



## **Středoškolská technika 2023**

**Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT**

### **GENERÁTOR TÓNŮ**

**Jakub Nesnídal**

Střední průmyslová škola elektrotechnická a Vyšší odborná škola Pardubice

Karla IV. 13, Pardubice

## **ANOTACE**

Rozlišujeme mnoho způsobů, kterými lze vytvářet tóny. Například rezonující struna kytary, chvějící se hlasivky v lidském těle či kmitající membrána reproduktoru. Existují ale i více neobvyklé metody tvorby zvuků. Tato práce se zabývá právě jednou z nich, a to reprodukcí tónů pomocí vysokonapětového elektrického výboje. Výrobek je řízen mikroprocesorem a buzen digitálním signálem MIDI. Konstrukce slouží zejména k demonstračním a edukativním účelům.

### **Klíčová slova:**

tón, zvuk, vysoké napětí, elektrický výboj, mikroprocesor, MIDI

## **ANNOTATION**

We distinguish many ways in which tones can be produced. For example, a resonating guitar string, vibrating vocal cords in the human body or an oscillating speaker membrane. But there are also more unusual methods of creating sounds. This project is about one of these methods, namely the reproduction of tones using a high-voltage electric arc. The device is controlled by a microprocessor and driven by a digital MIDI signal. The main use is for demonstration and educational purposes.

**Keywords:**

tone, sound, high voltage, electric arc, microprocessor, MIDI

# OBSAH

1	ÚVOD.....	- 9 -
2	TEORETICKÁ ČÁST.....	- 10 -
2.1	Generování vysokého napětí.....	- 10 -
2.2	Tvorba nosného kmitočtu .....	- 11 -
2.3	Tvorba modulačního kmitočtu .....	- 13 -
2.3.1	Tvorba z analogového signálu .....	- 13 -
2.3.2	Tvorba syntetického signálu.....	- 14 -
2.3.3	Polyfonie.....	- 16 -
2.4	Protokol MIDI .....	- 17 -
2.4.1	Způsob komunikace .....	- 17 -
2.4.2	Přehrávání not.....	- 17 -
3	ZPRACOVÁNÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI .....	- 18 -
3.1	Obecný popis výrobku.....	- 18 -
3.2	Technické údaje.....	- 19 -
3.2.1	Uživatelské rozhraní .....	- 19 -
3.2.2	Technické parametry.....	- 19 -
3.3	Elektrotechnická funkce .....	- 20 -
3.3.1	Blokové schéma.....	- 20 -
3.3.2	Propojení funkčních bloků.....	- 20 -
3.3.3	Popis činnosti obvodů .....	- 21 -
3.4	Řídicí program .....	- 32 -
3.4.1	Deklarace a inicializace proměnných a obsluh přerušení .....	- 32 -
3.4.2	Nastavení počátečních parametrů .....	- 36 -
3.4.3	Hlavní smyčka programu.....	- 37 -
3.4.4	Obsluha sériové komunikace .....	- 37 -
3.4.5	Funkce pro nastavení časovačů.....	- 39 -
3.4.6	Pomocné funkce.....	- 41 -
3.5	Konstrukce.....	- 42 -
3.5.1	Výroba skříně.....	- 43 -
3.5.2	Výroba panelů .....	- 45 -
3.5.3	Výroba měděného portálu a hrotů .....	- 47 -
3.5.4	Výroba armatur .....	- 48 -

3.5.5	Výroba kovového chassis .....	- 50 -
3.5.6	Příprava vysokonapěťových transformátorů .....	- 51 -
3.5.7	Výroba desek plošných spojů .....	- 54 -
3.5.8	Úprava ručkového přístroje.....	- 55 -
3.6	Oživování.....	- 57 -
3.7	Rozpiska elektro součástek .....	- 61 -
3.8	Rozpiska mechanických dílů.....	- 65 -
3.9	Návod k použití.....	- 67 -
4	ZÁVĚR .....	- 68 -
5	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	- 69 -
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....	- 70 -
7	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	- 72 -
8	SEZNAM PŘÍLOH.....	- 73 -

# 1 ÚVOD

Rozhodnutí sestrojít generátor tónů je výsledkem úvah, jaký výrobek zvolit pro maturitní práci. Zásadní roli hrála snaha sestrojít zařízení, které ještě nebylo jako maturitní projekt představeno. Z tohoto důvodu jsem předem vyloučil napájecí zdroje, nízkofrekvenční zesilovače jakékoli třídy a provedení, různá zařízení pro automatizaci provozu a podobně.

Při návštěvě vědeckého muzea iQLANDIA Liberec mě zaujal jejich modulovaný Teslův transformátor. Vzhledem ke skutečnosti, že podobný výrobek již byl jako maturitní projekt představen, jsem se vydal jiným směrem, avšak se záměrem dosáhnout stejného výsledku.

Rozhodl jsem se vyrobit zařízení, které ilustruje skutečnost, že k reprodukci zvuků není vždy nutné použití klasického elektroakustického měniče, jako je reproduktor či sluchátka. V mém projektu je zvuk reprodukován, podobně jako ve výše uvedeném Teslově transformátoru, modulovaným vysokonapětovým elektrickým výbojem. Tento výboj s následným obloukem vytváří zvuk při svém vzniku, když kolem sebe prudce ohřívá vzduch. Vlastní hoření oblouku je téměř neslyšné. Modulaci však můžeme oblouk přerušovat kmitočtem ve slyšitelném pásmu, při čemž vzniká výrazný a velmi specifický akustický efekt. Této vlastnosti jsem využil při konstrukci maturitního projektu. Nevýhodou tohoto principu však je, že umožňuje korektně reprodukovat pouze dva tóny současně. Mým cílem bylo zkonstruovat zařízení schopné hrát hudbu, aniž by bylo tímto nedostatkem omezeno.

Hodlal jsem sestrojít zařízení efektní nejen z hlediska netradiční tvorby zvuku, ale i s ohledem na design. Inspirován historickými elektronkovými radiopřijímači jsem se rozhodl použít tradičních materiálů jako je dřevo, nerez a měď a celý projekt ladit do stylu retro.

Dalším atributem, který jsem si předsevzal, bylo využití znalostí nabytých studiem i vlastními zkušenostmi a jejich aplikace do tohoto projektu. Snahou bylo uplatnit v zařízení co nejvíce technologií, principů a oblastí elektroniky.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

Maturitní práce Generátor tónů vychází z teorie zvukového efektu provázejícího vznik elektrického výboje, ke kterému dojde při dosažení určitého napětí mezi dvěma body, kdy mezi nimi dojde k ionizaci plynu, v tomto případě vzduchu, který se tak stává vodivým pro elektrický proud. Při vzniku výboje dochází k velmi rychlému nárůstu teploty okolního plynu, který se začne prudce rozpínat, čímž dojde ke vzniku akustického rázu. Vhodným řízením výboje lze dosáhnout zajímavých akustických projevů, což bylo cílem této maturitní práce.

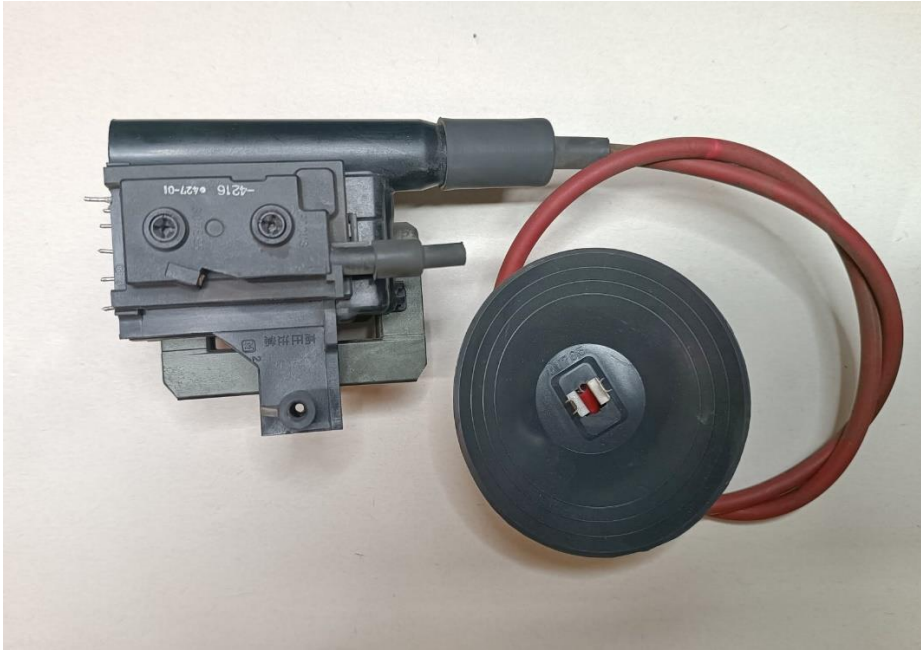
Poměrně srozumitelně je popsán princip vzniku výboje a následného oblouku zde: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektricky-proud/elektricky-proud-v-plynech/druhy-vyboju>.

### 2.1 GENEROVÁNÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ

Způsobů, jak dosáhnout požadovaného výsledku, je několik. Základem je zdroj vysokého napětí, který bude schopen dodat dostatečné množství energie nutné ke spolehlivému vytvoření výboje a následného elektrického oblouku. Při řešení tohoto problému byla inspirací vysokonapěťová část barevných TV přijímačů typu CRT, tedy s vakuovou obrazovkou. Ta pro svoji činnost vyžaduje napětí kolem 25 kV, které je generováno v části řádkového rozkladu a používá kmitočet 15625 Hz. Vysoké napětí je jakýmsi záměrným vedlejším produktem, protože je k jeho získání využit transformátor, který impedančně přizpůsobuje koncový stupeň řádkového rozkladu vychylovacím cívkám. Jelikož je vzhledem k uvedenému kmitočtu použito feritové jádro, byla na tento transformátor přidána další cívka s několika tisíci závity, na jejímž vinutí je k dispozici vysoké napětí pro druhou anodu obrazovky.

Napětí dosahovalo u ČB TV asi 15 kV a později u BTV až 25 kV a bylo nazýváno jako urychlovací. Tento osvědčený princip se udržel od počátku TV a vydržel až do dnešní doby jen s tím rozdílem, že dříve byly spínacím prvkem svazkové tetrody, dnes jsou to bipolární, unipolární či IGBT tranzistory. Pro získání vysokého napětí byl tedy zvolen tento princip včetně rozhodnutí využít VN transformátor ze zmíněného BTV CRT a jako spínací prvek byl zvolen unipolární výkonový tranzistor MOSFET s kanálem N.

Původním předsevzetím bylo docílit výboje kolem 20 mm. Postupným doladováním se podařilo dosáhnout asi 50 mm, což zhruba odpovídá napětí 50 kV. Tato hodnota už je na hranici izolačních schopností transformátorů a dosahuje téměř dvojnásobku jejich provozního napětí. Proto byla nakonec zvolena vzdálenost na jiskřišti 35 mm.



Obrázek 1 - VN transformátor z CRT televizoru

## 2.2 TVORBA NOSNÉHO KMITOČTU

Základem pro správnou činnost VN transformátorů je nosná frekvence v řádu kHz. Proto bylo vyvinuto zapojení dále popsané jako generátor nosného kmitočtu. Ten má za úkol vyrobit signál s pravoúhlým průběhem s možností nastavení kmitočtu i proporce výstupního průběhu.

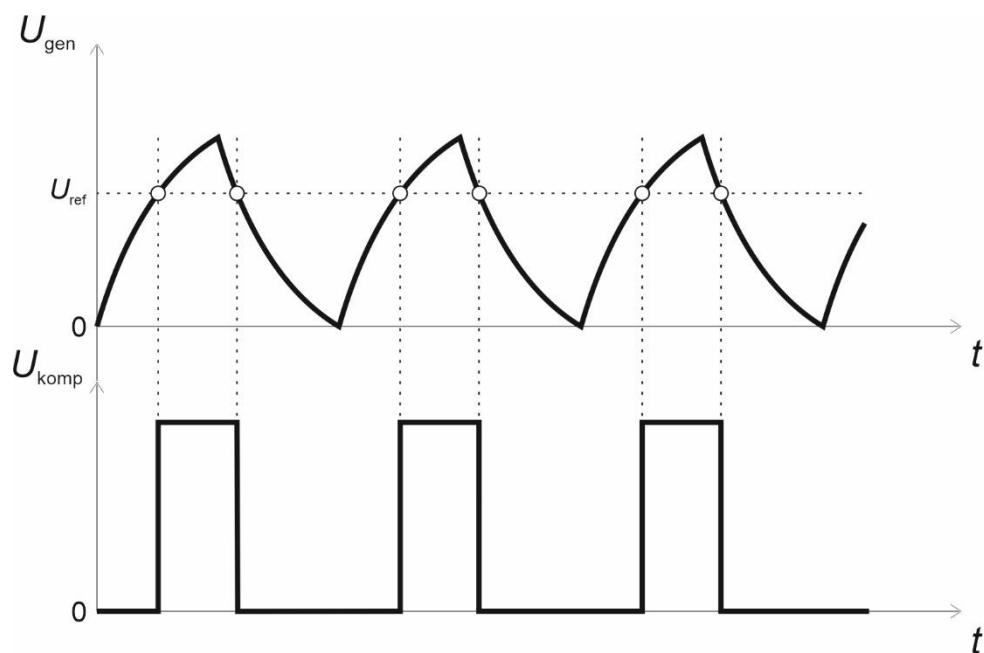
Při experimentech bylo zjištěno, že zvolený nosný kmitočet musí být podstatně vyšší, než původně zmíněných 15625 Hz, protože ten interferoval s modulačním kmitočtem a vytvářel nežádoucí produkty spadající do slyšitelného pásma. Jako nejlepší se ukázaly kmitočty od 25 kHz do 60 kHz, kdy se ještě daly VN transformátory naladit do rezonance a dosáhnout přijatelného výkonu.

Jako optimální řešení se z počátku jevila aplikace populárního obvodu NE555, popř. NE556. Po několika experimentech však bylo od jejich použití upuštěno, a to zejména z těchto důvodů: v zapojení je problematické řízení proporce signálu v oblasti 50 %, při změně kmitočtu se měnila rovněž proporce, obvody se ukázaly jako provozně nespolehlivé, což bylo patrně dáno jejich původem.

Byla tedy zvolena varianta, kde se zdroj nosného kmitočtu skládá ze dvou, na sobě nezávislých částí. Základ tvoří laditelný generátor přibližně trojúhelníkového průběhu. Jedná se o jednoduchý oscilátor s komparátorem, jehož kmitočet je dán časovou konstantou integračního článku a hysterezí. Výsledný průběh není přímo trojúhelníkový, jelikož výstupní napětí je odebíráno z kondenzátoru integrátoru a je tedy nelineární.

Druhou částí je napěťový komparátor s nastavitelnou úrovní reference. Tím je dosaženo požadovaného nezávislého nastavení kmitočtu a proporce.





Obrázek 2 - Výstupní signál z generátoru trojúhelníkového průběhu a z komparátoru

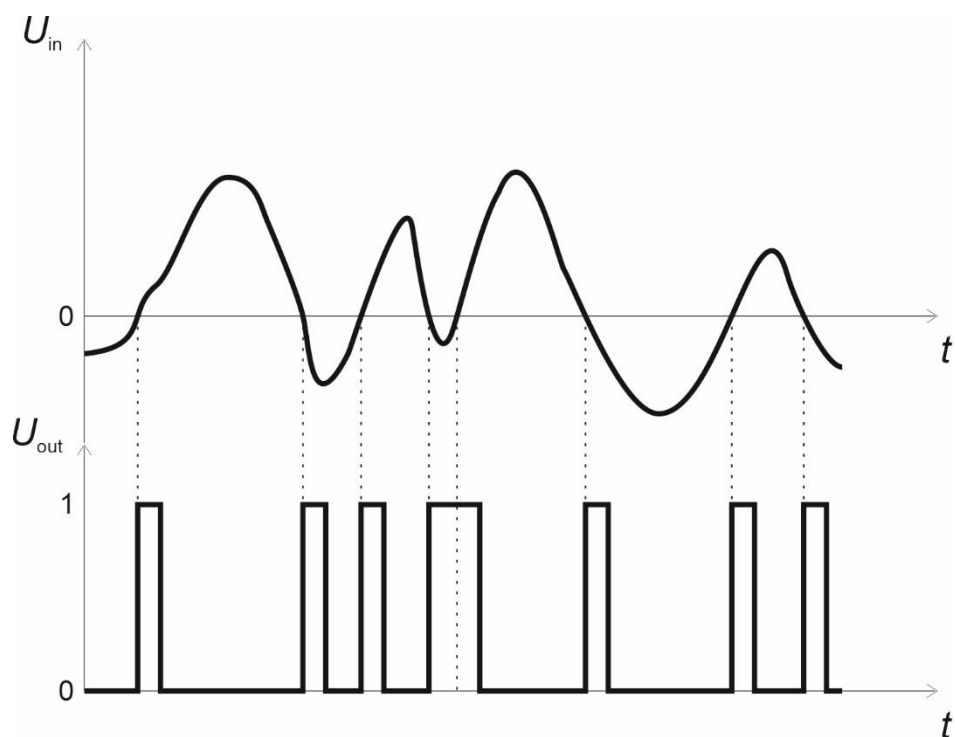
Za generátorem nosného kmitočtu následuje modulátor a budič koncového stupně. Tyto dva obvody pracují na jednoduchých principech popsaných níže ve zpracování praktické části v příslušných kapitolách a nevyžadují zvláštní výklad.

## 2.3 TVORBA MODULAČNÍHO KMITOČTU

Jak již bylo výše zmíněno, samotné hoření elektrického oblouku je takřka neslyšné a zvuk vzniká zejména při jeho vzniku. Z tohoto důvodu je nutné nosný kmitočet vhodně modulovat ve slyšitelném zvukovém pásmu. Princip tvorby modulačního kmitočtu zásadně ovlivňuje charakter celého zařízení a záleží na řešiteli, co po výrobku požaduje.

### 2.3.1 TVORBA Z ANALOGOVÉHO SIGNÁLU

Jednou z možností je využití přímo analogového audio signálu a detektoru průchodu signálu nulou, jehož výstupem jsou pak pulzy vhodné pro modulaci. Výhodou tohoto principu je, že vstupem může být audio signál z jakéhokoliv běžného přehrávače. Získaný zvuk však není příliš čistý a zařízení navíc nelze používat při slabém vstupním signálu, kde dochází k téměř neustálé modulaci, čímž se generovaný zvuk stává téměř nerozpoznatelným.



Obrázek 3 - Princip tvorby digitálního signálu z analogového signálu

## 2.3.2 TVORBA SYNTETICKÉHO SIGNÁLU

Druhou možností je upuštění od klasického analogového signálu a vytvoření signálu ryze syntetického. Ten nabývá podoby pravoúhlého průběhu o frekvenci odpovídající určitému hudebnímu tónu. Výhodou je, že díky stálosti tohoto kmitočtu se výsledný zvuk stává velmi čistým, avšak za cenu značného omezení polyfonie. Nároky kladené na generátor modulačního kmitočtu jsou ale přísné, neboť musí být velmi přesný a kmitočtově stabilní v celém tónovém rozsahu.

Jako jednoznačná volba se nabízí využití mikroprocesoru, který nám umožňuje generovat modulační signál a zároveň jednoduše měnit jeho frekvenci podle předem definované sekvence, či na základě vstupního signálu v předem daném protokolu, například MIDI. V této práci je využito právě druhého zmíněného principu, kde se o řízení stará mikrokontroler ATmega328P. Ten umožňuje generovat modulační signál několika odlišnými způsoby.

### 2.3.2.1 Použití funkce *delay/delayMicros*

Nejjednodušší je použití příkazu **delay** případně **delayMicros**. Tyto příkazy na definovanou dobu pozastaví chod programu. Modulační kmitočet lze tedy vytvářet jednoduchou sekvencí příkazů, jak je uvedeno níže:

```
digitalWrite(X, HIGH);    //Přepnutí výstupu X do stavu log. 1
delay(50);                //Délka první půlperrody v ms
digitalWrite(X, LOW);     //Přepnutí výstupu X do stavu log. 0
delay(50);                //Délka druhé půlperrody v ms
```

Jedná se sice o velmi jednoduchou metodu, avšak takřka nepoužitelnou. Výstupní frekvence je nepřesná, nelze ji měnit okamžitě a není možné generovat signály na více výstupech současně.

