čtyři části, které jsem poté spojil motýlovými spojkami. Díky tomu bylo možné vše vytisknout na běžně dostupné 3D tiskárně.

Tisk jedné části trval průměrně 24 hodin a spotřeboval jsem na ni 180 gramů černého PETG filamentu.

Spodní část podstavy tvoří sololitová deska o tloušťce 4 mm natřená šedou barvou z důvodu nutnosti zajistit mechanickou pevnost pro upevnění veškeré řídicí i napájecí elektroniky a kabeláže.

Vrchní část je vyztužena dvěma na sebe kolmými hliníkovými profily ve tvaru T, které jsou osazeny osmi nosnými deskami pro LED diody. Uprostřed každého z profilů je vybroušena mezera z důvodu jejich usazení do stejné roviny.

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



Větší otvory obsahují mnou vyrobené mřížky s šestihranným vzorem pro zvýšení bezpečnosti u chladicích ventilátorů a zvýšení objemu průtoku chladícího vzduchu v zadní části podstavy.

Podstava má v každém rohu umístěnou nohu s pěnovým čtvercem za účelem ochrany desky 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 rozmístěnými otvory pro lepší stabilitu.

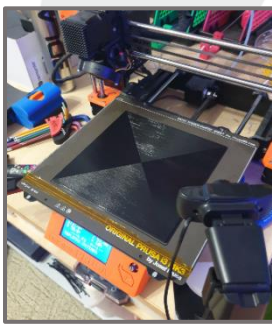
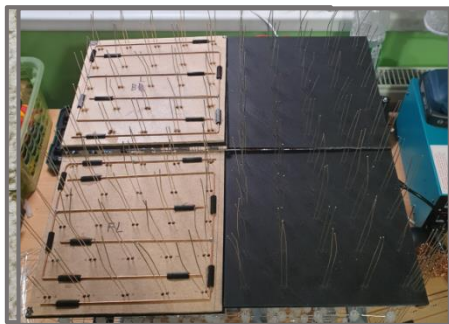
Vrchní čtyři desky jsou vytištěny ze stejného materiálu jako podstava s koncentrickou vrchní výplní a slouží pouze pro zakrytí spodních čtyř desek ze 3 mm tlustého sololitu.

Při jejich tvorbě jsem otvory vymodeloval zespodu pouze do poloviny jejich tloušťky, po jejich vytištění jsem je následně provrtal na stojanové vrtačce. Tím bylo dosaženo přesného umístění a zároveň dokonalejšího vzhledu jednotlivých děr v deskách. Průměr děr činí 0,9 mm, což umožňuje dostatečný prostor pro průchod stříbřeného drátu o průměru 0,8 mm.

Spodní čtyři desky ze sololitu slouží k připevnění napájecích rozvodů. Otvory v nich jsem vytvořil pomocí CNC frézy 3018.

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

Jednotlivé desky jsem navlékl na předem vytvořenou LED strukturu. Vše jsem následně položil na hliníkové profily podstavy.

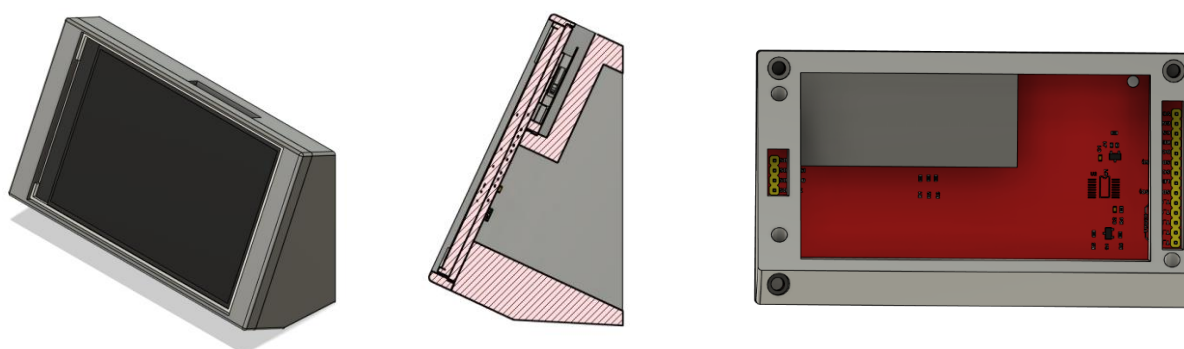


2.1.4. Uživatelské rozhraní

Nejprve jsem vytiskl sadu prototypů uchycení s různými úhly sklonu, abych vyzkoušel, který z nich bude pro uživatelské rozhraní nejoptimálnější. Nakonec jsem zvolil sklon úchyty 25°.