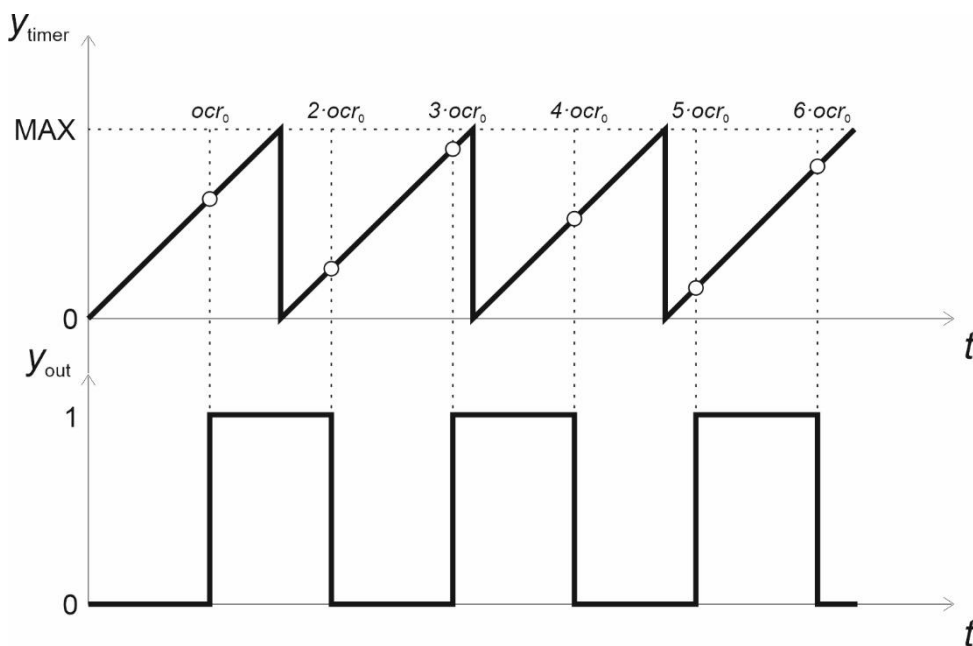
### 2.3.2.2 Použití funkce *millis/micros*

Druhou metodou je využití schopnosti mikroprocesoru snímat uplynulý čas od počátku chodu programu. Pro přístup k tomuto údaji se používají příkazy **millis** a **micros**. Při vhodné aplikaci těchto funkcí lze generovat poměrně široké kmitočtové spektrum i na více výstupech v jeden okamžik. Při vyšších frekvencích je však i tato metoda velmi nepřesná, z důvodu omezeného rozlišení snímání výše zmíněného času a přílišné délce trvání zpracování programu.

### 2.3.2.3 Použití časovačů

Zmíněný nedostatek odstraňuje až třetí metoda, ve které se využívá speciálních přesných časovačů vestavěných v mikroprocesoru. ATmega328P disponuje třemi takovými časovači: jeden 16bitový Timer/Counter1 a dva 8bitové Timer/Counter0 a Timer/Counter2.

Tyto časovače načítají pevně danou rychlostí číselnou hodnotu od 0 až do svého maxima (255 u 8bitového a 65535 u 16bitového), kde následně dojde k přetečení a vrácení zpět na hodnotu 0. Zároveň dokáží tuto hodnotu porovnávat až s dvěma různými hodnotami porovnávacích registrů a vygenerovat přerušení při shodě. Pokud při tomto přerušení změním stav výstupu na opačný a současně posuneme hodnotu příslušného porovnávacího registru, dostaneme na daném výstupu velmi přesný pravoúhlý kmitočet, jehož frekvence závisí na rychlosti časovače a velikosti posunu hodnoty daného porovnávacího registru. Pro ještě vyšší přesnost lze i z 8bitových časovačů vytvořit jakési pseudo16bitové časovače. Toho dosáhneme vhodným programem, kdy necháme 8bitový časovač nejprve několikrát přetéct, než dojde k překlopení stavu výstupu.

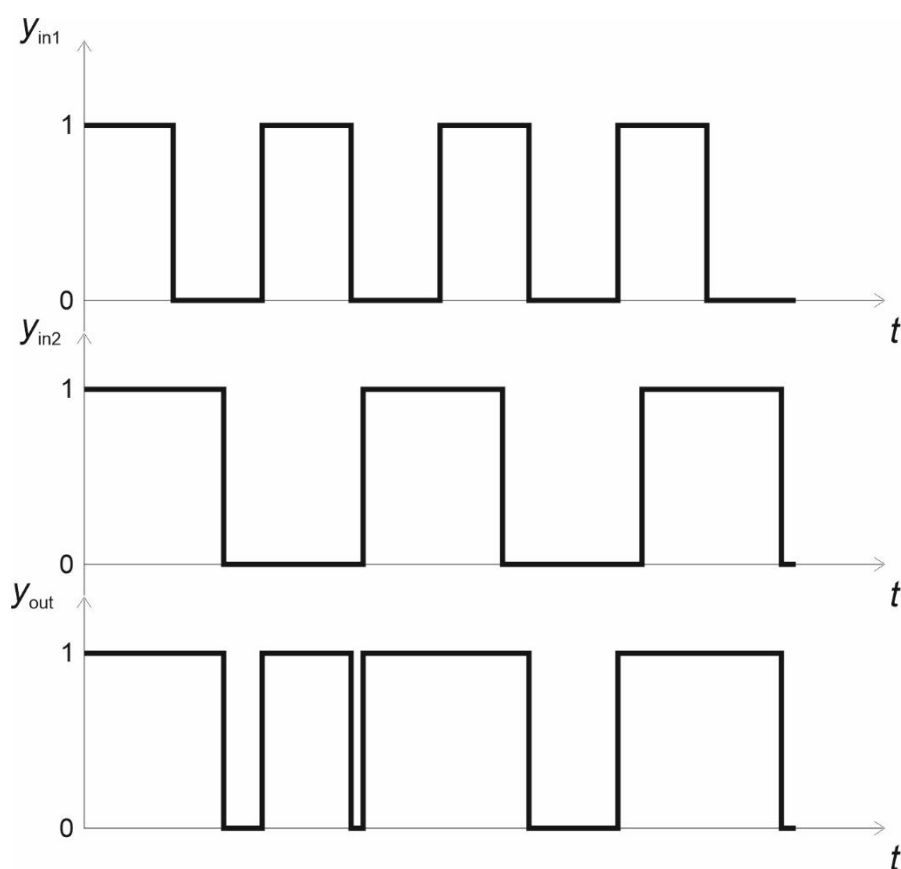


Obrázek 4 - Princip tvorby kmitočtu pomocí časovače ( $y_{timer}$  je aktuální hodnota časovače,  $ocr_0$  je počáteční hodnota porovnávacího registru)

### 2.3.3 POLYFONIE

Jak již bylo řečeno, polyfonie tohoto systému je značně omezena, avšak ne zcela vyloučena. Řešením je použití principu binárního sčítání pravoúhlých signálů různé frekvence. Tato metoda je ale vhodná nanejvýš pro dva kmitočty. Při sčítání více pravoúhlých signálů dochází, vzhledem k jejich 100% amplitudě a průběhu, k trvalému uzavření modulačního tranzistoru a tím k trvalému hoření oblouku.

Binárně sčítat signály lze několika způsoby. Tuto operaci přímo vykonává logický člen typu OR. Jednou z možností sestavení tohoto hradla je použití dvojice polovodičových diod, jak je uvedeno ve schématu níže, nebo můžeme využít přímo integrovaný obvod, například 74HC32 (4× 2vstupý OR). Pro úsporu výstupů mikroprocesoru je však vhodné provést tuto operaci přímo v programu a výstup ovládat až tímto součtem, čehož je i využito v tomto projektu.



Obrázek 5 - Princip binárního sčítání dvou signálů

## 2.4 PROTOKOL MIDI

MIDI je průmyslový standard vytvořený za účelem zvýšení kompatibility mezi elektronickými hudebními nástroji různých výrobců. Pro přenos dat využívá proudovou smyčku s proudem 5 mA s galvanicky odděleným vstupem. Zařízení přijímající MIDI musí mít tedy vhodně uzpůsobený vstupní obvod. Nejčastěji se k tomuto využívají optočleny, například 6N138, PC-900 a další. Běžným konektorem pro připojení je 5pólový konektor DIN. V dnešní době se MIDI běžně přenáší i po USB a k převodu na konektor DIN5 se využívají speciální USB-MIDI převodníky.

### 2.4.1 ZPŮSOB KOMUNIKACE

Tento standard slouží k digitálnímu přenosu informací o hudebních tónech a různých operacích s nimi, nikoliv k přenosu hudby v podobě klasického analogového audio signálu. Data jsou přenášena sériově (jednotlivé bity jsou posílány za sebou) a asynchronně (není přítomný hodinový signál) s rychlostí 31250 bit/s. Informace je přenášena pomocí stavových a datových bytů. Zpráva v protokolu MIDI se nazývá událost a začíná jedním stavovým bytem, přičemž následuje jeden či více datových bytů. Rozlišujeme události kanálové (platí pouze pro daný kanál) a systémové (platí pro všechny kanály).

Stavový byte kanálové události obsahuje dvě základní informace. První 4 bity obsahují informaci o příkaze, jenž se má vykonat. Další 4 bity pak udávají kanál, na kterém má být daný příkaz vykonán. Jelikož informace o kanále je pouze 4bitová, MIDI dokáže pracovat pouze se 16ti kanály. Případné datové byty pak obsahují dodatečné parametry pro vykonání příkazu.

### 2.4.2 PŘEHRÁVÁNÍ NOT

Mezi nejčastější události patří NOTE\_ON a NOTE\_OFF, které slouží k přehrání not. Datové byty těchto událostí jsou dva a obsahují informaci o notě, jenž má být přehrána a o hlasitosti. Dobou mezi vysláním NOTE\_ON a NOTE\_OFF se určuje, jak dlouho má daný tón trvat. Na jednom kanále může být současně spuštěno i větší množství not.

```
0x82 0x45 0x64 //Spust' notu č. 69 (A4 – 440 Hz) na kanále 2 s hlasitostí 100  
0x92 0x45 0x64 //Zastav notu č. 69 (A4 – 440 Hz) na kanále 2 s hlasitostí 100
```

Datové byty mohou nabývat pouze hodnot v rozmezí 0x00 až 0x7F. Počet tónů, které lze tedy pomocí MIDI přenést je 128. To však neznamená, že jiné frekvence nelze vytvářet. K tomu slouží událost typu PITCH\_BEND, která dovoluje tón, jenž se právě na daném kanále přehrává, posunout o určitý počet centů, daný datovými byty. Cent v hudbě je bezrozměrná jednotka, která udává velikost intervalu. Jeden půltón se rovná 100 centů. Událost PITCH\_BEND dovoluje posunout tón o 200 centů výše nebo o 200 centů níže, tedy o dva půltóny každým směrem.

## **3 ZPRACOVÁNÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI**

### **3.1 OBECNÝ POPIS VÝROBKU**

Generátor tónů je přístroj, interpretující hudbu netradičním způsobem za použití elektrických výbojů o ionizačním napětí cca 35 kV. Jeho účel je tedy spíše zábavný nežli komerční.

Umožňuje vytvářet širokou škálu zvuků, které jsou výsledkem intermodulačních produktů a interferencí signálů s vysokým obsahem harmonických složek, které tak činí zvuk neobvykle plným a bohatým na odstíny. Zařízení je do určité míry polyfonní a umožňuje v jednom okamžiku vytvořit a reprodukovat 6 tónů. Polyfonnost je zde realizována jednak binárním sčítáním dvou pravouhlých signálů a jejich interpretací v jednom kanále a rozšířena je použitím tří shodných kanálů, avšak řízených odděleně z řídicí jednotky. Výsledkem je výše zmíněná schopnost přednesu šesti tónů v jednom okamžiku. Nevýhodou interpretace tónů elektrickým výbojem je téměř neřešitelné řízení dynamiky.

Zařízení nereprodukuje hudbu stejným způsobem jako standardní elektroakustický řetězec. Tóny jsou v něm tvořeny na základě dat v protokolu MIDI přicházejících buď z klávesového nástroje, nebo z PC.

Při vývoji bylo počítáno s postupným rozšiřováním o další netradiční zdroje zvuků, a proto je přístroj vybaven krom nutných vstupů rovněž i výstupy, na kterých je k dispozici základní signál MIDI, a to jak ve formě optické, tak i metalické.

## 3.2 TECHNICKÉ ÚDAJE

### 3.2.1 UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ

Zadní panel

- Síťový konektor pro připojení přívodního kabelu Euro
- Konektor ST – optický vstup
- Konektor DIN5 – metalický vstup
- Konektor ST – optický výstup
- Konektor DIN5 – metalický výstup

Ovládací panel

- Signalizační žárovky modulace
- Signalizační LED vstupního signálu
- Signalizační žárovka zapnutého stavu
- Přepínač O/M (optika/metalika)
- Přepínač kanálu MIDI 1-16
- Přepínač SC/MC (Single-Channel/Multi-Channel)
- Analogový ampérmetr

### 3.2.2 TECHNICKÉ PARAMETRY

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| • Napájení                        | 230 V/50 Hz                                |
| • Maximální příkon                | 300 W                                      |
| • Ionizační napětí na jiskřištích | 3× 35 kV                                   |
| • Optika: vlnová délka            | 820 nm                                     |
| • Optika: použitý patchcord       | Multimode, 3 m, ST/ST                      |
| • Metalika: vstup                 | DIN5, MIDI, asynchronní, 31250 bit/s, 5 mA |
| • Metalika: výstup                | DIN5, MIDI, asynchronní, 31250 bit/s       |
| • Rozměry Š/D/V                   | 440 mm × 390 mm × 330 mm                   |
| • Váha                            | 12 kg                                      |



## **3.3 ELEKTROTECHNICKÁ FUNKCE**

### **3.3.1 BLOKOVÉ SCHÉMA**

Generátor tónů se skládá z několika funkčních bloků, které na sebe navazují (viz **Příloha 1 – Blokové schéma**). Podrobný popis činnosti jednotlivých obvodů je uveden v následujících kapitolách. Veškerá schémata lze nalézt v **Přílohách 2 až 10**.

Blokem je myšlen určitý ucelený elektronický obvod plnící specifickou funkci. Generátor nosného kmitočtu se skládá ze dvou bloků, z nichž každý si žádá samostatný výklad. Proto jsou tyto dva bloky označeny tečkovanou čarou a celek je nazván generátor nosného kmitočtu.

Části, na nichž se jednotlivé bloky nacházejí, jsou ohraničeny přerušovanou čarou a opatřeny v horní části názvem.

### **3.3.2 PROPOJENÍ FUNKČNÍCH BLOKŮ**

Napájecí okruhy jsou propojeny vodiči CYA. Pro základní desky byl použit vodič  $0,75 \text{ mm}^2$ , pro napájení koncových stupňů vodič  $1,5 \text{ mm}^2$  a pro přívod k ampérmetru  $4 \text{ mm}^2$ .

Signálové cesty a okruhy s malým předpokládaným proudem jsou propojeny vodiči CYA  $0,25 \text{ mm}^2$ , které jsou opatřeny konektory NS25 s patričným počtem pinů. Vodiče jsou staženy stahovacími páskami a je-li třeba, jsou i fixovány k chassis, nebo jinému mechanicky blízkému prvku, pomocí samolepících úchytů a stahovacích pásek. Vstupní a výstupní obvody jsou se základní deskou propojeny 8žilovým stíněným kabelem, protože vedou kolem VN transformátorů a jsou poměrně dlouhé. Stínění omezuje indukci rušivých signálů.

V níže uvedeném popisu činnosti jednotlivých bloků je výklad omezen na základní části zásadního významu pro činnost popisovaného obvodu. Není zdůvodňován význam součástí zajišťujících VF stabilitu, či VF imunitu, popř. dodatečnou filtraci, jejichž přítomnost je sice nezastupitelná, ale na druhou stranu je jejich význam zřejmý ze schématu a samotného procesu v příslušném bloku se neúčastní. Jedná se zejména o různé keramické a elektrolytické kondenzátory v obvodech napájení.

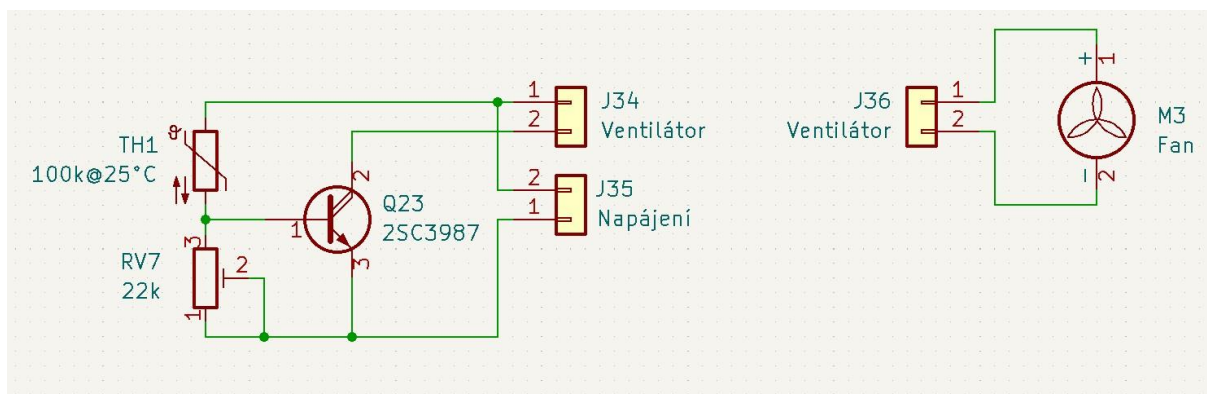
### 3.3.3 POPIS ČINNOSTI OBVODŮ

#### 3.3.3.1 Napájecí zdroj

K napájení zařízení byl použit profesionální spínaný zdroj modulárního typu s označením ACE650F.

Zdroj dodává všechna potřebná napětí: 5 V pro logiku a řídicí jednotku, 12 V pro ventilátory, modulátory, budiče a žárovky a 24 V pro koncové stupně. Výkonově je dostatečně dimenzovaný. Původně zajišťoval chlazení ventilátor, který neměl možnost regulace otáček a při plném výkonu byl hlučný. Jelikož zdroj není využíván do svých limitních parametrů, došlo k výměně ventilátoru za typ s menší hlučností a zároveň byl vybaven jednoduchým obvodem, který řídí otáčky v přímé úměře s oteplováním zdroje. Tím se podstatně snížila hlučnost.

Na zdroji byly provedeny dvě úpravy. Jedna se týkala zmíněné výměny ventilátoru a doplnění o regulaci otáček, druhá spočívala v montáži robustní měděné sběrnice, která propojuje záporné póly modulárních zdrojů. Tato úprava byla provedena ve snaze soustředit všechny zásadní napájecí body v záporné větvi do jednoho místa co nejbližší zdroji a vyhnout se tak nežádoucím proudům způsobených zemními smyčkami.



Obrázek 6 - Schéma zapojení regulace otáček ventilátoru

#### Činnost obvodu:

Ventilátor je zapojen v obvodu kolektoru darlingtonovy dvojice Q23. V bázi je odporový dělič, který je tvořen termistorem TH1 s odporem 100k@25 °C v kladné části a odporovým trimrem RV7 v záporné části. Při ohřevu chladiče termistor typu NTC začne snižovat svůj odpor a tím se otevírá tranzistor Q23. Otáčky ventilátoru stoupají. Pokud se začne chladič ochlazovat nastává opačný proces. Vzniká tak vlastně zpětná vazba, která postupně stabilizuje teplotu na úrovni, kterou lze nastavit trimrem RV7.

Odběr použitého ventilátoru je zanedbatelný a použitý tranzistor netřeba chladit. Přes to je spolu s termistorem připevněn tak, že doléhá na chlazenou část zdroje.

Obvod chlazení je napájen napětím 12 V.

### 3.3.3.2 Chlazení portálu

Pro chlazení portálu byly použity miniaturní ventilátory na začátku a konci potrubí, pracující v režimu push-pull bez řízení otáček.

Oba ventilátory jsou napájeny napětím 12 V.

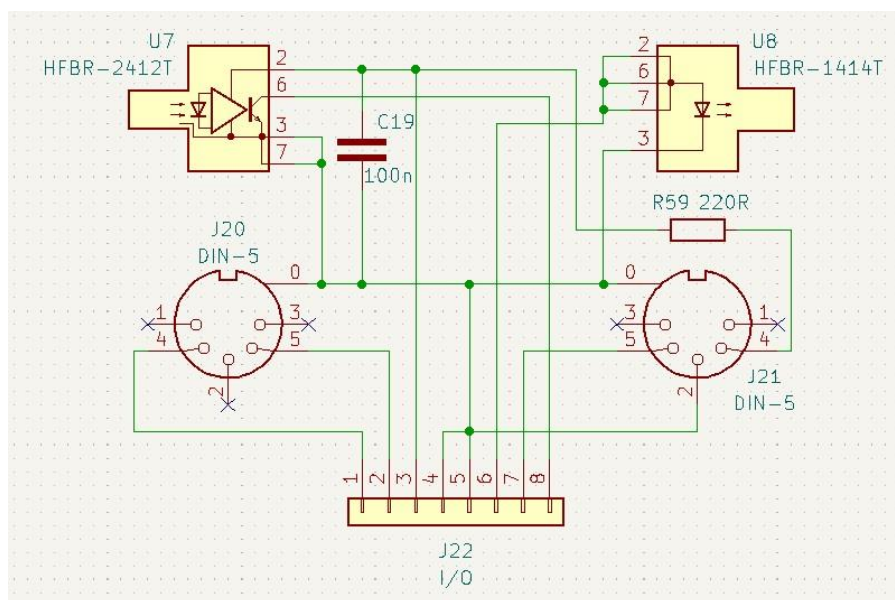
### 3.3.3.3 Vstupní/výstupní díl

Vstupní díl je řešen jako metalický a optický. Připojení optickým kabelem zajišťuje dokonalé galvanické oddělení od zdrojů signálu a vylučuje vznik nežádoucích zemních smyček. Zároveň zajišťuje bezpečné připojení zdrojů signálu v případě poruchy.