Úchyt čtyřpalcového TFT LCD displeje se skládá ze dvou částí: první zajišťuje pevné uchycení displeje k podstavě pomocí šroubů a obsahuje výřez zpřístupňující slot na SD kartu. Uvnitř této části se nacházejí dvě drážky k protažení kabelů s dupot koncovkami.

Druhá část úchyty slouží pouze k zakrytí šroubů a PCB displeje.



Vedle úchyty displeje v podstavě se nachází podsvícené červené tlačítko velikosti 15 mm, jehož původním záměrem měla být aktivace režimu spánku kostky, který by vypnul diody, podsvícení displeje a chladicí ventilátory. Protože ale nebylo možné softwarově vypnout podsvícení displeje, rozhodl jsem se tlačítko využít pro reset řídicí elektroniky.

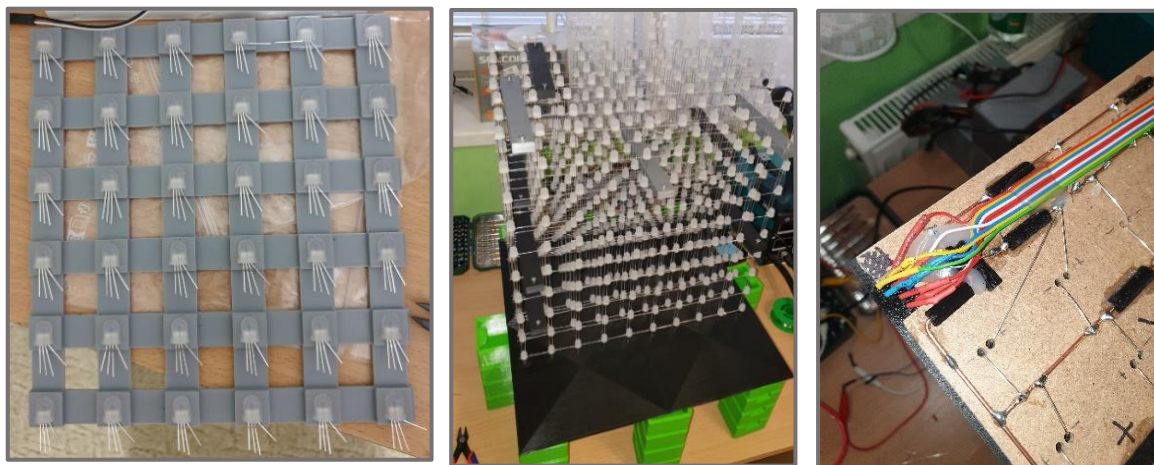
2.1.5. LED diody

Krychle se skládá z jednoho tisíce adresovatelných RGB LED diod (pixelů) se zabudovaným ic WS2811, jenž umožňuje diody řídit dvanácti bity pro každou diodu.

2. *Stránky prodejce diod s dokumentací* [online]. [cit. 12.1.2025]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/4000720415203.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.9.76c81802TY4kjk

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 2.3.).



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 deset datových vodičů, jejichž úkolem je řídit každou vrstvu nezávisle na ostatních devíti.