Pro rozhraní optika-metalika byly použity optopřevodníky HFBR-2412T (přijímač) a HFBR-1414T (vysílač).

Převodníky pracují s vlnovou délkou 820 nm a k propojení s externím převodníkem je použit optický patchcord o délce 3 m opatřený konektory ST.

Konektory tohoto dílu jsou spolu s optickými převodníky umístěny na zadním nerezovém panelu. K dispozici je 1× optický vstup MIDI, 1× optický výstup MIDI, 1× metalický vstup MIDI, 1× metalický výstup MIDI. Metalické konektory jsou typu DIN5. Výstupy slouží k předpokládanému rozšíření a jejich signál sleduje signál na vstupech.



Obrázek 7 - Schéma zapojení vstupního/výstupního dílu

#### Činnost obvodu:

Optická část: Vstupní optický signál přivedený patchcordem na vstup je v optopřevodníku U7 RX konvertován na elektrický a následně přes pin 8 je přiveden na přepínač M/O SW2. Odtud je přiveden na dvojici Schmittových komparátorů U2C a U2D, kde je obnoven tvar pulzů do podoby zpracovatelné mikroprocesorem.

Z výstupu U2D je zároveň signál přiveden na čtveřici Schmittových komparátorů U2A, U2B, U2E a U2F. Signálem z výstupu U2E je buzen přes R7 tranzistor Q5 a zároveň tranzistor Q1, který je budičem pro optopřevodník U8 TX.

Metalická část: Vstupní signál je přiveden na optopřevodník U1, který konvertuje proudovou smyčku MIDI na úroveň TTL. Z něj je signál veden na přepínač SW2 a dále na mikroprocesor. Výstupní signál pro metalický výstup je odebírán z výstupu U2B přes ochranný rezistor R7.

### 3.3.3.4 Řídicí jednotka

Modulátory všech tří kanálů jsou řízeny z jednotky, jejímž jádrem je mikroprocesor ATmega328P. Tato jednotka zpracovává vstupní signál běžící v protokolu MIDI, který byl zvolen pro jednoduchost a k požadovanému účelu plně postačuje. Úkolem této jednotky je zpracovat vstupní data a vygenerovat podle nich příslušné tóny na daných kanálech. Funkce řídicího programu je detailně popsána v kapitole **Řídicí program**. Hodinový signál mikroprocesoru udává krystal o frekvenci 16 MHz.

Přenos dat je, vzhledem ke snaze ochránit zdrojová zařízení před poškozením silným polem, nebo nepředvídaným chováním v případě poruchy, realizován optickým kabelem. Zařízení jsou od sebe tedy vzdálená na délku optického kabelu a dokonale galvanicky oddělena, nepočítáme-li propojení přes elektrovodnou síť.

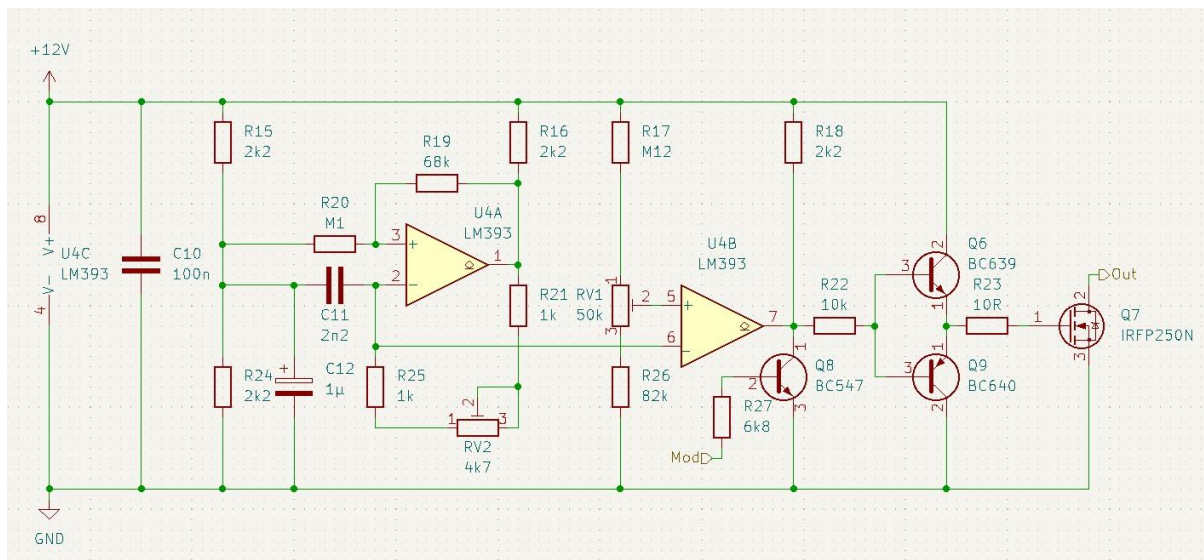
### 3.3.3.5 Generátor nosného kmitočtu

Generátoru nosného kmitočtu byla věnována značná péče, neboť jsou na něj kladeny poměrně vysoké požadavky. Těmi jsou: dobrá kmitočtová stabilita, možnost změny kmitočtu v pásmu 25 kHz až 60 kHz, možnost měnit proporci signálu v pásmu 30 % až 70 % a pokud možno kvalitní pravoúhlý průběh s co nejstrmějšími hranami.

Kmitočtet se nastavuje víceotáčkovým trimrem, který byl použit z důvodu nutnosti přesnějšího nastavení. Stabilita frekvence je dána především kvalitou použitých součástek v integračním článku. Signál je dále veden na invertující vstup komparátoru. Na neinvertující vstup je přivedeno referenční napětí, které lze nastavit trimrem, jenž je součástí odporového děliče, určujícího regulační rozsah. Tímto trimrem lze velmi účinně měnit proporci výstupního pravoúhlého signálu. Podle nastaveného referenčního napětí mění komparátor stav na výstupu ve vztahu k fázi průběhu trojúhelníkového napětí na druhém vstupu.

Toto zapojení se velmi dobře osvědčilo a s jeho provozem nebyl zaznamenán žádný problém. Zároveň je velmi dobře reprodukovatelné, což je důležité, protože tato zapojení jsou použita v projektu tři. Při nastavování jednotlivých parametrů nedochází u tohoto zapojení k ovlivňování jiných hodnot a vzhledem k použití rychlého komparátoru je kvalita výstupního signálu velmi dobrá.

Generátory jsou napájeny napětím 12 V.



Obrázek 8 - Schéma zapojení generátoru nosného kmitočtu, modulátoru a budiče 1

### Činnost obvodu:

Komparátor U4A (U5A, U6A) je zapojen jako generátor, jehož kmitočet je určen především C11 (C14, C17), R21 (R37, R47), RV2 (RV4, RV6) a R25 (R38, R51). Ve skutečnosti však mají na kmitočet vliv v podstatě všechny součástky v tomto obvodu, neboť ovlivňují čas nabíjení a vybíjení C11 (C14, C17). Proto je důležité použít kvalitní součástky, s dobrou teplotní stabilitou a dbát na dostatečnou stabilitu napájecího napětí. Ta je dána kvalitou použitého zdroje.

Generátor tvoří v podstatě komparátor, který má v obvodu záporné zpětné vazby integrační článek a v obvodu kladné zpětné vazby zavedenu hysterezi.

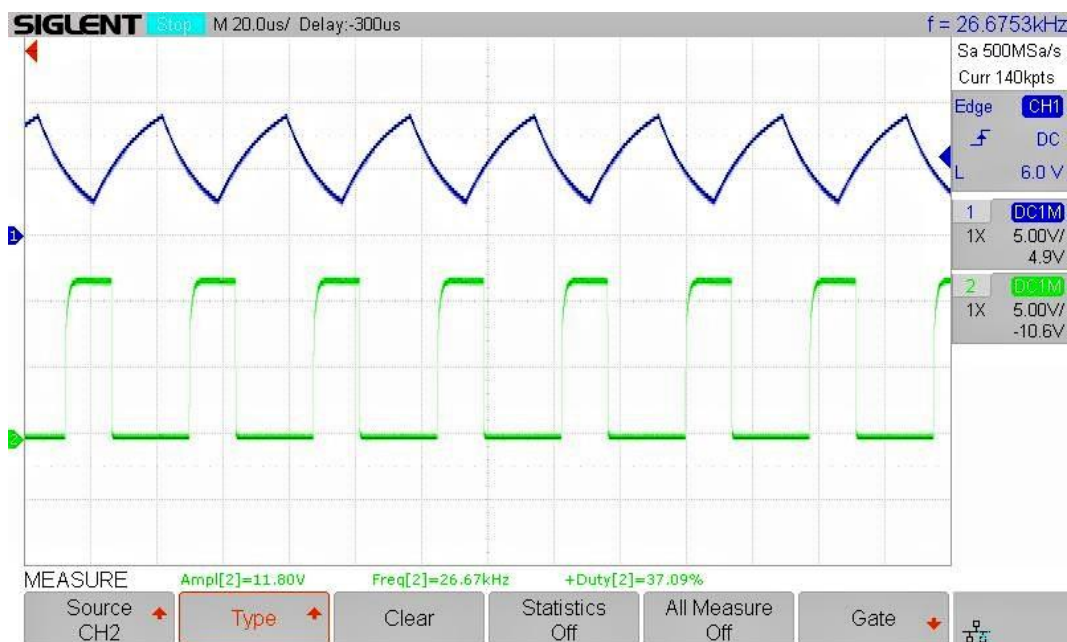
Po zapnutí se začne nabíjet kondenzátor C11 (C14, C17), jenž je součástí integračního článku. Při překročení kladného napětí na invertujícím vstupu nad úroveň napětí na neinvertujícím vstupu komparátor změní stav, na jeho výstupu je úroveň L a kondenzátor C11 (C14, C17), se začne vybíjet. Prahy překlopení určuje zavedená hystereze rezistorem R19 (R32, R45). Tento jev se periodicky opakuje a výsledkem je signál s pravoúhlým průběhem na výstupu U4A (U5A, U6A). Na invertujícím vstupu je k dispozici signál s přibližně trojúhelníkovým průběhem, který je využit pro další zpracování.

K nastavení kmitočtu slouží víceotáčkové trimry RV2 (RV4, RV6).

Signál z invertujícího vstupu U4A (U5A, U6A) je přiveden na invertující vstup komparátoru U4B (U4B, U5B). Na jeho neinvertující vstup je přivedeno referenční napětí z děliče R17 (R30, R43), RV1 (RV3, RV5) a R26 (R39, R52). Toto napětí určuje, v jaké fázi průběhu signálu přítomného na invertujícím vstupu komparátor překlápět. Pokud bude napětí vyšší, bude komparátor překlápět v horní části náběžné a sestupné hrany, tedy v užší části periody a tím bude čas trvání úrovně H na výstupu delší. Pokud bude referenční napětí nízké, bude komparátor překlápět v dolní, tedy širší části, čas trvání úrovně L bude delší. Změnou referenčního napětí lze tedy velmi účinně řídit proporci výstupního signálu od 0 % do 100 %. Napěťový dělič určující referenční napětí je však navržen tak, aby výsledná změna odpovídala přibližně 30 % až 70 %. V komparátoru není zavedena žádná hystereze.

Proporci signálu lze nastavit trimrem RV1 (RV3, RV5).

Průběh zpracovávaného signálu není zcela lineární a vykazuje zakřivení na vzestupné i sestupné hraně. Je to dáno nelinearitou nabíjení a vybíjení kondenzátoru, která není nijak kompenzovaná. Na jeho následné zpracování to však nemá vliv, protože komparátor kontroluje okamžité úrovně napětí poplatně fázi probíhající periody, nikoli její průběh jako takový.



Obrázek 9 - Změřený průběh signálu z generátoru (CH1) a z komparátoru (CH2) na kanále 1

### 3.3.3.6 Modulátor

Jak bylo řečeno v úvodu, elektrický výboj generuje zvuk při svém vzniku. Proto je třeba zajistit, aby vznikl a zanikal v rytmu řídicího signálu. Toho je docíleno modulátorem, který podle přivedeného signálu přerušuje a opět obnovuje nosný kmitočet přiváděný do budiče a následně do koncového stupně. Modulační signál je přiváděn z mikroprocesoru.

V tomto případě se jedná v podstatě o amplitudovou modulaci s hloubkou 100 %. Jelikož se jedná o modulaci pravoúhlým signálem, dalo by se říci, že je modulací digitální.

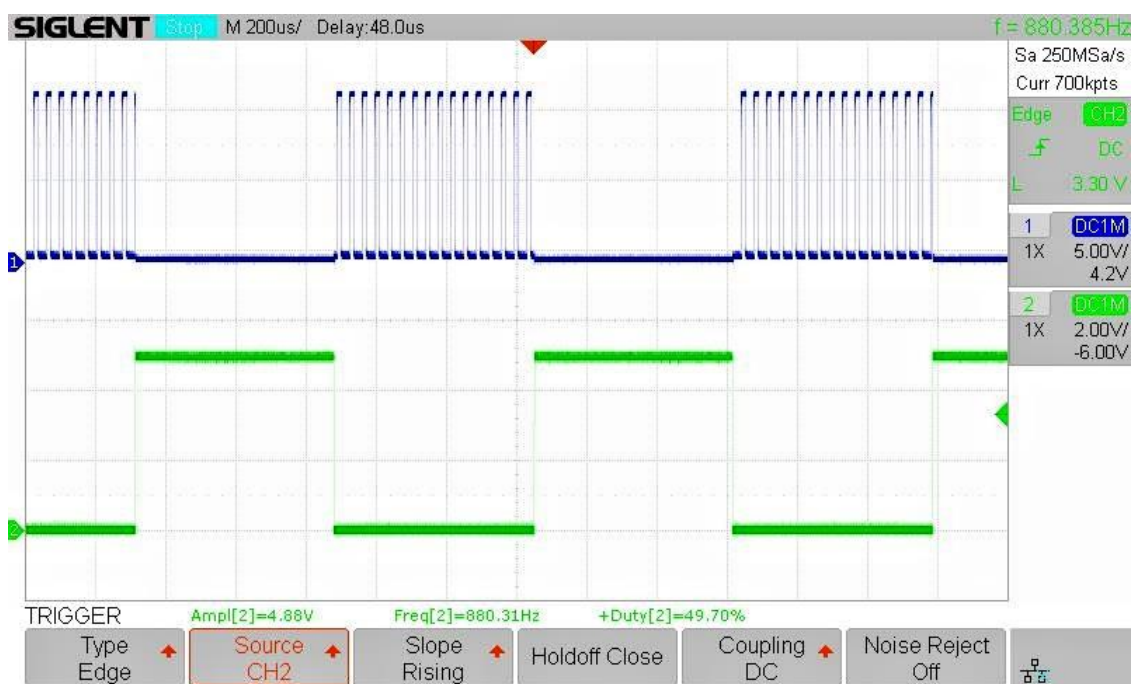
Vlastní modulátor je tvořen bipolárním tranzistorem zapojeným kolektorem na výstup komparátoru a emitorem na GND.

#### Činnost obvodu:

Tranzistor Q8 (Q12, Q16) má společnou zátěž s tranzistorem integrovaným v obvodu U4B (U5B, U6B), kterou představuje R18 (R31, R44). Je-li tedy na R27 (R40, R53) úroveň H, je na kolektoru Q8 (Q12, Q16) úroveň L.

Nosný kmitočet přiváděný na R22 (R35, R48) z výstupu U4B (U5B, U6B) tedy neprochází a na výstupu komplementární dvojice Q6 (Q10, Q14) a Q9 (Q13, Q17) je úroveň L, protože je otevřený tranzistor Q9 (Q13, Q17). Koncový tranzistor je tedy zavřený.

Pokud se na bázi Q8 (Q12, Q16) změní úroveň na L, přebírá řízení budiče výstup z U4B (U5B, U6B), který na něj přivede nosný kmitočet, čímž vybudí koncový tranzistor Q7 (Q11, Q15). Signálem přiváděným na R27 (R40, R53) lze tedy amplitudově modulovat nosnou frekvenci. Protože má modulační kmitočet pravoúhlý průběh a úroveň H zcela otevře Q16, dosahuje hloubka modulace 100 %.



Obrázek 10 - Změřený průběh na vstupu modulátoru (CH2) a na výstupu (CH1) na kanále 1

### 3.3.3.7 Budič koncového stupně

Budič koncového stupně má za úkol vytvořit optimální podmínky pro řízení použitého výkonového tranzistoru tak, aby byla jeho účinnost co největší. Při buzení tranzistoru MOSFET pravoúhlým signálem vyšších kmitočtů, se poměrně významně uplatňuje kapacita mezi elektrodami Gate a Source.

Tato kapacita, v případě vysoké výstupní impedance budiče, nepříznivě deformuje tvar signálu a tím snižuje účinnost PA. Jedním ze způsobů, jak tento jev výrazně omezit, je použití budiče s malou výstupní impedancí. Takovým budičem může být jednoduchý obvod s komplementárními tranzistory v zapojení push-pull, z jejichž emitorů je přes malý ochranný odpor buzena řídicí elektroda koncového tranzistoru. Tímto jednoduchým zapojením se podařilo dosáhnout velmi kvalitního průběhu na řídicí elektrodě výstupního tranzistoru.

Budič je napájen napětím 12 V.

#### **Činnost obvodu:**

Výstup komparátoru U4B (U5B, U6B) je řešen v jeho struktuře jako tranzistor s otevřeným kolektorem, kterému tvoří zátěž rezistor R18 (R31, R44). Pokud je výstup komparátoru ve stavu H, je tato úroveň přivedena přes R22 (R35, R48) na báze komplementární dvojice Q6 (Q10, Q14) a Q9 (Q13, Q17).

Úroveň H je otevřen tranzistor Q6 (Q10, Q14) a Q9 (Q13, Q17) je uzavřen. Na výstupu je tedy úroveň H. V opačném případě, kdy je na výstupu komparátoru L, je otevřen tranzistor Q9 (Q13, Q17) a Q6 (Q10, Q14) je uzavřen. Na výstupu je úroveň L, koncový tranzistor je uzavřen. Komplementární dvojice pracuje v zapojení se společným kolektorem, tedy jako emitorové sledovače, čímž je dosaženo velmi nízké impedance výstupu obvodu.



### 3.3.3.8 Koncový stupeň a vysokonapěťový transformátor

Stěžejní částí je koncový stupeň, který přes svou jednoduchost vyžadoval poměrně rozsáhlé experimentování především s primárním vinutím VN transformátoru, volbou vhodného spínacího prvku a jeho ochranou. Jelikož nebyly nalezeny dostupné informace zabývající se touto problematikou, ani dostupné katalogové údaje o použitých transformátorech, byla tato část realizace obdobím experimentů a empirických zkoušek metodou pokus-omyl. Nakonec bylo zvoleno řešení, které v podstatě z celého VN transformátoru využívá pouze jádro a VN vinutí s usměřňovačem.

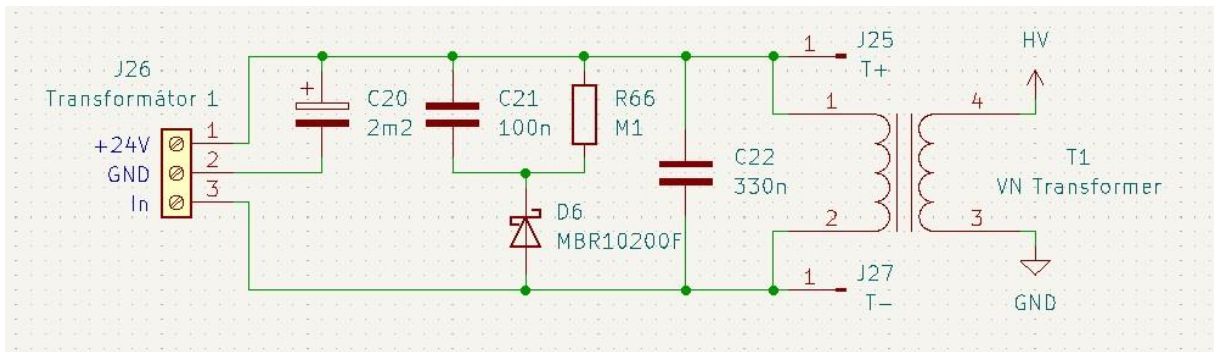
Koncový stupeň je řešen jako jednočinný, pracující ve spínacím režimu. Bylo zvažováno vytvořit PA ve dvojčinném zapojení (polomost), ale vzhledem k už tak hraničnímu napětí na vysokonapěťovém vinutí, které přesahuje téměř o 100 % provozní napětí použitých VN transformátorů a možnostem napájecího zdroje, bylo od tohoto úmyslu upuštěno. Při vývoji koncového stupně bylo experimentováno i s tranzistory IGBT a bipolárními tranzistory, avšak výsledky nebyly uspokojující, a proto padla volba na tranzistor MOSFET.