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

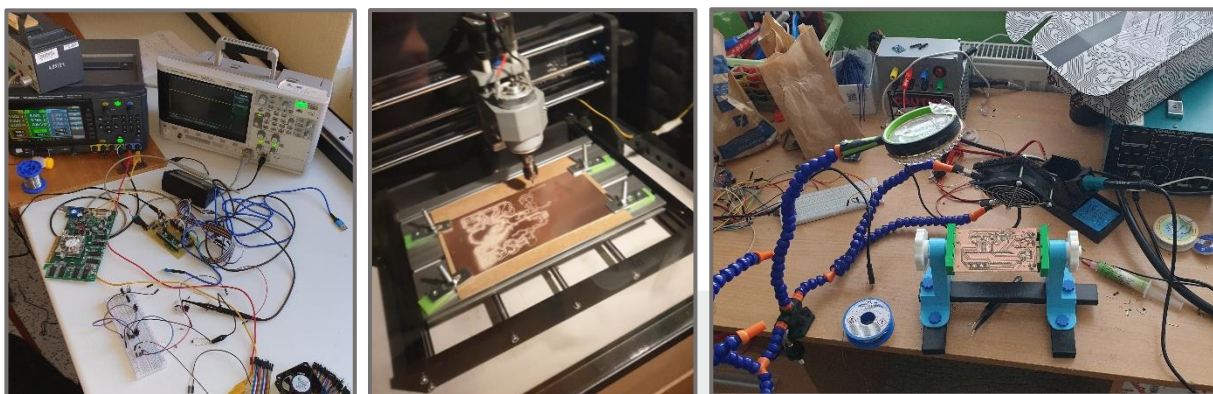
2.2. Elektronika

2.2.1. Základní deska

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

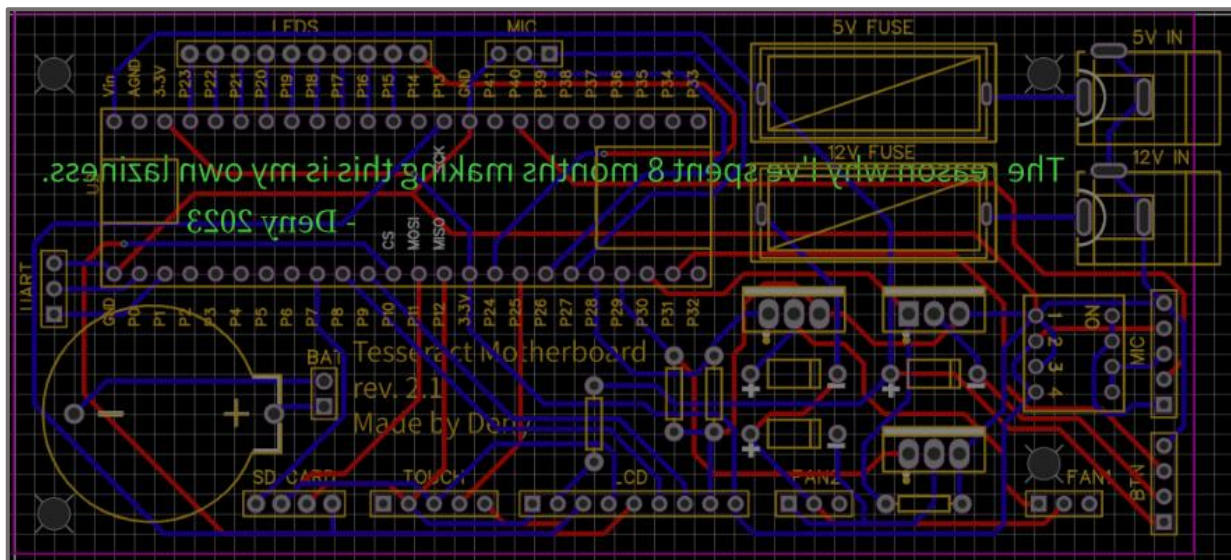
První prototyp DPS sloužil pouze pro ověření funkčnosti regulace rychlosti chladících ventilátorů pomocí dvou n-kanálových tranzistorů typu MOS a PWM.

S využitím školního osciloskopu jsem odhalil nedostatek v řízení, který jsem pro následující verzi ve schématu opravil.



Druhá verze DPS byl prototyp finálního designu, který jsem vyrobil na CNC frézce 3018, a který sloužil k ověření funkčnosti zapojení SPI sběrnice propojující několik periférií.

Po zjištění a opravě všech nedostatků jsem dokončil schéma a rozvržení finální verze PCB. Následně jsem objednal její výrobu u externího dodavatele, a to z důvodu, že se jedná o dvouvrstvý plošný spoj s přesnými tolerancemi, který nelze vyrobit v domácích podmínkách.