Modulovaným nosným signálem pravoúhlého průběhu o kmitočtu 25 kHz až 60 kHz je buzen výkonový unipolární tranzistor MOSFET s kanálem N. Proporcí signálu lze nastavit výkon v širokém rozsahu. Zátěží pro tento tranzistor je primární vinutí inkurantního VN transformátoru získaného ze starého BTV přijímače typu CRT. Z těchto transformátorů bylo využito pouze vysokonapěťové vinutí a usměřňovač, protože původní primární vinutí je navrženo pro bipolární tranzistor, navíc pro mnohem vyšší napájecí napětí, což se ukázalo z hlediska impedančního přizpůsobení nevhodné a dosažený výsledek nebyl uspokojující viz kapitola **Příprava vysokonapěťových transformátorů**.

Obvod je naladěn do rezonance kondenzátorem, paralelně připojeným k tomuto vinutí. K ochraně tranzistoru před napěťovými špičkami vznikajícími na zátěži induktivního charakteru slouží RCD obvod se Schottkyho diodou. Tento obvod je zároveň s doladovacím kondenzátorem umístěn na DPS přímo u transformátoru.

Koncový stupeň je napájen napětím 24 V.

Chlazení koncových stupňů je pasivní a stará se o něj duralový profil, který je společný pro všechny tři koncové tranzistory.



Obrázek 11 - Schéma zapojení modulu transformátoru 1

### Činnost obvodu:

Unipolární tranzistor Q7 (Q11, Q15) s kanálem N je buzen pravoúhlým modulovaným signálem z budiče. V obvodu Drainu je zapojeno primární vinutí VN transformátoru, které tvoří spolu s kondenzátorem C22 (C25, C28) paralelní rezonanční obvod naladěný na nosný kmitočet a zátěž pro tento tranzistor.

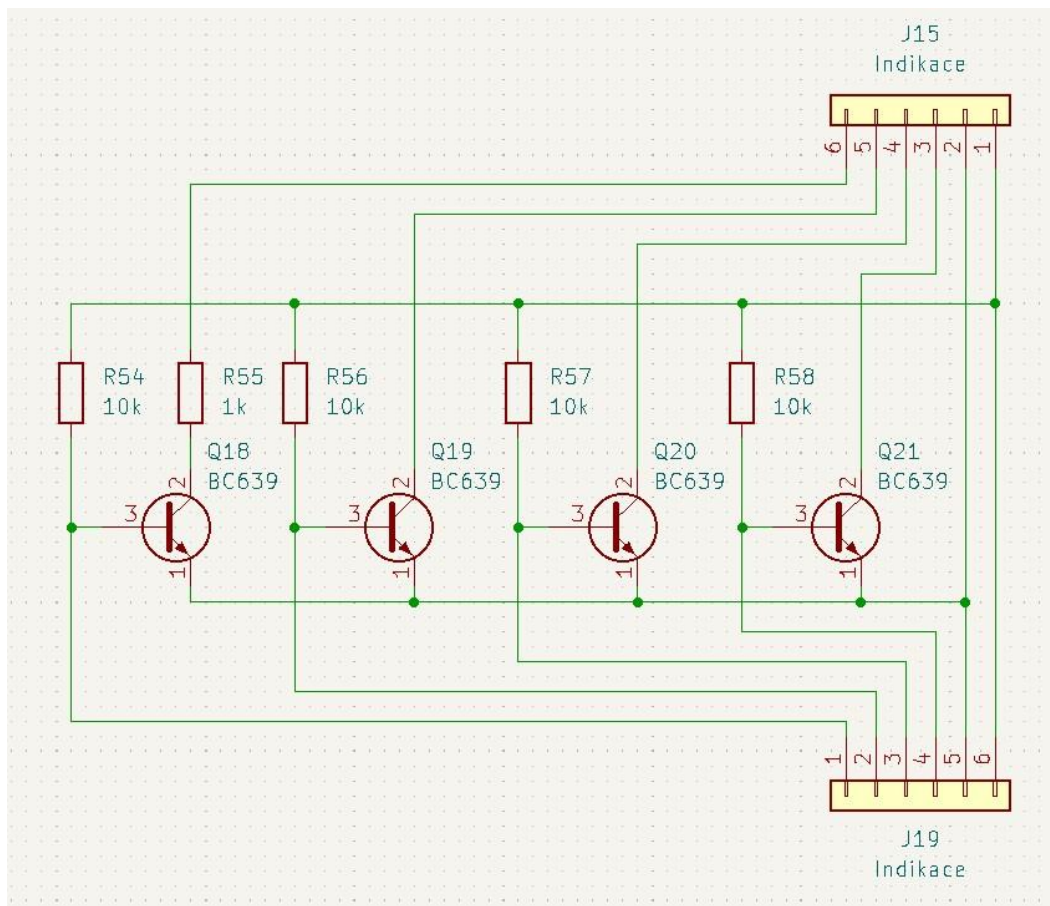
Dodaná energie je transformována do sekundárního vinutí a následně usměrněna VN diodami integrovanými v tělese transformátoru. D6 (D7, D8), C21 (C24, C28) a R66 (R67, R68) slouží k ochraně koncových tranzistorů před napěťovými špičkami způsobenými prací tohoto prvku do induktivní zátěže. Na VN vývodu transformátoru je k dispozici napětí až 50 kV (odhadnuto podle vzdálenosti dosaženého výboje, kdy byl uvažován 1 mm/1 kV), které je již přivedeno na hroty jiskřišť umístěných v izolátorech.

### 3.3.3.9 Signalizační a měřicí obvody

Signalizační a měřicí obvody jsou realizovány z důvodu autentičnosti žárovkami, až na výjimku v případě signalizace vstupu, kde je pro svou rychlost použita LED.

Žárovky znázorňují přítomnost budícího signálu na vstupech modulátorů, LED detekuje vstupní signál. Žárovka v blízkosti vypínače svítí, pokud je přístroj v zapnutém stavu.

Dominantním prvkem na ovládacím panelu je analogový ručkový ampérmetr, měřící součet proudů všech koncových stupňů.



Obrázek 12 - Schéma zapojení modulu signalizace

#### Činnost obvodu:

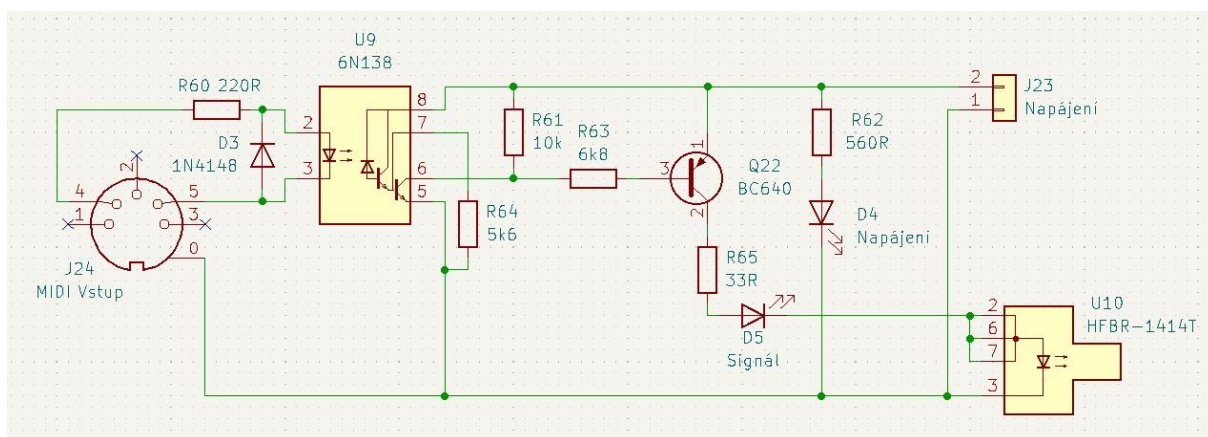
Žárovky signalizující vybuzení koncových stupňů a přítomnosti signálu jsou buzeny přes tranzistory Q2, Q3, Q4, Q5 (LED) a Q18 (LED), Q19, Q20 a Q21. Signál pro ovládání signalizace je brán přímo z výstupů pro modulátory. Napětí pro žárovku Power, stejně jako pro žárovky podsvícení měřícího přístroje dodává výstup zdroje 12 V.

Analogový ručkový ampérmetr s rozsahem 0 až 10 A je zapojen v kladné větvi zdroje 24 V. Na jeho vývod jsou připojeny koncové stupně.

### 3.3.3.10 Převodník metalika-optika

Pro MIDI se optický přenos běžně nepoužívá, a proto musel být vyvinut speciální převodník metalika-optika. Pro metalický vstup je použit konektor DIN5 a výstupem je optopřevodník HFBR-1414T. Převodník zároveň obsahuje signalizační LED pro napájení (červená) a pro přítomnost dat (modrá). Napájení je 5 V a je přivedeno ze samostatného napájecího adaptéru přes panelový konektor DC 5,5/2,1 mm.

Zařízení je umístěno ve dvoudílné krabičce vytištěné na 3D tiskárně (viz **Příloha 18 – Výrobní výkres převodníku metalika-optika**).



Obrázek 13 - Schéma zapojení převodníku metalika-optika

#### Činnost obvodu:

Vstupní signál je přiveden na optopřevodník U9, který konvertuje proudovou smyčku MIDI na úroveň TTL. Z něj je signál veden na rezistor R7, přes který je buzen tranzistor Q22, který je budičem pro optopřevodník U10 TX. V sérii s optopřevodníkem je i signalizační LED D4.

## 3.4 ŘÍDICÍ PROGRAM

Celý program je možné vidět na digitálním médiu přiloženém k dokumentaci.

Rozdělení programu:

- Deklarace a inicializace proměnných a obsluh přerušení
- Nastavení počátečních parametrů
- Hlavní smyčka programu
- Obsluha sériové komunikace
- Funkce pro nastavení časovačů
- Pomocné funkce

### 3.4.1 DEKLARACE A INICIALIZACE PROMĚNNÝCH A OBSLUH PŘERUŠENÍ

Nejprve jsou pomocí komponentu `#define` vytvořeny konstanty obsahující čísla použitých vstupů a výstupů mikroprocesoru. Jedná se o vstupní piny pro hexadecimální kódový přepínač na volbu kanálu MIDI, vstupní pin pro přepínač režimu zařízení SC/MC a výstupní piny pro jednotlivé kanály.

Následně jsou stejným komponentem vytvořeny konstanty s kódy používaných MIDI událostí. Těmito konstantami jsou:

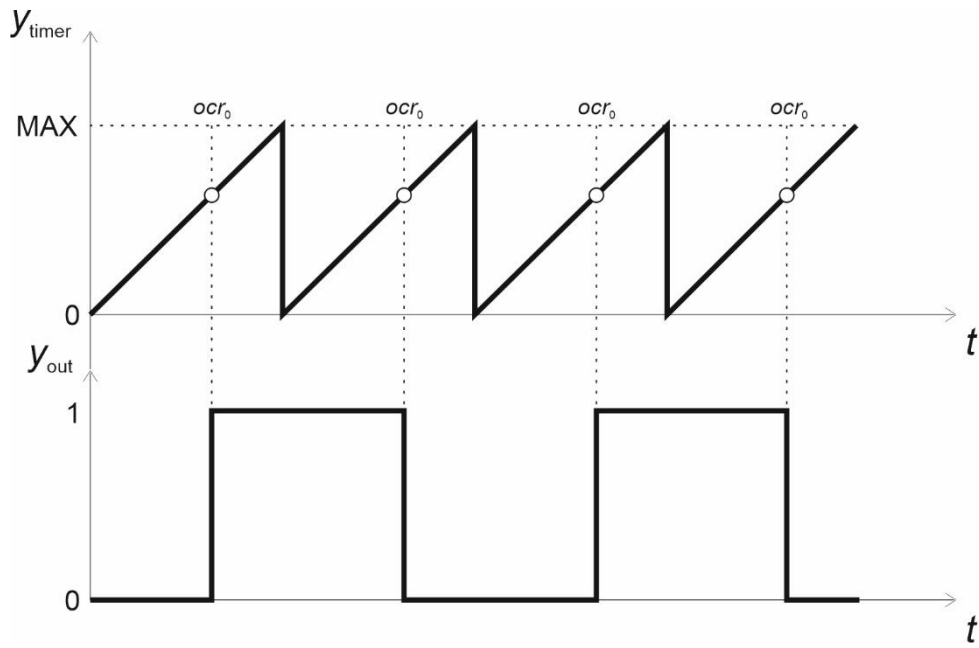
- `0x90` pro událost `NOTE_ON`
- `0x80` pro událost `NOTE_OFF`
- `0xE0` pro událost `PITCH_BEND`

Poté jsou definovány proměnné, potřebné pro zpracování MIDI signálu. Tyto proměnné slouží k uložení vybraného kanálu MIDI, režimu zařízení SC/MC, přijatých stavových a datových bytů, přijatého příkazu a kanálu a nastavení strmosti změny tónu při události `PITCH_BEND`. Funkce poslední zmíněné proměnné je podrobněji vysvětlena v kapitole **Funkce pro nastavení časovačů**.

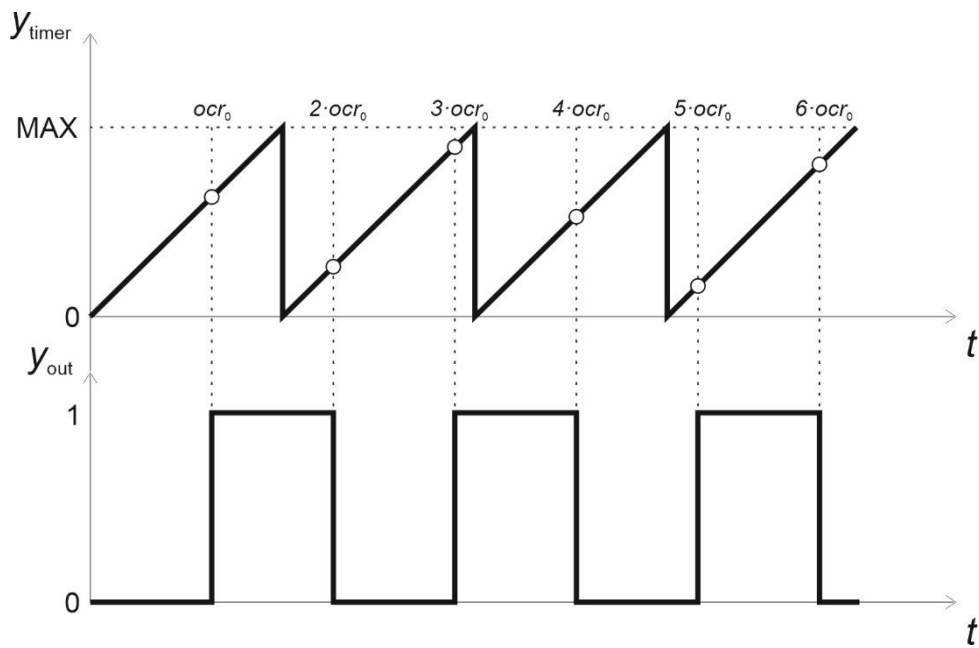
Následuje definice proměnných nutných k chodu časovačů a samotnému generování modulačních kmitočtů spolu s definicemi obsluh přerušení jednotlivých časovačů.

Jelikož časovač Timer/Counter1 je 16bitový, nevyžaduje jeho použití žádné speciální úpravy. Nejprve jsou definovány proměnné pro uložení číselné hodnoty reprezentující tón, jenž se má generovat, poté následuje dvojice proměnných pro uložení hodnoty posunu porovnávacího registru. Poslední dvojice proměnných slouží k uložení stavů výstupů. Následně jsou definovány obsluhy přerušení, které jsou zavolané při porovnání hodnoty časovače s porovnávacími registry. V těchto obsluhách dochází nejprve k posunu hodnoty porovnávacího registru a následně k překlopení stavu výstupu. Pokud by nedocházelo při tomto přerušení k posunu hodnoty porovnávacího registru, výsledný kmitočet by byl ovlivněn pouze rychlostí časovače, jelikož k přerušení by docházelo vždy po stejně dlouhém intervalu.

```
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {  
    OCR1A += (ocr1A + 1);  
    state1A = !state1A;  
}
```



Obrázek 14 - chybně, nedochází k posunu hodnoty  $ocr$  a výsledný kmitočet je neměnný



Obrázek 15 - správně, velikostí posunu hodnoty  $ocr$  lze měnit výsledný kmitočet

Časovače Timer/Counter0 a Timer/Counter2 jsou pouze 8bitové. Pro zvýšení rozlišení je tedy nutné vhodně upravit jejich obsluhy přerušení. Napřed jsou definovány navíc proměnné pro detekci prvních cyklů časovače. Uvnitř každého přerušení je pak definována proměnná pod názvem **remain**. Při prvním cyklu je do této proměnné uložena požadovaná hodnota, při které má dojít k překlopení výstupu. Dokud je tato hodnota vyšší než 255, nesmí dojít k překlopení a časovač musí cyklus opakovat, při čemž každý cyklus je tato hodnota o 256 snížena. Jakmile je hodnota **remain** menší než 255, dochází k překlopení výstupu a posunu hodnoty porovnávacího registru o velikost proměnné **remain**. Proces časování je tak ukončen a dochází opět k prvním cyklu.

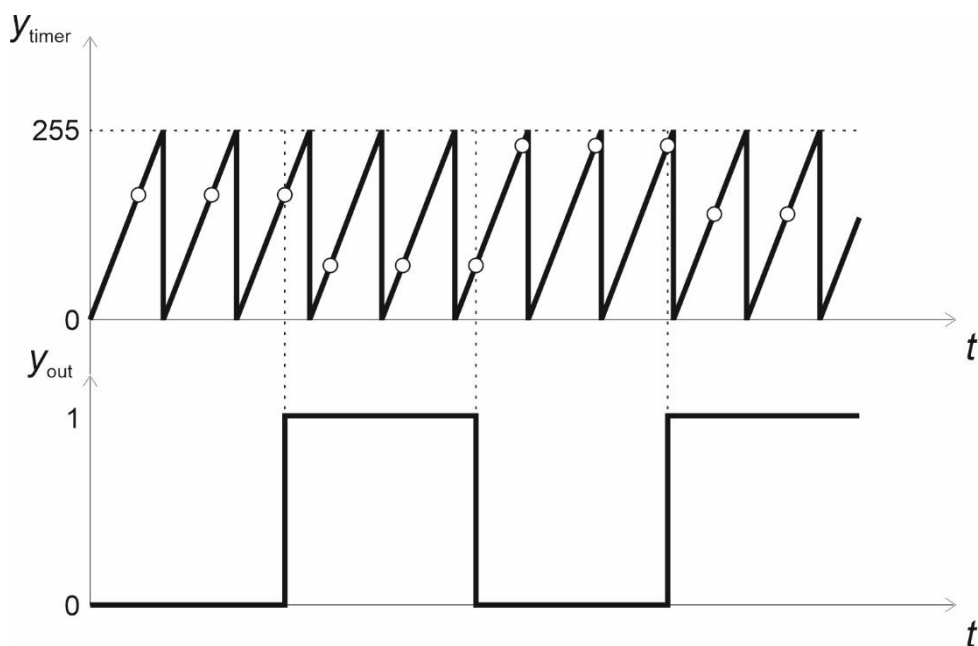
```
ISR(TIMER0_COMPA_vect) {
    static uint16_t remain;

    if (firstCycle0A) {
        firstCycle0A = false;
        remain = ocr0A;
    }

    if (remain > 255) remain -= 256;
    else if (remain > 0) {
        OCR0A += (remain + 1);
        remain = 0;
    }

    if (remain == 0) {
        state0A = !state0A;
        firstCycle0A = true;
    }
}
```





Obrázek 16 – Princip pseudo16bitového časovače, před překlopením stavu výstupu časovač  $2 \times$  přeteče

### 3.4.2 NASTAVENÍ POČÁTEČNÍCH PARAMETRŮ

Počáteční parametry jsou nastaveny ve funkci **setup**. Nejprve jsou to režimy jednotlivých pinů. Všechny vstupy jsou nastaveny jako INPUT\_PULLUP. Výstupy jsou pak nastaveny do režimu OUTPUT.

Poté dochází ke spuštění sériového portu s rychlostí 31250 bit/s pro zahájení MIDI komunikace.

Nakonec jsou ještě nastaveny řídicí registry časovačů. Těmito registry je zvolena rychlost časovače. Rychlost časovače je dána hodinovým signálem mikroprocesoru a tzv. prescalerem dle vztahu:

$$f_{\text{timer}} = \frac{f_{\text{clk}}}{N}$$

Kde  $f_{\text{timer}}$  je frekvence časovače,  $f_{\text{clk}}$  je frekvence hodinového signálu a  $N$  je velikost prescaleru.

Všechny časovače mají velikost prescaleru nastavenou na 8 a hodinový signál má frekvenci 16 MHz. Rychlost všech časovačů je tedy 2 MHz.

### 3.4.3 HLAVNÍ SMYČKA PROGRAMU

Hlavní smyčka programu se odehrává ve funkci **loop**. Dochází v ní pouze k binárnímu sčítání výstupů každého časovače a následnému nastavení příslušných výstupních pinů podle výsledku těchto součtů.