PCB obsahuje DuPont konektory pro připojení: všech deseti vrstev krychle, displeje a jeho slotu na SD kartu, podsvíceného reset tlačítka, dvou chladících ventilátorů řízených n-kanálovými mosfety s využitím PWM, mikrofonu se zabudovaným zesilovačem MAX9814 s nastavitelným zesílením pomocí DIP přepínačů a sériového komunikačního portu UART. PCB umožňuje napájení všech součástí a periférií skrz dva DC jacky s axiálními pojistkami zajišťujícími bezpečnost obvodů napájení 5V a 12V.

2.2.2. Hlavní mikrokontroler

Jako hlavní mikrokontroler jsem zvolil TEENSY 4.1, a to např. kvůli jeho vysoké pracovní frekvenci 600 MHz, 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 téměř 320 fps.

2.2.3. Periferie

Mikrokontroler dále řídí také přes sběrnici SPI:

- 4" TFT LCD displej s odporovou dotykovou vrstvou
- slot na SD kartu

Funkce USB host mikrokontroleru TEENSY 4.1 zajišťuje komunikaci mezi zařízeními USB připojenými přes rozbočovač v přední části podstavy. Jeho primárním využitím je připojení SNES ovladačů pro hraní her, jako např. TETRIS (prozatím pro jednoho hráče; v budoucnu plánují přidat režim pro více hráčů).

Pomocí dvou n-kanálových tranzistorů typu MOS jsou podle teploty procesoru regulovány otáčky dvou chladících ventilátorů, a to prostřednictvím pulzně šířkové modulace.

Tlačítko se zabudovaným regulovatelným podsvícením slouží pro reset mikrokontroleru.

³. *web výrobce mikrokontroleru Teensy 4.1 s dokumentací* [online]. 2024 PJRC. [cit. 12.1.2025]. Dostupné z: <https://www.pjrc.com/store/teensy41.html>

Některé světelné efekty mohou reagovat na okolní zvuk (hudbu) z mikrofonu se zabudovaným zesilovačem MAX9814 s nastavitelným zesílením pomocí DIP přepínačů na DPS.

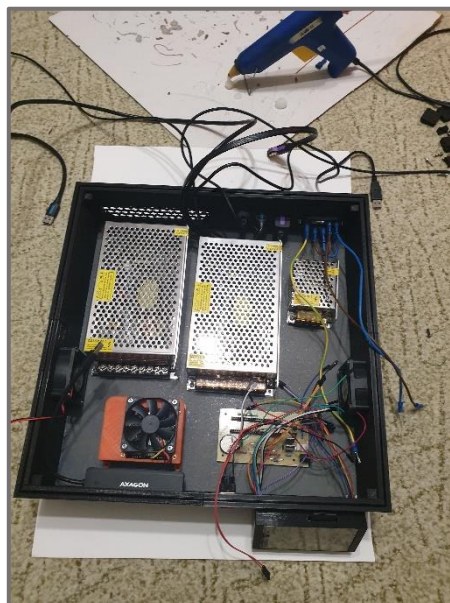
DPS dále obsahuje slot na baterii CR2032, která slouží k záložnímu napájení interních hodin reálného času mikrokontroleru v případě výpadku nebo vypnutí hlavního zdroje. Tyto hodiny umožňují zobrazení aktuálního času, jako jednoho ze světelných efektů.

2.3. 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 automaticky regulované chladicí ventilátory umístěné po bocích podstavy.

Distribuce proudu pro LED diody je realizována paralelním spojením vývodů všech sloupců ve spodní části nosných desek. Jednotlivé kvadranty jsou se sloupci spojené měděným drátem o průřezu $1,5 \text{ mm}^2$ a k příslušnému napájecímu zdroji jsou pak připojeny lankovým vodičem o průřezu $2,5 \text{ mm}^2$. Účelem tohoto propojení je minimalizovat úbytek napětí mezi diodami.



2.4. Software

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

Hlavní funkcí pro řízení diod je funkce void setLed(int x, int y, int z, CRGB color). Ta 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 getLedIndex(int x, int y, int z), do které funkce ukládá barevné hodnoty příslušné diody, a barvu ve formátu RGB.



Celý kód mikrokontroleru je složen z přibližně 4500 řádek rozdělených do 19 souborů.