Pro co nejvyšší rychlost byl místo klasické funkce **digitalWrite** využit zápis hodnoty přímo do registru výstupů pomocí příkazu **bitWrite**.

```
bitWrite(PORTB, PORTB3, !(state0A || state0B));
```

```
bitWrite(PORTB, PORTB2, !(state1A || state1B));
```

```
bitWrite(PORTB, PORTB1, !(state2A || state2B));
```

### 3.4.4 OBSLUHA SÉRIOVÉ KOMUNIKACE

O obsluhu sériové komunikace se stará funkce **serialEvent**, která je zavolána na konci hlavní smyčky programu, pokud se v sériovém bufferu nachází jakákoliv data. Uvnitř této funkce dochází nejprve ke čtení stavového bytu a případně i datových bytů MIDI. Stavový byte je následně rozdělen na příkaz a kanál a tyto hodnoty jsou uloženy do příslušných proměnných. Poté je zjištěn stav přepínače režimu zařízení a používaný MIDI kanál vybraný hexadecimálním kódovým přepínačem. Oba tyto údaje jsou uloženy do daných proměnných pro další zpracování. Další funkce se liší podle přijaté události a režimu zařízení.

#### **3.4.4.1 Událost NOTE\_ON**

Jedná-li se událost typu NOTE\_ON a režim je MC (Multi-Channel), je nejprve každému výstupu přidělen samostatný kanál MIDI, který je následně porovnán s kanálem přijaté události.

- Výstup 1..... kanál vybraný kódovým přepínačem
- Výstup 2..... kanál vybraný kódovým přepínačem + 1
- Výstup 3..... kanál vybraný kódovým přepínačem + 2

Tím je určeno, jaký výstup má být řízen a následně je speciální funkcí nastaven a spuštěn příslušný časovač. Pokud je režim SC (Single-Channel), celé zařízení pracuje na jednom kanále, který je určený kódovým přepínačem. Pokud se tento kanál shoduje s kanálem přijaté události, jsou, podle počtu aktuálně přehrávaných tónů, postupně spouštěny jednotlivé časovače. Algoritmus spouštění je znázorněn níže:

1. Časovač 1 sekce A
2. Časovač 2 sekce A
3. Časovač 3 sekce A
4. Časovač 1 sekce B
5. Časovač 2 sekce B
6. Časovač 3 sekce B

Tímto je dosaženo plynulosti přehrávání například při použití elektrických kláves.

#### **3.4.4.2 Událost NOTE\_OFF**

Zpracování události NOTE\_OFF je obdobné se zpracováním události NOTE\_ON s tím rozdílem, že místo spouštění časovačů jsou tyto časovače příslušnou funkcí vypínány.

#### **3.4.4.3 Událost PITCH\_BEND**

Událost PITCH\_BEND může být zpracována pouze v režimu MC. Nejprve je určeno, jaký výstup má být řízen a následně je speciální funkcí upraven kmitočet na tomto výstupu.

### 3.4.5 FUNKCE PRO NASTAVENÍ ČASOVAČŮ

Jedná se funkce spouštěcí, vypínací a o funkce pro plynulou změnu frekvence. Spouštěcích funkcí je, stejně jako vypínacích, celkem 6. Každá tato funkce ovládá příslušnou sekci daného časovače.

Vstupním parametrem spouštěcí funkce je číselná hodnota reprezentující tón, jenž se má generovat. Tato hodnota je nejprve uložena do příslušné proměnné, aby mělo zařízení přehled o tom, které noty aktuálně hrají. Následně je tato hodnota přepočtena na odpovídající velikost posunu porovnávacího registru. Poté už je pouze nastavena prvotní hodnota porovnávacího registru a je povoleno příslušné vyvolání přerušování.

```
void noteOn0A(uint8_t note) {  
    noteByte0A = note;  
    ocr0A = freq2ocr(note2freq(noteByte0A));  
    OCR0A = ocr0A;  
    bitWrite(TIMSK0, OCIE0A, 1);  
    state0A = true;  
}
```

Vypínací funkce pouze vynuluje proměnnou, nesoucí informaci o přehrávaném tónu, a zakáže příslušné vyvolání přerušování.

```
void noteOff0A() {  
    noteByte0A = 0;  
    bitWrite(TIMSK0, OCIE0A, 0);  
    state0A = false;  
}
```

Funkce pro úpravu kmitočtu časovače, která je zavolána při události PITCH\_BEND, má dva vstupní parametry. Tyto dva parametry mají hodnotu datových bytů, přijatých při události PITCH\_BEND. Kombinací těchto bytů získáme informaci o tom, o kolik má být daný kmitočet posunut. Tato informace je následně přepočtena na počet centů o kolik se má daný tón posunout. K tomuto přepočtu slouží výše zmíněná strmost změny tónu. Poté už dochází k samotné úpravě hodnoty posunu porovnávacího registru.

To celé se děje celkem ve třech krocích. Nejprve je číselná hodnota o přehrávaném tónu převedena na frekvenci, tato frekvence je následně pozměněna příslušným počtem centů a konečně je převedena na hodnotu posunutou porovnávacího registru. Funkce, obstarávající tyto převody, jsou popsány v následující kapitole.

```
void pitchBend0(uint16_t pbl, uint16_t pbm) {  
    uint16_t pb = (((pbm & B01111111) << 8) + ((pbl & B01111111) << 1)) >> 1;  
  
    if (pb != 8192) {  
        uint16_t cents = pitchBendStep * (pb - 8192);  
        ocr0A = freq2ocr(freqPlusCents(note2freq(noteByte0A), cents));  
        ocr0B = freq2ocr(freqPlusCents(note2freq(noteByte0B), cents));  
    }  
    else {  
        ocr0A = freq2ocr(note2freq(noteByte0A));  
        ocr0B = freq2ocr(note2freq(noteByte0B));  
    }  
}
```

### 3.4.6 POMOCNÉ FUNKCE

Tyto funkce slouží k potřebným převodům mezi různými hodnotami.

Funkce **note2freq** slouží k převodu číselné hodnoty tónu na jeho frekvenci. Pro přepočet je využit následující vztah:

$$f_n = 440 \cdot 2^{\frac{n-69}{12}}$$

Kde  $f_n$  je frekvence noty a  $n$  je číselná hodnota noty.

Funkce **freq2ocr** slouží k převodu frekvence noty na odpovídající velikost posunu porovnávacího registru. Využit je k tomu následující vztah:

$$ocr = \frac{f_{clk}}{16 \cdot f_n} - 1$$

Kde  $ocr$  je velikost posunu porovnávacího registru,  $f_{clk}$  je frekvence hodinového signálu a  $f_n$  je frekvence noty.

Funkce **freqPlusCents** slouží k posunu frekvence o daný počet centů a využívá následujícího vztahu:

$$f_{nc} = 2^{\log_2 f_n + \frac{c}{1200}}$$

Kde  $f_{nc}$  je upravená frekvence noty,  $f_n$  je původní frekvence noty a  $c$  je počet centů.

### 3.5 KONSTRUKCE

Snahou bylo sestrojít přístroj v retro stylu. Z tohoto důvodu bylo vybráno jako výchozí materiál pro výrobu skříně bukové dřevo namořené jako ořech. Skříň lemuje ve vrchní části okrasná lišta. Celek byl následně nalakován akrylátovým lakem. Pro všechny kontrolky umístěné na horním panelu jsou použity miniaturní žárovky umístěné v držácích určených původně pro LED. Pro detekci vstupního signálu byla použita žlutá LED, protože odezva žárovky nebyla dostatečně rychlá.

Ovládacímu panelu dominuje velký měřicí přístroj s magnetoelektrickým (deprezským) systémem, který měří proud protékající koncovými stupni.

Hlavní součástí projektu jsou jiskřiště, která se zásadně podílí na celkovém vzhledu a jsou nejvýraznějším designovým prvkem, na nějž je při provozu soustředěna pozornost. Jiskřiště je tvořeno měděným portálem a třemi izolátory, v nichž jsou zasazeny měděné elektrody ve tvaru hrotů. Portál je rozebíratelný kvůli usnadnění transportu v přepravním kufru. Mezera mezi koncem hrotu a protipólem byla zvolena na 35 mm. Tato vzdálenost se ukázala jako optimální pro spolehlivé nasazení oblouku. Při delším provozu vyšlo najevo, že se měděný portál nad elektrodami poměrně výrazně ohřívá a bylo nutno jej chladit. O to se stará dvojice ventilátorů na obou jeho koncích ukrytých ve skříni. Ventilátory jsou upevněny v držácích vyrobených metodou 3D tisku a pracují v režimu push-pull.

Zadní panel je zhotoven rovněž z nerezového slízkového plechu a nese napájecí EURO konektor, optopřevodníky RX/TX a konektory DIN5. Tyto prvky slouží k připojení přístroje ke zdroji signálu a pro případné rozšíření o další zdroje zvuku.

Na chassis je připevněn napájecí zdroj, na kterém je následně přišroubovaná základní deska na distančních sloupcích. Za zdrojem je upevněna trojice VN transformátorů zalitých v krabičkách dvousložkovou zalévací hmotou určenou pro tyto účely. Na krabičkách jsou rovněž umístěny DPS s ochrannými obvody a dolad'ovacím kondenzátorem. Hliníkový profil v horní části základní desky slouží ke chlazení koncových tranzistorů. Z důvodu dobré rozebíratelnosti je většina spojů řešena konektory, nebo šroubovými svorkami.

Pro bezpečný transport přístroje slouží transportní kufr, ve kterém je zařízení fixováno proti jakémukoli pohybu. Rovněž jsou v něm uloženy prvky nezbytné k provozu.

Veškeré 3D modely byly vytvořeny v programu Blender a vytištěny na 3D tiskárně Creality ENDER 3. Použit byl bílý PLA filament o průměru 1,75 mm.

### 3.5.1 VÝROBA SKŘÍNĚ

Vzhledem k úmyslu dát přístroji vzhled retro, padlo jednoznačné rozhodnutí vyrobit skříň z tvrdého masivu. Při výběru materiálu hrála roli jeho dostupnost, a to jak reálná, tak finanční. Jako dobrý kompromis se ukázalo bukové dřevo, které je dobře dostupné ve formě prahů ke dveřím. Jednotlivé díly, viz **Příloha 11 – Výrobní výkres skříně**, byly spojeny pomocí hranolů ze smrkového dřeva, a to sešroubováním v rozích.

Horní deska je vyrobena slepením ze tří dílů, protože materiál takové šíře nebyl dostupný. Pro fixaci byly použity dubové kolíčky, tible, a následně byla deska po slepení disperzním lepidlem na dřevo (Dispercol) fixována po dva dny v širokých truhlářských svěrkách. Po úplném sešroubování byla skříň přebroušena, aby nebyly patrné spoje na horní desce a vyhladily se rohy.

Do hotové skříně byly následně vyřezány obdélníkové otvory pro horní a zadní panely, vyvrtány otvory pro izolátory, měděný portál a šrouby ve spodní části, kterými je přišroubováno ocelové chassis.

Dále byla skříň opatřena v horní části úhlovými lištami o šířce 20 mm × 20 mm z borového dřeva. Lišty byly v rozích sesazeny na šikmý řez pod úhlem 45° a přilepeny ke skříně lepidlem Mamut.

Prostor před izolátory je od horního panelu opticky rozdělen plochou lištou o šířce 20 mm z borového dřeva přilepenou rovněž lepidlem Mamut.

Po finálním začištění byla provedena povrchová úprava. Ta spočívala v namoření lazurovacím roztokem JUBIN LASUR CLASSIC NEW GENERATION s odstínem ORAH 16 (Ořech 16). Při moření se ukázalo, že bude postačovat jedna vrstva, která dodala skříně „zdání pokročilého věku“. Následně byly do připravených otvorů vlepeny izolátory a držáky portálu. Po důkladném vyschnutí lazurovacího nátěru byl celek nastříkán bezbarvým lakem ve třech vrstvách. Použitý akrylátový bezbarvý lak nese označení DUPLI-COLOR PRIMA.

Ke snadné manipulaci s přístrojem byla skříň vybavena dvěma kovovými, stylovými držadly po stranách.





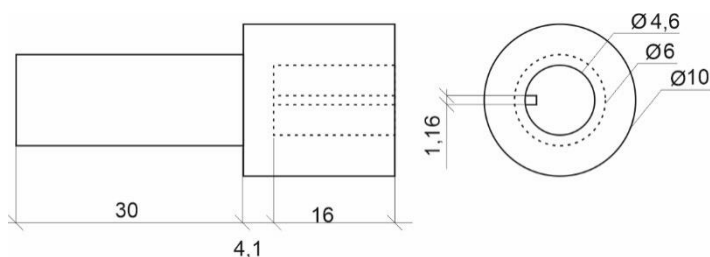
*Obrázek 17 - Sestavená skříň*

### 3.5.2 VÝROBA PANELŮ

Panely jsou vyrobeny z nerezového slzičkového plechu s jemnou čtvercovou texturou o tloušťce 1 mm. Použití ušlechtilého materiálu bylo vykoupeno jeho nesnadnou obrobiteľnosťou, ktorá je v amatérskych podmienkach takřka nulová. Nástroje na vrtání a řezání tohoto materiálu nejsou běžnou výbavou domácí dílny, a proto bylo rozhodnuto nechat panely vyrobit u profesionální firmy, zabývající se řezáním kovů pomocí laseru.

Podklady pro výrobu byly vytvořeny v programu CorelDRAW (viz **Příloha 12 – Výrobní výkres ovládacího panelu** a **Příloha 13 – Výrobní výkres zadního panelu**) a následně exportovány ve formátu DWG AutoCad, ze kterého proběhl proces opracování. Výsledkem byly naprosto precizní výrobky, které nevyžadovaly žádné dodatečné úpravy a bylo možno ihned přistoupit k montáži jednotlivých součástí panelů.

Na horní panel byly postupně připevněny držáky kontrolky, ručkový měřicí přístroj, hlavní vypínač a DPS s přepínači provozu včetně kodéru určujícího provozní kanál. Ke kodéru bylo třeba vytisknout na 3D tiskárně redukci, aby bylo možno použít běžný ovládací prvek s otvorem 6 mm.



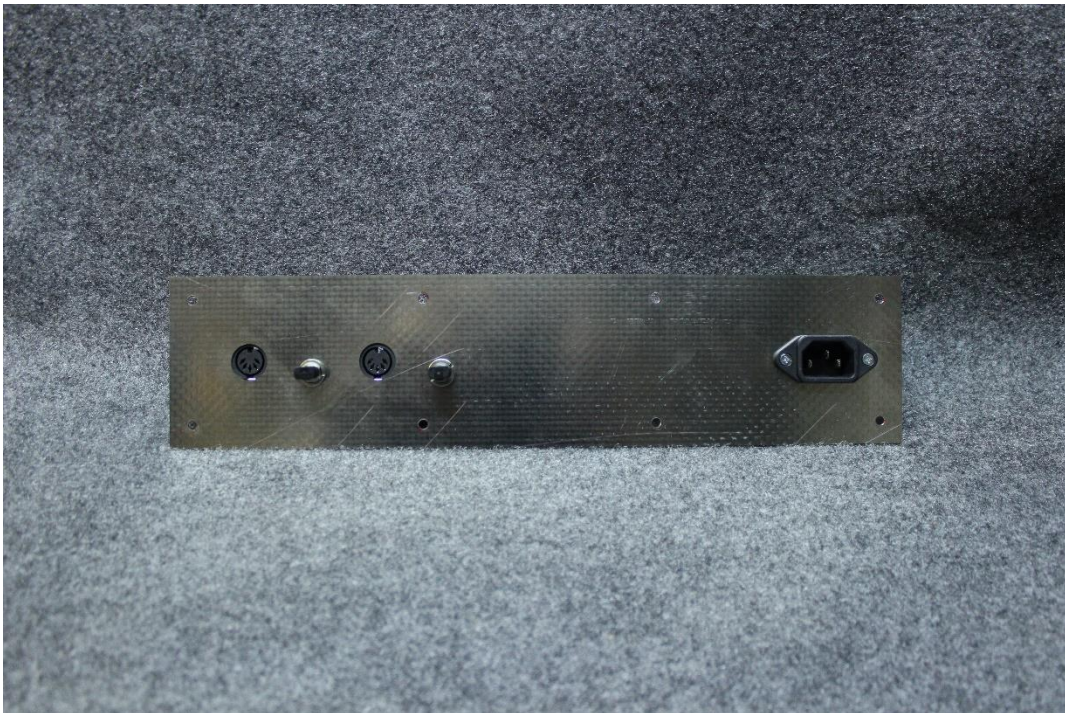
Obrázek 18 - Výrobní výkres redukce kodéru

Na zadní panel byla připevněna EURO zástrčka pro přívod elektrické energie a do druhé poloviny DPS s optopřevodníky a DIN5 konektory.

Každý panel je přišroubován ke skříni osmi dekorativními samořeznými šrouby s černěnou válcovou hlavou pro křížový nástavec PH2. Na závěr byly panely osazeny stylovými gravírovanými popisky z měděného plechu o tloušťce 1 mm (viz **Příloha 17 – Popisné štítky**).



*Obrázek 19 - Osazený ovládací panel*



*Obrázek 20 - Osazený zadní panel*

### 3.5.3 VÝROBA MĚDĚNÉHO PORTÁLU A HROTŮ

Měděný portál (viz **Příloha 14 – Výrobní výkres měděného portálu**) je součástí jiskřiště a je jeho záporným pólem společným pro všechny tři kanály. Pro zachování retro stylu byla zvolena jako materiál pro jeho výrobu soustava topenářských Cu trubek o průměru 12 mm. Trubka byla krácena topenářským ručním řezačem Kreator, který materiál dělí bez otřepů a následné nutnosti jej dále ošetřovat. Po nakrácení jednotlivých částí byl portál sesazen tak, aby byly pólové nástavce a kolena v zákrytu. Následně byla celá sestava vsazena do držáků ve skříni a proběhla korekce vzdáleností, aby byly pólové nástavce přesně nad středy hrotů vsazených do izolátorů.

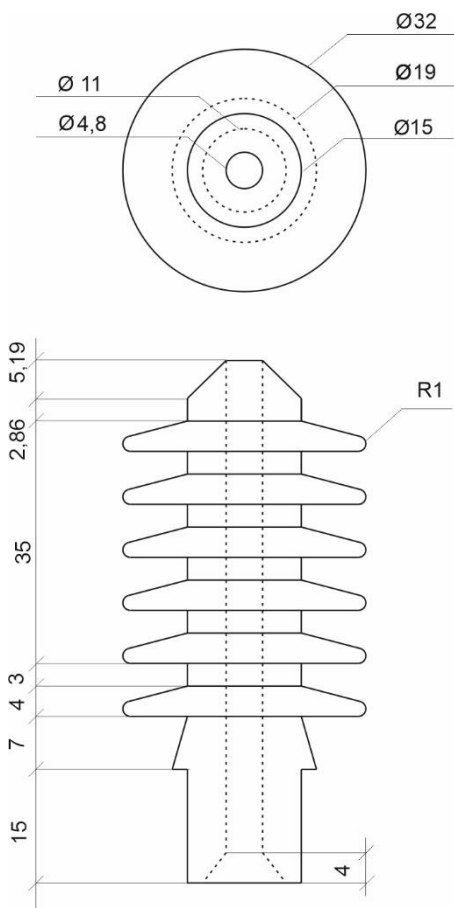
Poté byl portál rozebrán, aby bylo možné provést další nezbytné kroky. Prvním bylo nepatrné narušení konců trubek tak, aby byl zajištěn dobrý kontakt a zlepšila se mechanická pevnost. Toto narušení bylo provedeno stranovými štípacími kleštěmi vždy na třech místech. Následně byly všechny části sestavy vyleštěny topenářským brusným rounem a odmaštěny propylalkoholem. Poté byly všechny díly horní části portálu, krom stojen, sesazeny a ve spojích slepeny lepidlem Loctite 401. Po vytvrzení lepidla byl sesazený horní díl opět odmaštěn propylalkoholem a nastříkán bezbarvým lakem ve třech vrstvách. Stojny byly na koncích v patřičné vzdálenosti omotány ochrannou páskou tak, aby se lak nedostal do míst elektrického spoje a po odmaštění byly rovněž nastříkány lakem.

Portál je umístěn v držácích vlepených do skříně a je vyjímatelný. Ve spodní části držáků je vlepen měděný nátrubek, který slouží jednak k připojení záporného pólu vysokonapětových transformátorů a zároveň jsou na nich nasazeny dva miniaturní ventilátory, pracující v režimu push-pull. Portál se při provozu silně ohřívá, protože absorbuje většinu energie elektrického výboje, a proto je nutné ho chladit. K tomu slouží dvojice výše uvedených ventilátorů, kdy jeden vzduch do portálu vhání a druhý jej naopak odsává. Tím se udržuje teplota portálu na přijatelné mezi, kolem 50 °C.

Hroty byly vyrobeny z vodiče Cy16 a to tak, že byl vodič po zakrácení na požadovanou délku zbaven v jedné části izolace, poté upnut do stojanové vrtačky, která byla následně spuštěna a pod úhlem cca 45° zbroušen úhlovou bruskou do špice, která byla dále ještě vyhlazena smirkovým plátnem. Poté byl hrot zbaven zbytku izolace, která jej pouze chránila při broušení před poškozením čelistmi sklíčidla.

### 3.5.4 VÝROBA ARMATUR

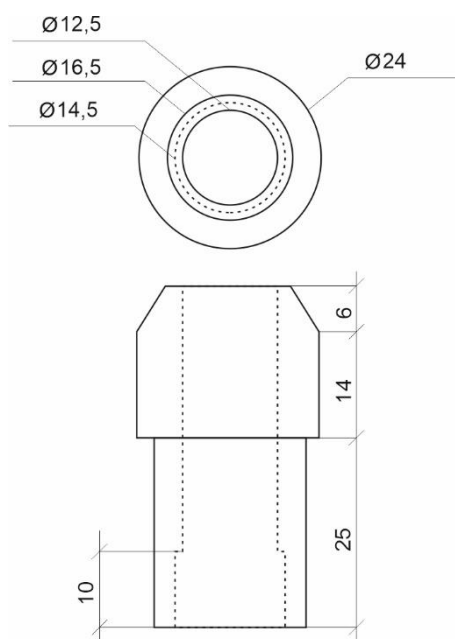
Izolátory byly vyrobeny na 3D tiskárně. Mají klasický rovný válcovitý tvar s šesti izolačními prstenci. Po vytištění byly vlepeny do skříně. V otvorech v jejich středu je umístěn měděný hrot, v zadní části zajištěn proti pohybu samořezným šroubem 1,5 mm.



Obrázek 21 - Výrobní výkres izolátoru

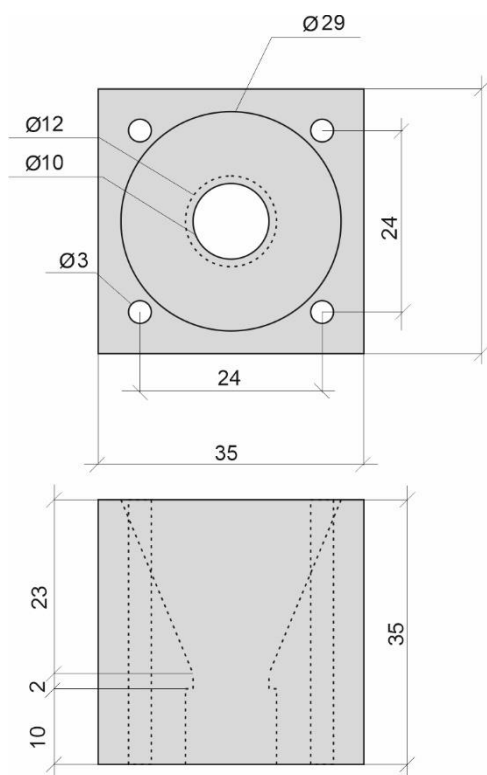
Kontakt mezi hrotem a vývodem z vysokonapěťového transformátoru je zprostředkován pružinami naletovanými na vysokonapěťové vývody přes duté nýty. Tyto pružiny se při nasazování skříně zasunou do otvorů v izolátorech, kde následně naléhají na spodní část hrotu. K tomuto úkonu jsou určeny tři nasazovací trny, vyrobené z vodiče Cy2,5. Na jednom konci mají připájený sedlářský nýt. Při nasazování skříně musí být hroty vyjmuty. Do izolátorů se zasunou nasazovací trny tak, aby byly nýtem nahoru, což zabraňuje propadnutí. Následně se trny spodní částí zasunou do pružin na vývodech a opatrným pohybem směrem dolů se nasadí skříně. Trny při tom navedou pružiny do otvorů v izolátorech a poté se vyjmou.

Držáky portálu byly vyrobeny na 3D tiskárně a jsou vlepeny v příslušných otvorech ve skříni. Slouží k fixaci polohy portálu nad hroty jiskřišť a zároveň zajišťují kontakt se záporným pólem VN obvodů.

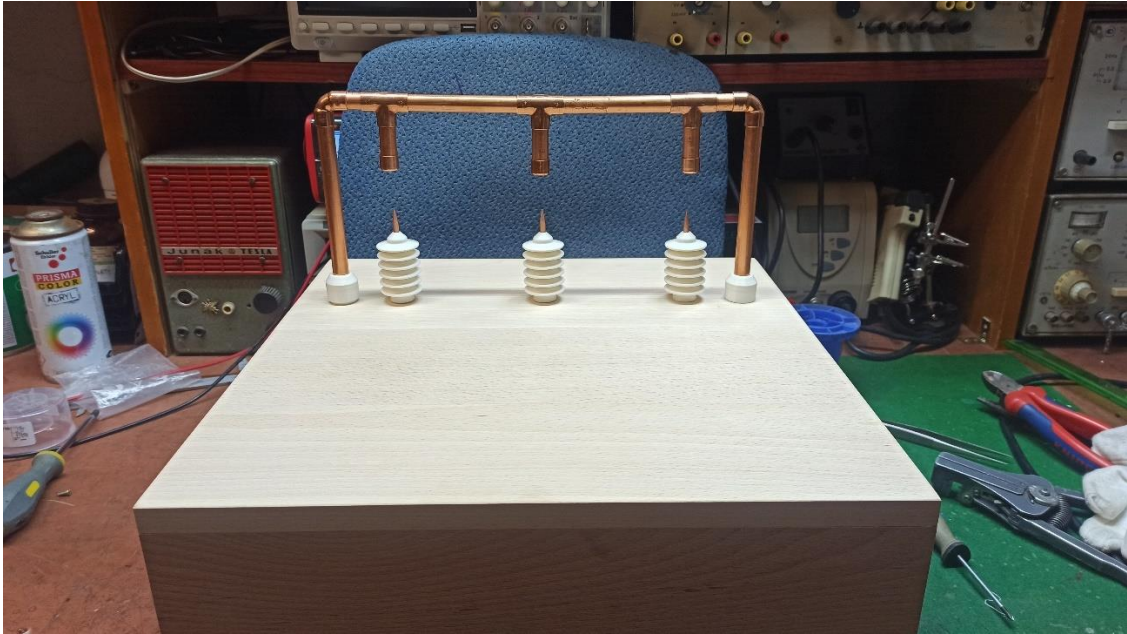


Obrázek 22 - Výrobní výkres držáku portálu

Držáky ventilátorů byly vyrobeny na 3D tiskárně a slouží k uchycení ventilátorů pro chlazení portálu. Jsou vsazeny pomocí kolen do spodní části držáků portálu a ke skříni jsou přichyceny úhelníky 30 mm × 30 mm × 15 mm pomocí vrtů 10 mm.



Obrázek 23 - Výrobní výkres držáku ventilátoru



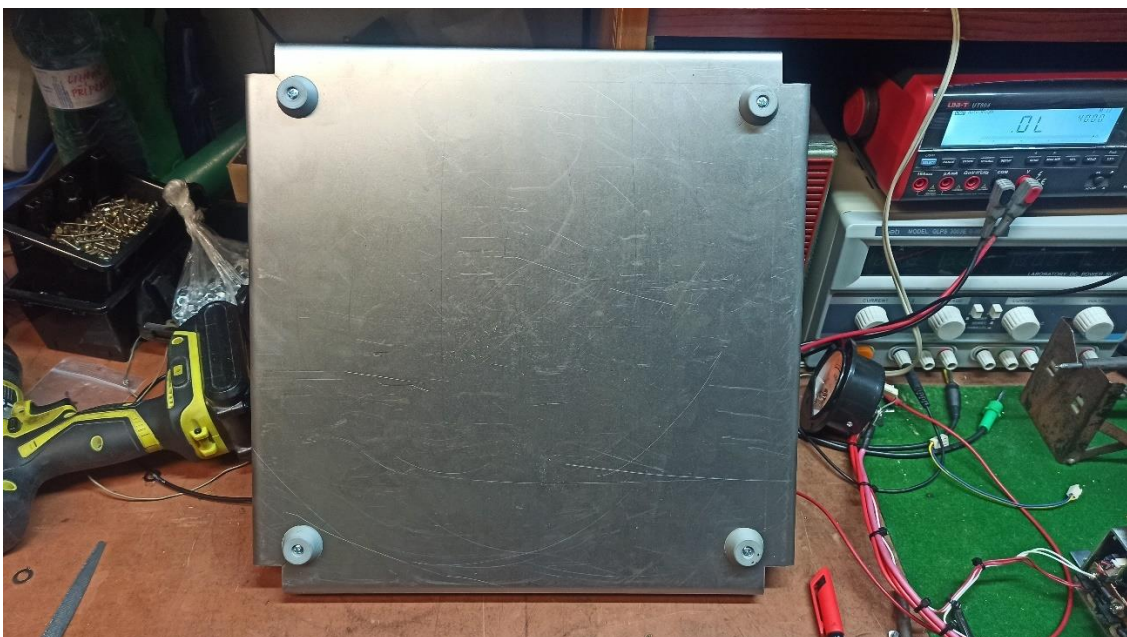
Obrázek 24 - Skříň s portálem a 3D výtisky

### 3.5.5 VÝROBA KOVOVÉHO CHASSIS

Chassis bylo vyrobeno z černého plechu o síle 1,5 mm nástřihem (viz **Příloha 15 – Výrobní výkres chassis**) a následným naohýbáním. Po vyvrtání upevňovacích otvorů a vyřezání závitů M6 na bocích bylo opatřeno nástřikem sprejem Galva Pro šedé matné barvy, chránící jej před korozi.

Před montáží všech dílů byly na chassis přišroubovány zesponu čtyři pryžové nožky šedé barvy.

Chassis je ve skříni upevněno čtveřicí nerezových šroubů M6 na bočních stranách.



Obrázek 25 - Chassis s pryžovými nožkami

### 3.5.6 PŘÍPRAVA VYSOKONAPĚŤOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Důležitým prvkem v tomto projektu jsou vysokonapěťové transformátory, které pracují jako zátěž pro koncový stupeň. Pro tento účel byly použity transformátory koncových stupňů řádkového rozkladu z barevných CRT televizorů. Transformační poměr po provedené úpravě je přibližně 1:2000.

Před započítáním úprav každého transformátoru je vhodné zkrátit VN vývod (vývod s „přísavkou“) na délku 70 mm. Dále odštíhat vývody pro focus a screen. (vývody na boku transformátoru vedle trimrů). S transformátorem se potom lépe manipuluje.

Krátce po prvních experimentech bylo zřejmé, že použití originálního primárního vinutí bude problematické. Koncové stupně v BTV používají pro napájení podstatně vyšší napětí, řádově stovky V a tomu je také přizpůsobeno zmíněné vinutí. Napájecí napětí koncového stupně v tomto projektu však bylo z důvodu bezpečnosti zvoleno 24 V.

Všechny cívky moderních VN transformátorů jsou umístěny na jedné straně feritového jádra, které je ve tvaru CC. Druhá strana bývá volná a lze na ní navinout novou cívku, která bude tvořit primární vinutí.

Jádro je většinou slepené, navíc s definovanou vzduchovou mezerou, takže případné vinutí nelze navinout na kostru a na jádro vložit, ale je třeba jej protahat postupně závit po závitu mezerou mezi jádrem a plastovou armaturou původních vinutí. Vzhledem k malému počtu závitů to však není velký problém, navíc se při experimentech ukázalo, že na vinutí lze použít vodič CYA o průřezu lanka 1,5 mm<sup>2</sup>. Je však vhodné volit typ se silikonovou izolací a měkkým slaněním, který se lépe provléká a rovná. Jako optimální se metodou pokus-omyl ukázalo navinutí 6ti závitů. Větší počet snižoval transformační poměr a dosažitelné napětí nebylo dostatečné, nižší počet zase zbytečně zvyšoval proud koncového stupně.



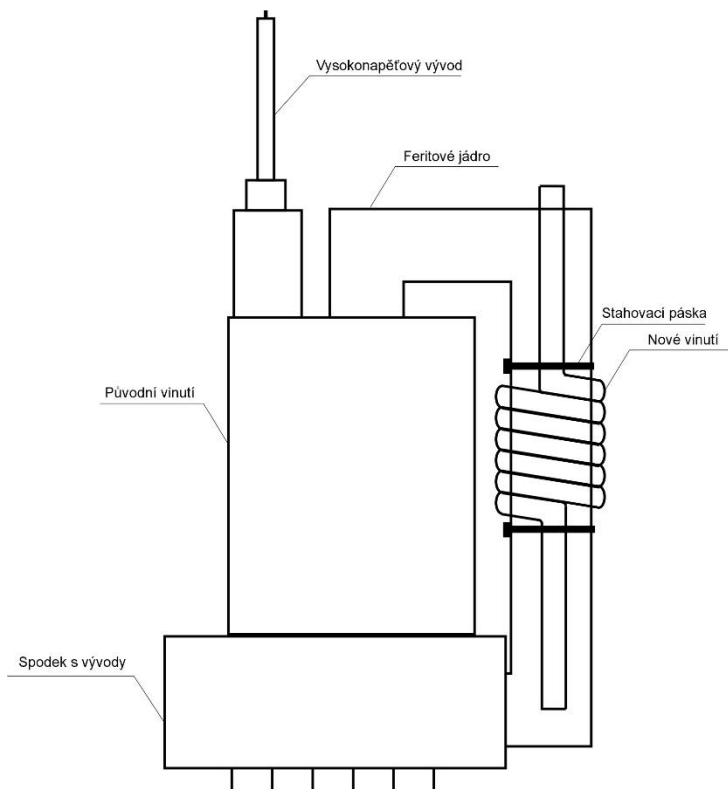
Po navinutí byly ponechány na obou stranách vývody v délce 150 mm, které byly bezprostředně u kraje vinutí ohnuty k jádru a zafixovány stahovací páskou 2 mm × 100 mm. Takto řešené vinutí je stabilní a nevyžaduje žádnou další úpravu. Na smyslu vinutí při výrobě nezáleží, ale při ožívování hraje důležitou roli pólování, viz kapitola **Ožívování**, kde je rovněž popsána metoda vyhledání záporného vývodu VN vinutí. Ostatní vývody na spodní straně transformátoru lze odstříhnout. Je třeba se vyvarovat případného propojení těchto vývodů, neboť by se tím vytvořil zkrat, který by zcela znemožnil funkci transformátoru.

Vývody je vhodné při ožívování označit např. návleky označenými + a D (Drain), což následně usnadní finální oživení. Po těchto úpravách bylo přistoupeno k zalití do připravené krabičky zakoupené na TME.cz a nesoucí označení G10010040B. Má rozměry 100 mm × 100 mm × 40 mm a je vyrobena z černého plastu s označením ABS UL94-HB, black. Do dna byly vyvrtány otvory 3,2 mm pro připevnění na chassis, otvor 3,2 mm pro šroub s pájecím očkem pro záporný vývod a otvory 3,2 mm pro připevnění DPS s ochrannými obvody a doladovacím kondenzátorem. Před zalitím bylo ještě nutno vložit matice M3 s naletovanými křídélky proti protočení, za které jsou krabičky přišroubovány ke spodním dílu přípravku (viz **Příloha 16 – Výrobní výkres přípravku na zalévání**), který zajistí, že budou VN vývody v jedné řadě a se zvoleným rozestupem, v tomto případě 110 mm. Poté byly vloženy VN transformátory tak, aby se nikde ničeho nedotýkaly a aby byly jejich VN vývody přibližně uprostřed krabiček. Nasazením a připevněním horní části přípravku byly definitivně vycentrovány vývody a transformátory dorovnány do požadované pozice. Pro zalití byla použita dvousložková zalévací hmota PU515 s tvrdidlem PH27.

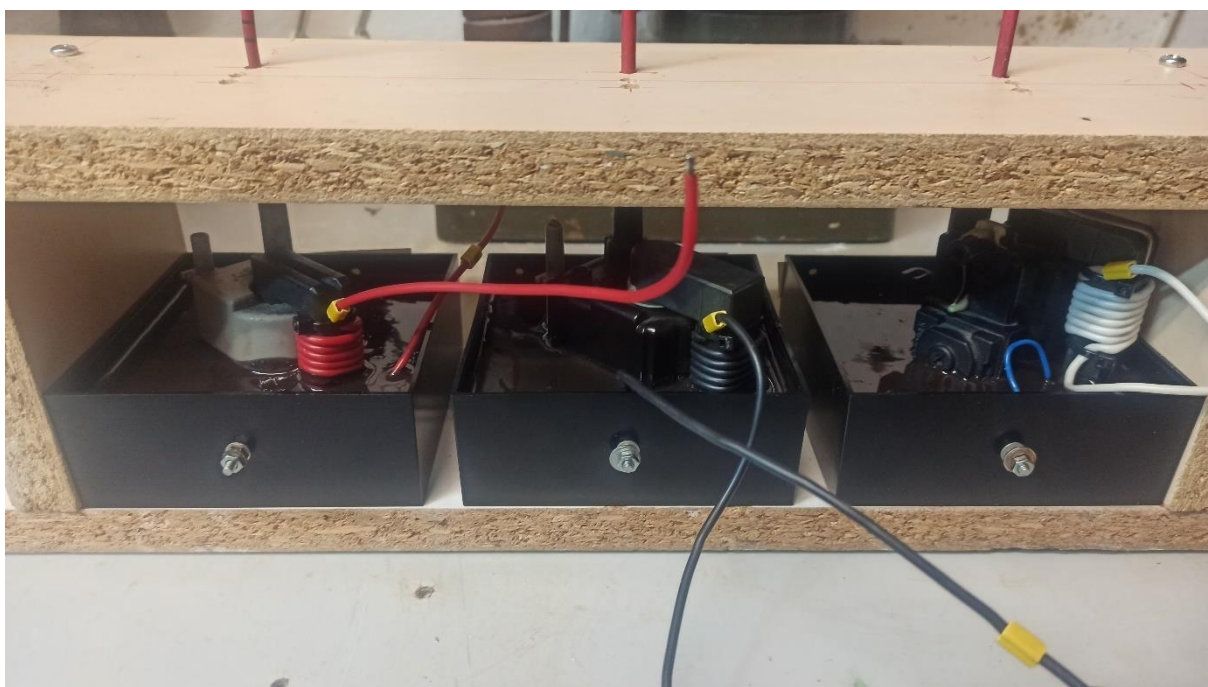
Transformátory použité v tomto projektu jsou inkurantní kusy pocházející z vyřazených BTV CRT. Protože se nepodařilo sehnat tři totožné typy, bylo nutno, vzhledem k nutnosti odlišných kmitočtů, použít tři zdroje nosné frekvence. Dá se však předpokládat, že v případě transformátorů stejného typu a pečlivého navinutí zcela totožných primárních cívek, by bylo možno použít pouze jeden generátor.

Transformátory se dají doposud běžně koupit např. zde: <http://www.avelektronik.cz/vn-trafa>.

Při výběru je třeba se zaměřit na to, aby byla dostatečná mezera mezi jádrem a armaturou původních vinutí pro protažení použitého vodiče, tedy alespoň 2 mm. Naprosto nevhodné jsou 2cívkové typy, které mají obsazené obě poloviny jádra (obvykle typy z ČS BTV nesoucí označení PN, nebo PK) a dále typy, které nemají jádro dobře přístupné.



Obrázek 26 - Výkres upraveného VN transformátoru



Obrázek 27 - Upravené VN transformátory v zalévacím přípravku

### 3.5.7 VÝROBA DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ

Pro výrobu plošných spojů metodou fotocesty bylo použito jednostranně plátovaných desek na sklolaminátovém podkladu o síle 1,5 mm s tloušťkou mědi 35  $\mu\text{m}$ . Předlohy byly vytištěny na průklepový papír běžnou laserovou tiskárnou s parametry nastavenými na nejvyšší možnou kvalitu tisku, případně vyretušovány lihovým fixem černé barvy. Použitý byl negativní fotorezist naformátovaný na potřebnou velikost. Osvit proveden 125W rtuťovou výbojkou.

Pro tento projekt bylo vyrobeno celkem 9 ks desek s plošnými spoji:

Deska ochran – 3 ks, základní deska – 1 ks, deska horní panel – 1 ks, deska zadní panel – 1 ks, deska regulátoru ventilátoru – 1 ks, deska ovládání žárovek – 1 ks a deska převodníku metalika-optika – 1 ks.

#### **Postup při výrobě byl následovný:**

Deska cuprexit byla nejprve naformátována na velikost o 10 mm větší na každé straně, než bude výsledný formát. Následně byly ošetřeny hrany od otřepů. Po základním vyčistění poměděné plochy velmi jemným abrazivem byla deska odmaštěna vycíděním vídeňským vápnem a následně řádně oboustranně opláchnuta proudem vody. Takto ošetřená deska byla vložena do fotografické misky naplněné vodou poměděnou stranou nahoru.

Za snížených světelných podmínek byl nastřížen fotorezist a poté byly do jednoho jeho rohu nalepeny malé kousky izolační pásky proti sobě. Fotorezist byl ponořen do misky s vodou a připravenou deskou a protitahem za kousky izolační pásky opatrně zbaven jedné krycí fólie, přičemž bylo dbáno, aby byla odkrytá aktivní vrstva neustále pod vodou a ohybem se vzájemně neslepila. Poté se aktivní vrstvou přiložila na desku, vycentrovala a opatrně vytáhla i s deskou na pracovní stůl. Následně byla za pomoci gumové stěrky a houbičky na nádobí vytlačena voda z prostoru mezi deskou a fólií. Po tomto procesu se ořízl přečnávající fotorezist podél desky.