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

- soubor pro řízení a zpracování dat SNES ovladačů
- soubor pro virtuální mikrokontroler řídí všech deset vrstev krychle najednou pomocí DMA
- soubor hry TETRIS
- soubor zpracování a vykreslování textu
- soubor zpracování zvuku (hudby) a jeho převedení na frekvenční spektrum za pomoci rychlé Fourierovy transformace a následné zobrazení jednotlivých frekvenčních pásem na krychli
- pomocný soubor, který obsahuje funkce pro řízení SD karty, ladící funkce nebo např. funkce pro vykreslování virtuálních desetinných pixelů
- soubor vykreslování hlavního menu, různých podmenu na LCD dotykovém displeji, zpracování a filtraci dat z dotykové vrstvy
- devět dalších souborů s jednotlivými efekty 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;
}
```

```
#ifndef SPECTRUMANALYSER_H
#define SPECTRUMANALYSER_H

#include <Arduino.h>
#define FastLED_INTERNAL
#include <FastLED.h>
#include "tesseractFunctions.h"
#include "fillCube.h"
#include <arduinoFFT.h>

#define NUM_LEDS 1000
#define NUM_LAYERS 10
const uint16_t samples = 256;
const double samplingFrequency = 30000;
unsigned int sampling_period_us;
unsigned long microseconds;
unsigned long newTime;

double vReal[samples];
double vImag[samples];
int bandValues[] = {0,0,0,0,0,0};
byte peak[] = {0,0,0,0,0,0};
int oldBarHeight[] = {0,0,0,0,0,0};

#define NUM_BANDS 6
#define AMPLITUDE 1024

extern int brightness;

extern int channel1;
extern int channel2;
extern int mic;

arduinoFFT FFT(vReal, vImag, samples, samplingFrequency);

void setupFFT();
void spectrumAnalyser(CRGB pixels[NUM_LEDS], int inputPin);
void sampleTest();
```

```
#include <OctoWS2811.h>
#include <FastLED.h>
#include <Arduino.h>

template <EOOrder RGB_ORDER = RGB,
          uint8_t CHIP = WS2811_800kHz>
class CTeensy4Controller : public CPixelLEDController<RGB_ORDER, 8, 0xFF>
{
    OctoWS2811 *pcto;

public:
    CTeensy4Controller(OctoWS2811 *_pcto)
        : pcto(_pcto){};

    virtual void init() {}
    virtual void showPixels(PixelController<RGB_ORDER, 8, 0xFF> &pixels)
    {
        uint32_t i = 0;
        while (pixels.has(1))
        {
            uint8_t g = pixels.loadAndScale0();
            uint8_t r = pixels.loadAndScale1();
            uint8_t b = pixels.loadAndScale2();
            pcto->setPixel(i++, r, g, b);
            pixels.stepDithering();
            pixels.advanceData();
        }

        pcto->show();
    }
};
```

```
[platformio]
name = The Tesseract

[env]