Deska s takto naneseným fotorezistem se vložila do předehřáté upravené laminovačky tak, že mezi fotorezist a přítlačný válec se ještě vložila papírová čtvrtka, která zabránila jednak přehřátí a také nalepení a navinutí fotorezistu na válec. Deska byla vložena tak, aby vstupovala do laminovačky na délku.

Po ukončení laminace se deska nechala vychladnout a poté byla vložena do přítlačného rámu osvitové jednotky citlivou vrstvou nahoru. Na ni byla umístěna předloha vytištěná tak, aby ji bylo možné přiložit tištěnou stranou na desku, tedy aby výsledný obraz odpovídal realitě. To je důležité z hlediska co nejlepšího vykreslení detailu.

Po uzavření rámu byla deska vystavena osmisekundové expozici ultrafialovým světlem ve spektru A, B i C. Po expozici byla zbavena i druhé fólie jejím stržením a vystavena působení 5% roztoku  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . K urychlení procesu vyvolávání byla kresba omývána jemným kosmetickým štětečkem. Po odplavení neexponované vrstvy se deska opláchlá tekoucí vodou a vložila do roztoku  $\text{FeCl}_3$  k odleptání.

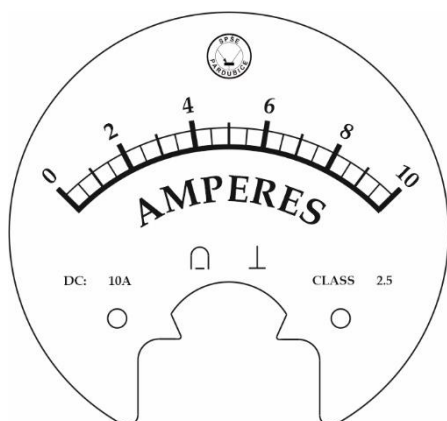
Po dokonalém odleptání byla deska opět opláchnuta pod tekoucí vodou a po kontrole vložena do roztoku NaOH, kde došlo k odplavení exponovaného fotorezistu. Po dalším oplachu ve vodě a osušení, byl hotový plošný spoj zařízen na požadovaný formát a zabroušen na hranách.

Po oschnutí následovalo vrtání otvorů pro součástky. Otvory pro standardní součástky byly vrtány spirálovým vrtákem 0,6 mm, pro silnější vývody 0,8 mm, pro svorkovnice a konektory 1 mm a dále otvory pro montáž obvykle 3,2 mm. Další otvory dle požadavku. Vrtání malými vrtáky probíhalo při 15000 ot./min, pro větší vrtáky byly použity doporučené otáčky.

### 3.5.8 ÚPRAVA RUČKOVÉHO PŘÍSTROJE

Volba ručkového přístroje byla rovněž podřízena snaze o zachování zvoleného stylu. Byl zakoupen jednoduchý 10A ampérmetr s magnetoelektrickým (depréžským) systémem, se zabudovaným bočником, který svým tvarem připomíná starší dobové přístroje.

Rozhodnutí mít generátor tonů podsvícený si vyžádalo přistoupit k jeho úpravě. Bylo nutno vyměnit původní hliníkovou stupnici za průsvitnou, změnit font písma a umístit do přístroje podsvitové žárovky. Snahou bylo docílit nažloutlého podsvícení podobného starším přístrojům a nevyhýbat se ani drobným nedokonalostem ilustrujícím zdánlivý věk. Nejprve bylo třeba vytvořit v grafickém programu novou stupnici s fontem používaným na starých zařízeních. Místo strohého A byl zvolen celý nápis „Amperes“ pod stupnicí a byly zachovány identifikační znaky přístroje, tedy značka depréžského systému a třída přesnosti. Nad rámeček bylo potom v horní části vytvořeno logo SPŠE Pardubice. Tato stupnice byla následně vytištěna na průklepový papír.



Obrázek 28 - Nová stupnice ampérmetru

Z displeje starého LCD televizoru byla získána rozptylová fólie, která při podsvícení rozprostře světlo do šířky. Vzhledem k potřebě rozptýlit světlo do dvou dimenzí, byly použity dvě vrstvy této fólie vzájemně pootočené o 90°. Použití dvou vrstev zároveň přineslo výhodu ve větší pevnosti výsledné sestavy. Všechny vrstvy, tedy stupnice a dvě fólie, byly slepeny pomocí oboustranné lepicí pásky k sobě a ze vzniklé sestavy byl vystřížen tvar stupnice. Ten byl nakonec přišroubován na původní místo.

Dál bylo nutno vyřešit podsvícení. Požadavkem byla již zmíněná nažloutlá barva, a proto byly i zde zvoleny žárovky na napětí 12 V s proudem 50 mA. Jedná se o miniaturní typ o průměru 3,2 mm s drátovými vývody. V měřiči jsou použity dva kusy spojené paralelně. Přívod napětí k žárovkám byl vyřešen použitím 2pinového konektoru typu NS25 vlepeného do pouzdra přístroje v zadní části nad vývody. Výsledkem bylo velmi důvěryhodné nažloutlé podsvícení stupnice s drobnými chybami, které dokreslují vzhled do stylu.



Obrázek 29 - Upravený ampérmetr

### 3.6 OŽIVOVÁNÍ

Oživování bylo prováděno v několika etapách. Je nutno předeslat, že jednotlivé funkční bloky a jejich vzájemná spolupráce byly v období vývoje nejprve pokusně realizovány na nepájivém poli, kde byla ověřena jejich funkčnost a vlastnosti. V této fázi bylo také nutno vyhledat záporný vývod VN transformátoru. Vzhledem k neměřitelnosti odporu klasickým multimetrem je nejsnadnější cestou snížit napětí pro koncový stupeň asi na 7 V, vybudit jej nosnou frekvencí a přibližováním VN vývodu k jednotlivým pinům najít ten, kde výboj nasadí nejsnáze. Při tomto konání je nezbytná opatrnost, protože zde již pracujeme s napětím řádu kV. Na tento pin byl přiletován vývod, který bude později připájen na letovací očko umístěné v zadní části zalévací krabičky.

Při oživování byl použit laboratorní zdroj s proudovým omezením, aby se minimalizovaly škody v případě jakékoli závady.

Vzhledem k tomu, že při návrhu DPS byl použit program Kicad, který umožňuje kontrolu při manuálním routování se dalo předpokládat, že kontrola DPS se omezí výlučně na technologické chyby při jejich výrobě, např. můstky, či vlasová přerušení, nikoli na chyby routingu, což se potvrdilo.

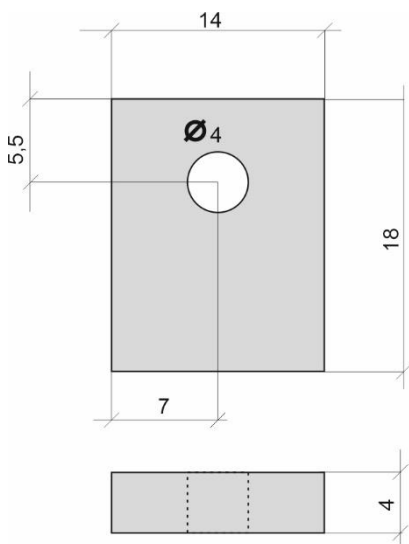
Při oživování se osvědčila postupná metoda, která spočívá v realizaci uceleného funkčního bloku a jeho oživení, případně nastavení parametrů. Logicky z toho vyplývá, že nejprve byly osazeny napájecí konektory a generátory s tvarovači, protože využívají vždy dva komparátory v jednom pouzdře.

Následovaly blokové kondenzátory na přívozech napájení IO spolu se všemi ostatními součástkami tohoto bloku v jednom kanále. Aplikované zapojení je osvědčené z předchozích experimentů s PWM regulátory, a tak se dalo očekávat, že s jeho uvedením do provozu nebudou problémy.

Po experimentování s hodnotami rezistorů v obvodu integračního článku a v děliči komparátoru se podařilo docílit jak požadovaného kmitočtového rozsahu, tak i rozsahu regulace proporce signálu. Vzhledem k použití dvoukanalového osciloskopu, kde bylo možno sledovat kmitočet, průběh i amplitudu generátoru a výstup z komparátoru, bylo nastavení poměrně snadné. Po oživení prvního generátoru byly osazeny zbývající dva, které již nebylo třeba nastavovat, protože jejich parametry byly shodné.

Následně byl osazen modulátor a budič. Jedná se o velmi jednoduché zapojení, které pracovalo okamžitě po spuštění a nevyžadovalo žádné nastavování. Osciloskopem byl zkontrolován průběh signálu na výstupu budiče a zkontrolován modulátor přivedením úrovně H (+5 V) na jeho bázi přes příslušný rezistor. To má za důsledek uvedení výstupu budiče do stavu L. Po této kontrole byly osazeny a zkontrolovány zbývající dva obvody.

Dále byly na DPS osazeny unipolární tranzistory a zároveň desky ochran, které jsou umístěny v blízkosti VN transformátorů. Ty jsou navrženy tak, aby umožňovaly experimentálně připojit kondenzátory různých velikostí, což usnadňuje doladování primárních cívek do rezonance. V této etapě již byly VN transformátory zalité v konstrukčních krabičkách, takže jejich připojení k deskám ochran nečinilo problém. Pod výkonové tranzistory byly na 3D tiskárně vyrobeny speciální podložky pro precizní přitažení ke chladiči.



Obrázek 30 - Výrobní výkres podložky tranzistoru

**Pozor!!! Při následně popsaných procedurách je třeba dodržovat bezpečnou vzdálenost od jiskřiště. Vysoké napětí o takto vysokých použitých kmitočtech sice nedosahuje proudu ohrožujícího život, ale vzhledem k tomu, že má snahu se šířit v lidském těle cestou nejmenšího odporu, kterou jsou nervová vlákna, může dojít k jejich poškození. Při delší expozici hrozí i popálení.**

Oživování probíhalo postupně od 1. kanálu. Před připojením napájecích napětí byl vytvořen přípravek, kde byl dočasně připojen spínač mezi rezistor v bázi modulátoru a +5 V.

Zdroj pro koncový stupeň byl nastaven na 7 V a proudová pojistka na 0,5 A. Nad VN vývodem transformátoru bylo vytvořeno provizorní jiskřiště s možností změny vzdálenosti pólů. Výchozí vzdálenost byla 5 mm, proporce byla nastavena na 40 %. Generátory byly připojeny na 12 V a poté byl zapnut zdroj. Po rozpojení dočasněho spínače došlo k vybuzení koncového stupně a k výboji mezi elektrodami.

Elektrody od sebe byly vzdalovány až do zániku oblouku. Poté byly prohozeny vývody od primárního vinutí a postup se opakoval. Tímto procesem se zjišťuje, zda je vinutí připojeno správně, či nikoli. Polarita má významný vliv na kvalitu a délku výboje. Při nesprávné polaritě nasazuje výboj neochotně, je hlučný a podstatně kratší.

Po zjištění správné polariry spočívalo další oživování už jen ve vyhledávání vhodného nosného kmitočtu, doladění primárního vinutí do rezonance paralelním kondenzátorem a ve vzdalování elektrod s cílem dosáhnout co největší distance a „měkkého“ nehlučného oblouku. Následovalo postupné zvyšování napájecího napětí koncového stupně a vyhledávání vhodné proporce nosného kmitočtu. Stejný postup se opakoval u ostatních kanálů. Precizním nastavením se dá dosáhnout až 50mm vzdálenosti, což odpovídá ionizačnímu napětí přibližně 50 kV. Při takto naladěném koncovém stupni se jeho odběr pohybuje kolem 3,3 A při napětí 24 V. Po ukončení tohoto nastavování byl odstraněn dočasný spínač v obvodu modulátoru.

Následně byly připojeny obvody signalizace.

Jako další byly oživeny vstupní a výstupní bloky. Do vstupu MIDI byl přiveden signál a jeho tvar a úroveň byly kontrolovány osciloskopem na vstupu a následně na výstupu optočlenu. Po přepnutí spínače O/M bylo totéž provedeno s použitím optického kabelu s tím, že MIDI signál byl nejprve převeden v optopřevodníku.

Výstup optočlenu je přiveden na šestici Schmittových obvodů, z jejichž výstupů je postupně veden signál do mikroprocesoru, signalizačního obvodu, budiče optopřevodníku a na metalický výstup. Měřením signálu a kontrolou jeho kvality na všech šesti výstupech bylo ověřeno, že obvody pracují dle předpokladů. Známkou správné činnosti byla v tuto chvíli i LED detekující přítomnost signálu.

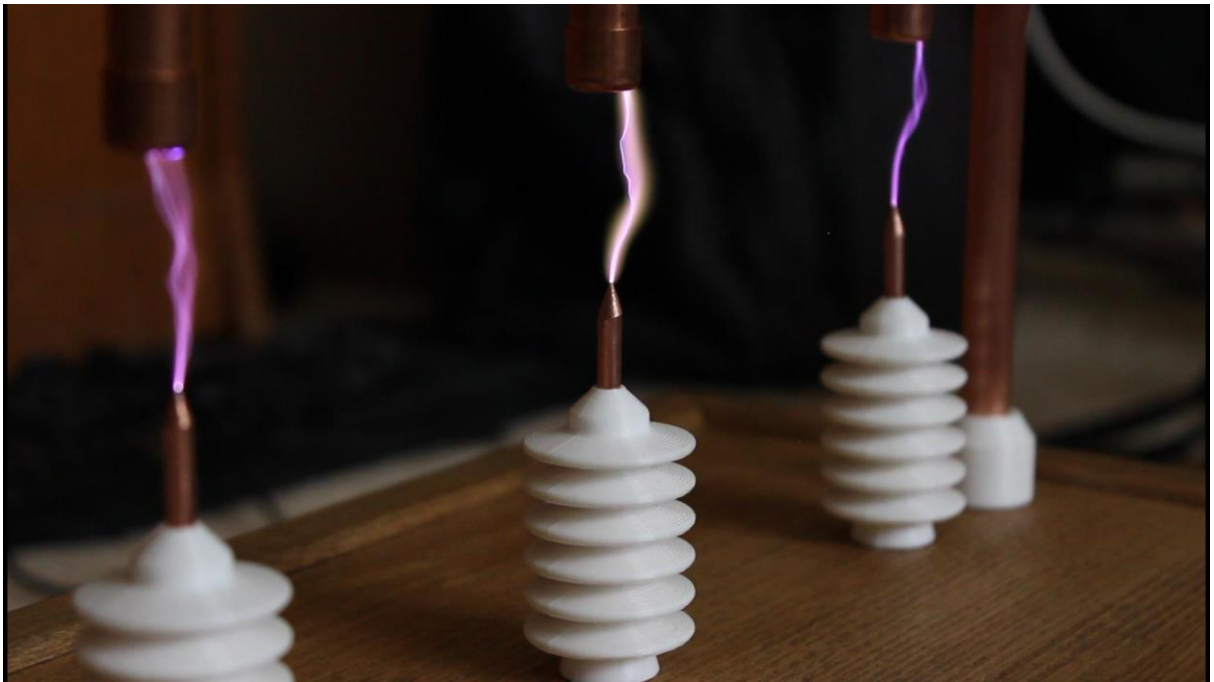
Jako poslední byla oživena řídicí jednotka. Její uvedení do provozu v podstatě spočívalo v osazení naprogramovaným procesorem a přivedením signálu MIDI na vstup.

Při prvních provozních zkouškách bylo zjištěno výrazné zahřívání portálu nad jiskřištěm, které bylo třeba vyřešit, protože by mohlo dojít k poškození ochranného laku a úchytů nadměrným teplem. Chlazení bylo vyřešeno instalací dvojice ventilátorů na konce portálu, jak je popsáno výše v kapitole **Výroba měděného portálu a hrotů**.





Obrázek 31 - Kompletně sestavené zařízení



Obrázek 32 - Výrobek v provozu

### 3.7 ROZPISKA ELEKTRO SOUČÁSTEK

Pol.	Název	Označení	Typ	Ks	Hodnota, poznámka
1	Kondenzátor	C1, C3, C4, C5, C6, C7, C10, C13, C16, C19	Keramický	10	100 nF/50 V
2	Kondenzátor	C2	Elektrolytický	1	470 $\mu$ F/16 V
3	Kondenzátor	C8, C9	Keramický	2	22 pF/50 V
4	Kondenzátor	C11, C14, C17	Fóliový	3	2,2 nF/100 V
5	Kondenzátor	C12, C15, C18	Elektrolytický	3	1 $\mu$ F/50 V
6	Kondenzátor	C20, C23, C26	Elektrolytický	3	2200 $\mu$ F/50 V
7	Kondenzátor	C21, C24, C27	Fóliový	3	100 nF/275 V
8	Kondenzátor	C22, C25, C28	Fóliový	3	330 nF/275 V
9	Usměrňovací dioda	D1, D3	1N4148	2	75 V/150 mA
10	LED	D2	L-934SEC	1	oranžová, 3 mm
11	LED	D4	L-53SRC-J4	1	červená, 5 mm
12	LED	D5	L-7113QBC-D	1	modrá, 5 mm
13	Schottkyho dioda	D6, D7, D8	MBR10200F	3	200 V/10 A
14	Žárovka	LA1, LA2, LA3, LA4	K528E	4	12 V/50 mA, 3 mm
15	Ventilátor	M1, M2	GM1203PFV2-8.GN	2	12 V
16	Ventilátor	M3	EE50101S1-1000U- 999	1	12 V
17	Bipolární tranzistor	Q1, Q9, Q13, Q17, Q22	BC640	5	80 V/1 A, PNP
18	Bipolární tranzistor	Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q10, Q14, Q18, Q19, Q20, Q21	BC639	11	80 V/1 A, NPN
19	Unipolární tranzistor	Q7, Q11, Q15	IRFP250N	3	200 V/30 A, N MOSFET
20	Bipolární tranzistor	Q8, Q12, Q16	BC547	3	45 V/100 mA, NPN
21	Darlingtonův tranzistor	Q23	2SC3987	1	50 V/3 A, NPN
22	Rezistor	R1, R5, R59, R60	MBB0207	4	220 $\Omega$ /0,6 W
23	Rezistor	R2, R64	MBB0207	2	5,6 k $\Omega$ /0,6 W

24	Rezistor	R3, R22, R35, R48, R54, R56, R57, R58, R61	MBB0207	9	10 k $\Omega$ /0,6 W
25	Rezistor	R4	MBB0207	1	100 $\Omega$ /0,6 W
26	Rezistor	R6, R7, R8, R9, R10, R11, R12, R13, R27, R40, R53, R63	MBB0207	12	6,8 k $\Omega$ /0,6 W
27	Rezistor	R14, R21, R25, R34, R38, R47, R51, R55	MBB0207	8	1 k $\Omega$ /0,6 W
28	Rezistor	R15, R16, R18, R24, R28, R29, R31, R37, R41, R42, R44, R50	MBB0207	12	2,2 k $\Omega$ /0,6 W
29	Rezistor	R17, R30, R43	MBB0207	3	120 k $\Omega$ /0,6 W
30	Rezistor	R19, R32, R45	MBB0207	3	68 k $\Omega$ /0,6 W
31	Rezistor	R20, R33, R46, R66, R67, R68	MBB0207	6	100 k $\Omega$ /0,6 W
32	Rezistor	R23, R36, R49	MBB0207	3	10 $\Omega$ /0,6 W
33	Rezistor	R26, R39, R52	MBB0207	3	82 k $\Omega$ /0,6 W
34	Rezistor	R62	MBB0207	1	560 $\Omega$ /0,6 W
35	Rezistor	R65	MBB0207	1	33 $\Omega$ /0,6 W
36	Odporový trimr	RV1, RV3, RV5	T93YA	3	50 k $\Omega$ /0,5 W
37	Odporový trimr	RV2, RV4, RV6	T93YA	3	4,7 k $\Omega$ /0,5 W
38	Odporový trimr	RV7	T93YA	1	22 k $\Omega$ /0,5 W
39	Kódový přepínač	SW1	A6R-161RS	1	25 mA/24 V DC, HEX
40	Páčkový přepínač	SW2, SW3	TSM102F1	2	3 A/250 V AC, SPDT
41	Páčkový přepínač	SW4	TSP101AAA1	1	15 A/250 V AC, SPST
42	VN Transformátor	T1, T2, T3		3	
43	Termistor	TH1	NTC	1	100k@25°C, TO-126
44	Optopřevodník	U1, U9	6N138	2	DIP-8
45	6× invert. Schmittův KO	U2	74HC14	1	DIP-14