[env:teensy41]
platform = teensy
board = teensy41
board_build.f_cpu = 816000000
framework = arduino
monitor_speed = 115200
lib_archive = no
lib_deps =
    fastled/FastLED@^3.6.0
    bodmer/TFT_eSPI@^2.5.31
    arduino-libraries/SD@^1.2.4
    https://github.com/PaulStoffregen/Time.git
    https://github.com/LATimes2/InternalTemperature.git
    kosme/arduinoFFT@^1.6.2
    bblanchon/ArduinoJson@^7.0.3
    paulstoffregen/USBHost_t36@^0.2
    greiman/SdFat@^2.2.2
    paulstoffregen/OctoWS2811@^1.5
```



3. Github

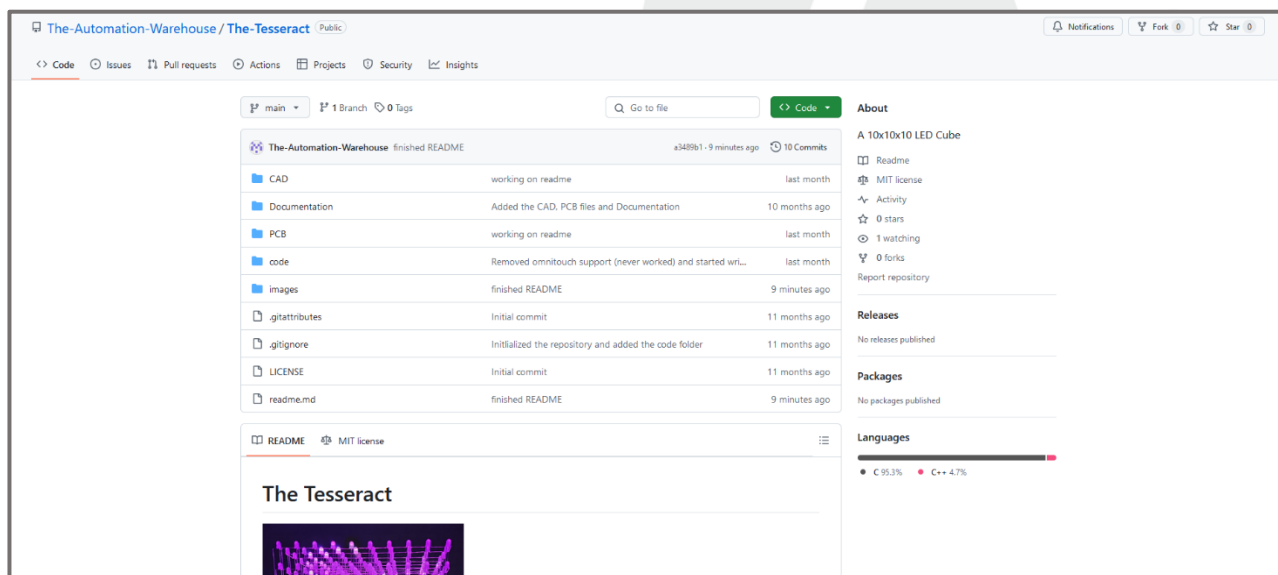
Github je volně dostupná platforma určená primárně pro vývojáře ke sdílení zdrojových kódů různých softwarů. Lze na ni ale nahrát jakýkoliv technický projekt, o který se chce někdo podělit.

V anglickém jazyce jsem popsal celý podrobný proces výroby krychle The Tesseract tak, aby si ho mohl kdokoli sám dle tohoto návodu postavit.

Projekt jsem nahrál pod licenci MIT, která umožňuje protistraně jakékoliv úpravy, sdílení a případně i prodej, nicméně já, jako původní tvůrce projektu, nenesu za cokoliv žádnou odpovědnost.

Repozitář projektu obsahuje stejné přílohy jako tato práce:

- CAD modely ve formátech .step, .stl, .3mf
- soubory PCB ve formátech .zip, .json
- kompletní databázi kódů v jazyce C a C++
- dokumentaci ve formě návodu .md (markdown)
- fotografie a videa



Projekt lze nalézt na této webové adrese:

<https://github.com/The-Automation-Warehouse/The-Tesseract>

4. Závěr

V souladu s cílem práce se podařilo vytvořit LED krychli s tisíci barevnými pixely, devíti světelnými efekty a jedním efektem reagujícím na okolní 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 krychle nebo dvojité spirály otáčející se kolem vertikální osy.

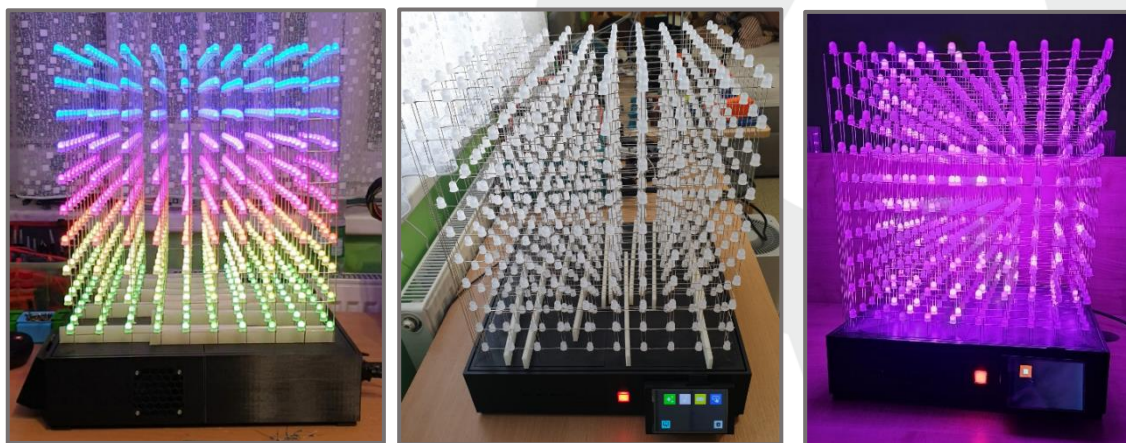
Na krychli je možné hrát známou hru TETRIS ve 3D pro jednoho hráče pomocí USB SNES ovladače (do budoucna plánuji rozšíření pro více hráčů).

Nejsložitější částí práce byl návrh a následná mechanická 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 pro realizaci této práce se pohybuje kolem 15 tis. Kč. Projekt byl zhotoven v období devíti měsíců, největší časový prostor zabral návrh v CADu a pájení LED struktury.

Hlavním přínosem zpracování projektu pro mne bylo zlepšení dovednosti pájení, programování v jazyce C a C++, modelování v CADu a návrh elektronických schémat a PCB.

Zároveň jsem si vyzkoušel tvorbu návodu pro složitější projekt na platformě Github v anglickém jazyce.





Seznam zkratk

TFT	Thin-film transistor (tenkovrstvé tranzistory)
LCD	Liquid crystal display (Displej z tekutých krystalů)
PETG	Polyethylene terephthalate glycol (tiskový materiál)
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)



Zdroje

Internetové zdroje

1. *web prodejce LED diod s dokumentací* [online]. Aliexpress. (2024). [cit. 12.1.2025].

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. 12.1.2025].

Dostupné z: <https://www.pjrc.com/store/teensy41.html>

3. *3D model Chladicího ventilátoru* [online]. 2024 Stratasys Inc. Grabcad.com. [cit. 12.1.2025].

Dostupné z: <https://grabcad.com/library/60-x-60-x-25-exhaust-fan>

4. *3D model 12V zdroje* [online]. 2024 Stratasys Inc. Grabcad.com. [cit. 12.1.2025]. Dostupné

z: <https://grabcad.com/library/fuente-conmutada-12v-2a-12v-3a-12v-5a-12v-10a-12v-30a-12v-50a-1>

5. *3D model 5V zdroje* [online]. 2024 Stratasys Inc. Grabcad.com. [cit. 12.1.2025]. Dostupné z:

<https://grabcad.com/library/fuente-conmutada-5v-3a-5v-10a-5v-40a-1>

6. *3D model napájecího konektoru* [online]. 2024 Stratasys Inc. Grabcad.com [cit. 12.1.2025].

Dostupné z: <https://grabcad.com/library/ac-power-socket-3-pin-250v-10a-ac-17-iec3-c14-1>

7. *3D model konektoru RJ45* [online]. 2024 Stratasys Inc. Grabcad.com. [cit. 12.1.2025].

Dostupné z: <https://grabcad.com/library/rj45-panel-mount-1>

8. *3D model mikrokontroleru Teensy 4.1* [online]. 2024 Stratasys Inc. Grabcad.com. [cit. 12.1.2025].

Dostupné z: <https://grabcad.com/library/teensy-4-1-3>

9. *3D model vypínače* [online]. 2024 Dassault Systèmes. 3dcontentcentral.com. [cit. 12.1.2025].

Dostupné z: <https://www.3dcontentcentral.com/download-model.aspx?catalogid=171&id=345299>

10. *3D model 5V ventilátoru* [online]. 2024 CUI Devices. Cuidevices.com. [cit. 12.1.2025].

Dostupné z: <https://www.cuidevices.com/product/resource/3dmodel/cfm-6010v-130-205-20>

11. *3D model USB portu* [online]. 2024 CUI Devices. Cuidevices.com. [cit. 12.1.2025].

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/>.

Seznam příloh

Příloha I. – elektronická složka Foto a video (videa různých efektů; videa o tisku dílů; video o zkoušce diod; 86 fotografií)

Příloha II. – elektronická složka Code (kód mikrokontroleru Teensy 4.1)

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

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