46	Mikroprocesor	U3	ATmega328P-P	1	DIP-28
47	Komparátor	U4, U5, U6	LM393	3	DIP-8
48	Optopřevodník	U7	HFBR-2412T	1	820 nm
49	Optopřevodník	U8, U10	HFBR-1414T	2	820 nm
50	Krystal	Y1	HC49-S	1	16 MHz
51	Svorkovnice do DPS	J1	AKZ120/2DS-V	2	2pól, rozteč 5,08 mm
52	Svorkovnice do DPS	J5, J6, J7	AKZ120/3DS-H	3	3pól, rozteč 5,08 mm
53	Konektor do DPS	J26, J29	STLZ950/3G-V	2	3pól, rozteč 5,08 mm
54	Konektor do DPS	J32	STLZ950/3G-H	1	3pól, rozteč 5,08 mm
55	Svorkovnice		AKZ950/3	3	3pól, rozteč 5,08 mm
56	Nýt	J25, J27, J28, J30, J31, J33	mosazný, dutý	6	3 mm × 3 mm
57	Konektor do DPS	J9, J17, J23, J35, J34, J37	NS25-W2P	7	2pól, rozteč 2,54 mm
58	Konektor do DPS	J2, J16	NS25-W3P	2	3pól, rozteč 2,54 mm
59	Konektor do DPS	J8, J18	NS25-W5P	2	5pól, rozteč 2,54 mm
60	Konektor do DPS	J4, J15, J19	NS25-W6P	3	6pól, rozteč 2,54 mm
61	Konektor do DPS	J3, J22	NS25-W8P	2	8pól, rozteč 2,54 mm
62	Zástrčka		NS25-G2	6	2pól, rozteč 2,54 mm
63	Zástrčka		NS25-G3	2	3pól, rozteč 2,54 mm
64	Zástrčka		NS25-G5	2	5pól, rozteč 2,54 mm
65	Zástrčka		NS25-G6	3	6pól, rozteč 2,54 mm
66	Zástrčka		NS25-G8	2	8pól, rozteč 2,54 mm
67	Kontakt		NS25-T	62	pocínovaný
68	Konektor	J39, J40	ZZS525-OM	2	4pól, rozteč 5,08 mm
69	Zástrčka		ZZS525-OZ	2	4pól, rozteč 5,08 mm
70	Kontakt		ZZS525-TM	5	pocínovaný
71	Kontakt		ZZS525-TZ	5	pocínovaný
72	Konektor do DPS	J20, J21, J24	DC-205	3	DIN5
73	Konektor	J41	PX0580/63	1	10 A/ 250 V AC
74	Vodič		CY 16	3	60 mm
75	Pružina		vinutá, tlačná	3	
76	Nýt		mosazný, dutý	3	2 mm × 2 mm
77	Pájecí očko		mosazné	3	3 mm
78	Kabel		stíněný	1	8žilový, 0,5 m
79	Vodič		CYA 0,25	2	0,3 m
80	Vodič		CYA 0,25	3	0,25 m
81	Kabel		stíněný	1	5žilový, 0,25 m
82	Vodič		CYA 0,25	2	0,25 m

83	Kabel		plochý	1	6žilový, 0,25 m
84	Kabel		Twist 0,15	5	2žilový, 0,25 m
85	Vodič		CYA 0,25	4	0,75 m
86	Vodič		CYA 1,5	1	0,75 m
87	Vodič		CYA 2,5	9	0,25 m
88	Vodič		CYA 4	2	0,75 m
89	Vodič		CYA 1	2	0,45 m
90	Pojistkové pouzdro	F1	01500274LXN	1	
91	Pojistka	F1	trubičková	1	4 A
92	Izolační podložka			3	TO-247
93	Napájecí kabel		Flexo EURO	1	1 m
94	Optický kabel		Simplexkabel G50/125 LSOH	1	Oranžový, 3 m
95	Převodník USB-MIDI			1	USB 2 m, 2× MIDI 2 m
96	Napájecí adaptér			1	5 V/1 A

### 3.8 ROZPISKA MECHANICKÝCH DÍLŮ

Pol.	Název součástky	Materiál	Rozměr	Kusů	Poznámka
1	Dřevěný masiv	Buk	350 × 117 × 15 mm	3	
2	Dřevěný masiv	Buk	350 × 130 × 15 mm	2	
3	Dřevěný masiv	Buk	320 × 130 × 15 mm	2	
4	Dřevěný hranol	Borovice	20 × 20 × 350 mm	2	
5	Dřevěný hranol	Borovice	20 × 20 × 320 mm	2	
6	Dřevěný hranol	Borovice	20 × 20 × 110 mm	4	
7	Dřevěný úhelník	Borovice	20 × 20 × 400 mm	4	
8	Dřevěná lišta	Borovice	20 × 340 mm	1	
9	Plech	Nerez	1 × 680 × 200 mm	1	Rybičkový
10	Dveřní zarážka	Pryž	25 × 15 mm	4	
11	Plech	Ocel	1 × 500 × 500 mm	1	Černý
12	Barva Galva Pro			1	Šedá, matná
13	Lepidlo Mamut			1	
14	Lak Dupli Color-Prima			1	
15	Šroub	Nerez	M6 × 20 mm	4	Křížová drážka
16	Šroub samořezný	Ocel	10 × 3,5 mm	16	Křížová drážka, černěný
17	Madlo Cascia a šrouby	Ocel		2	
18	Vrut	Kadmiovaná ocel	30 × 3,5 mm	30	Křížová drážka
19	Plech	Měď	1 × 400 × 200 mm	1	
20	Cuprexit		1,5 × 250 × 250 mm	1	35 μm
21	Negativní fotorezist		250 × 400 mm	1	
22	Čisticí prostředek AVA		550 g	1	
23	Odmašťovač	CaO/MgO	10 g	1	
24	Chlorid železitý	FeCl <sub>3</sub>	100 ml	1	
25	Uhličitan sodný	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	200 ml	1	
26	Voda	H <sub>2</sub> O	3000 ml	1	
27	Hydroxid sodný	NaOH	20 g	1	
28	Papír		A4	1	
29	Pauzovací papír		A4	2	
30	Vrut	Kadmiovaná ocel	8 × 2 mm	3	Křížová drážka
31	Trubka	Měď	1000 mm	1	Cu12
32	Koleno	Měď		4	Cu12, 90°/F/F
33	T kus	Měď		3	Cu12, 5130
34	Nátrubek	Měď		2	Cu12, 5270

35	Víčko	Měď		3	Cu12, 5301
36	Lepidlo Loctite 401			1	
37	Šroub samořezný	Ocel	10 × 3 mm	8	
38	Úhelník	Niklovaná ocel	20 × 20 × 10 mm	4	
39	Vrut	Kadmiovaná ocel	10 × 3,5 mm	2	Torx drážka
40	Šroub	Niklovaná ocel	M3 × 60 mm	2	Křížová drážka
41	Matice	Niklovaná ocel	M3 × 60 mm	2	
42	Sedlářský nýt	Niklovaná ocel	2 × 5 mm	3	
43	Vodič	Měď	1,5 mm <sup>2</sup> /1 m	1	
44	Zalévací krabička G10010040B	Plast ABS	100 × 100 × 40 mm	3	
45	Zalévací hmota PU515		600 g	1	
46	Tvrdidlo PH27		6,5 g	1	
47	Šroub	Niklovaná ocel	M3 × 15 mm	15	Křížová drážka
48	Matice	Niklovaná ocel	M3	15	
49	Chladič	Hliníková slitina	165 × 90 × 30 mm	1	H2 × 3
50	Šroub	Niklovaná ocel	M3 × 25 mm	20	
51	Matice	Niklovaná ocel	M3	20	
52	Distanční sloupek	Niklovaná mosaz	M3 × 10 mm	1	F/F
53	Distanční sloupek	Niklovaná mosaz	M4 × 10 mm	4	F/M
54	Samolep. úponky s páskou			10	
55	Pauzovací papír		A4	1	
56	Oboustranná páska		60 × 100 mm	1	
57	Polarizační fólie		100 × 100 mm	2	
58	Pouzdro na LED a žárovky	Chromovaná mosaz	SMZ1069	5	
59	Ovládací prvek kodéru	Plast	Nespecifický	1	
60	Křídlová matice M5	Niklovaná ocel	Nespecifický	2	
61	Podložka	Niklovaná ocel	5 mm	4	
62	Úhelník	Niklovaná ocel	30 × 30 mm	2	
63	Vrut	Kadmiovaná ocel	3 × 10 mm	8	Křížová drážka
64	Tiskový materiál	Plast PLA	209 g	1	

### 3.9 NÁVOD K POUŽITÍ

- Po sejmutí horního víka přepravního kufru odšroubujeme čtyři křídlové matice z aretačních lišt, které poté odstraníme.
- Příklad vyjmeme z přepravního kufru tak, aby nedošlo k poškození optických konektorů na zadním panelu a přemístíme na místo, kde jej hodláme provozovat.
- Z přepravního kufru vyjmeme složený měděný portál a vsadíme jej do příslušných otvorů v horní části přístroje tak, aby byly jeho pólové nástavce nad hroty jiskříšť.
- Zvolíme si způsob připojení ke zdroji MIDI signálu.
- Pro komunikaci optickou cestou zvolíme optický patchcord a jeden jeho konektor propojíme s konektorem na zadním panelu označeným „Inputs“.
- Druhý konec připojíme do převodníku metalika-optika.
- Převodník metalika-optika následně propojíme s převodníkem USB-MIDI pro připojení k PC, nebo k nástroji vybaveným výstupem MIDI formou USB. Případně převodník USB-MIDI vynecháme a připojíme zdroj přímo konektorem DIN5 na převodník metalika-optika.
- Pro komunikaci metalickou cestou vynecháme celý optický řetězec a propojíme přístroje buď pomocí převodníku USB-MIDI, nebo přímo konektorem DIN5.
- Na ovládacím panelu je nutné přepínačem „O/M“ specifikovat způsob přenosu dat a to tak, že pro optický přenos musí být v poloze „O“, pro metalický v poloze „M“.
- Připojíme přístroj, popř. převodník k síti a zapneme. Svítí podsvícení měřicího přístroje a signalizační žárovka „Power“.
- Přepínačem na ovládacím panelu zvolíme MIDI kanál, po kterém má probíhat komunikace. Tento kanál musí být shodný s kanálem zdroje MIDI.
- Přepínačem „SC/MC“ na ovládacím panelu zvolíme druh provozu, tedy buď Single-Channel (vhodný pro nástroj), nebo Multi-Channel (vhodný pro PC).
- Tím je přístroj připraven k provozu.
- Kontrolka „Signal“ detekuje přítomnost MIDI signálu z jeho zdroje.
- Kontrolky Channel 1, Channel 2 a Channel 3 monitorují vybuzení jednotlivých kanálů.



## 4 ZÁVĚR

Maturitní projekt se podařilo realizovat dle požadavků, které jsem si stanovil při jeho volbě. V průběhu realizace jsem se potýkal s různými technickými problémy, obzvláště v souvislosti s generátorem nosného kmitočtu a s vysokonapěťovými transformátory. V prvním případě jsem musel zvolit jiné než původně zamýšlené zapojení s obvodem NE555. Druhý zmíněný problém byl způsoben odlišnými typy VN transformátorů, protože se jednalo o inkurantní kusy získané z vyřazených barevných televizorů CRT. Z tohoto důvodu nebylo možné sehnat tři shodné a jejich naladění muselo tedy být provedeno individuálně.

Další problém nastal v oblasti programování. V původní verzi softwaru se zvláště vyšší tóny jevily jako nepřesné, a to až v řádu vyšších desítek Hz. Tento nedostatek byl odstraněn kompletním přepsáním řídicího programu a použitím zcela odlišného principu generování modulačního signálu. Nová verze softwaru dovoluje dosáhnout přesnosti kmitočtu v řádu jednotek Hz.

V úvodu zmíněný požadavek na polyfonnost zařízení se podařilo realizovat použitím tří nezávislých kanálů, při čemž každý z nich je schopen generovat až dva tóny současně. Zařízení tedy umožňuje hrát v jednom okamžiku až šest tónů.

Tento maturitní projekt byl inspirací k jeho rozšíření o další netradiční formy tvorby zvuků. Jednou z nich může být dříve zmíněný Teslův transformátor, který by mohl celé sestavě dominovat. Další škálu zvuků lze tvořit vhodným ovládním disketových mechanik, kdy jejich krokové motory generují zvuk odpovídající řídicímu kmitočtu. Tento způsob je obzvláště vhodný pro tvorbu nižších frekvencí. Dále jsem uvažoval o konstrukci zařízení imitujícího bicí nástroje.

Postupným rozšiřováním bych chtěl dosáhnout toho, že celá sestava bude napodobovat základní části hudebního tělesa. Tedy sólovou, doprovodnou, basovou a rytmickou sekci.

## 5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Mgr. Magda Králová, *Druhy výbojů* [online]. 2016-7-20 [cit. 2023-3-22]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektricky-proud/elektricky-proud-v-plynech/druhy-vyboju>
- [2] Wikipedia, *Flyback transformer* [online]. Poslední aktualizace 2023-2-14 [cit. 2023-3-22]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Flyback\\_transformer](https://en.wikipedia.org/wiki/Flyback_transformer)
- [3] Fabricio H. Franzoli, *Easy-Flyback I* [online]. 2021-8-12 [cit. 2023-3-22]. Dostupné z: <https://franzolielectronics.com/easy-flyback-i/>
- [4] Dominique Vandenneucker, *MIDI tutorial for programmers* [online]. 2012-9-11 [cit. 2023-3-22]. Dostupné z: <https://www.cs.cmu.edu/~music/cmsip/readings/MIDI%20tutorial%20for%20programmers.html>
- [5] Joe Wolfe, *Note names, MIDI numbers and frequencies* [online]. 2011-12-18 [cit. 2023-3-22]. Dostupné z: <https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/notes.html>
- [6] RecordingBlogs.com, *MIDI Registered Parameter Number (RPN)* [online]. 2010-11-17 [cit. 2023-3-22]. Dostupné z: <https://www.recordingblogs.com/wiki/midi-registered-parameter-number-rpn>
- [7] RecordingBlogs.com, *Cent* [online]. 2016-1-6 [cit. 2023-3-22]. Dostupné z: <https://www.recordingblogs.com/wiki/cent>
- [8] Atmel Corporation, *ATmega328P* [online]. © 2015 [cit. 2023-3-22]. Dostupné z: [https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf)
- [9] Broadcom Inc., *AVAGO TECHNOLOGIES (HFBR-2412) LOW COST 5MBD ST FO RX* [online]. 2006-4-15 [cit. 2023-3-22]. Dostupné z: <https://datasheet.octopart.com/HFBR-2412-Avago-datasheet-7277186.pdf>

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

A	Ampér – základní jednotka pro elektrický proud
bit/s	jednotka přenosové rychlosti
BTB	barevný televizní přijímač
CRT	cathode ray tube – všeobecné označení pro vakuovou obrazovku
CYA	Označení izolovaného měděného vodiče se slaným jádrem
ČB TV	černobílý televizní přijímač
ČS BTB	československý barevný televizní přijímač
DC	direct current – označení pro stejnosměrný proud
DIN	Deutsches Institut für Normung – norma
DPS	deska plošných spojů
DWG	nativní formát souborů programu AutoCAD
GND	ground –zkratka pro zemní sběrnici
H	high – obecně označení pro log. 1 (vysoká úroveň)
Hz	Hertz – základní jednotka pro kmitočet
IGBT	insulated-gate bipolar transistor – tranzistor s izolovaným hradlem
IO	integrováný obvod
kHz	kilohertz – jednotka pro kmitočet
kg	kilogram – jednotka pro hmotnost
kV	kilovolt – jednotka pro napětí
L	low – obecné označení pro log. 0 – nízká úroveň.
LED	Light-Emitting Diode – označení pro elektroluminiscenční (svítivou) diodu
LCD	liquid crystal display – označení pro display s tekutými krystaly
mA	miliampér – jednotka pro elektrický proud
MIDI	Musical Instrument Digital Interface – digitální rozhraní hudebního nástroje
MHz	megahertz – jednotka pro kmitočet
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor – obecně unipolární tranzistor
mm	milimetr – jednotka pro vzdálenost

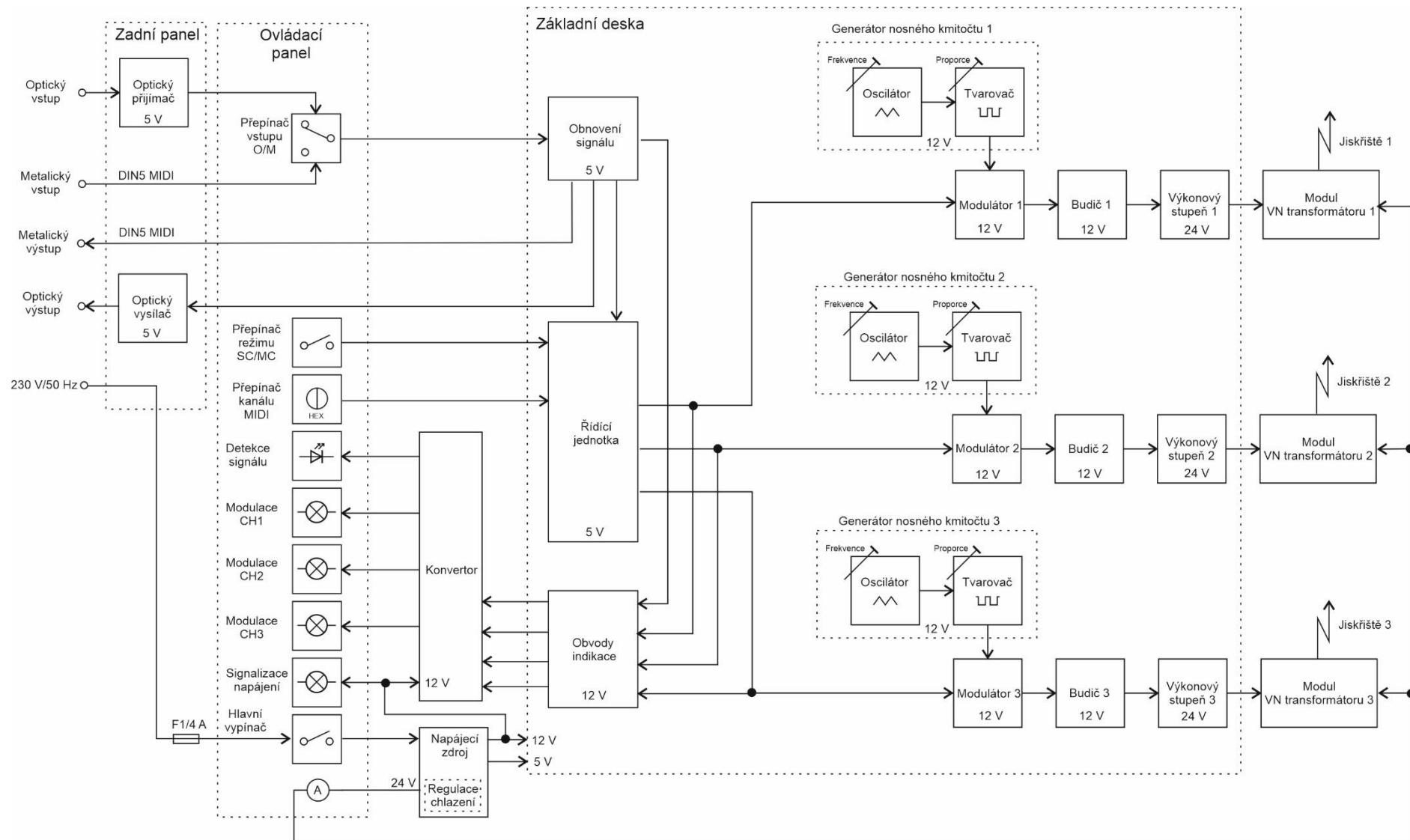
mm <sup>2</sup>	milimetr kvadratický – jednotka pro plochu
nm	nanometr – jednotka pro vzdálenost
O/M	zkratka – optika/metalika
PA	power amplifier – označení pro koncový zesilovač
PC	personal computer – označení pro osobní počítač
PH2	Philips – označení normy a velikosti bitů pro šrouby a vruty s křížovou drážkou
PWM	Pulse Width Modulation – pulzně šířková modulace
RCD	označení pro ochranný obvod složený z diody, rezistoru a kondenzátoru
RX	receive – obecné označení pro příjem signálu
SC/MC	Single-Channel/Multi-Channel
ST	označení konektoru pro optické kabely
TX	transmit – obecné označení pro vysílání signálu
TTL	transistor-transistor-logic – tranzistorově-tranzistorová logika
TV	obecné označení televizního přijímače
USB	Universal Serial Bus – univerzální seriová sběrnice
V	Volt – základní jednotka pro elektrické napětí
VF	vysokofrekvenční – specifikace součástky, či obvodu k jaké frekvenční oblasti je určen
VN	vysoké napětí (vysokonapěťový)
W	Watt – základní jednotka pro výkon
3D	three-dimensional – trojrozměrná technologie, či oblast
°C	stupeň Celsia – jedna ze základních jednotek pro teplotu
°	stupeň – obecné označení pro stupeň (obvykle úhlový, či teplotní)

## 7 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - VN transformátor z CRT televizoru .....	- 11 -
Obrázek 2 - Výstupní signál z generátoru trojúhelníkového průběhu a z komparátoru.....	- 12 -
Obrázek 3 - Princip tvorby digitálního signálu z analogového signálu.....	- 13 -
Obrázek 4 - Princip tvorby kmitočtu pomocí časovače ( $y_{\text{timer}}$ je aktuální hodnota časovače, $ocr_0$ je počáteční hodnota porovnávacího registru) .....	- 15 -
Obrázek 5 - Princip binárního sčítání dvou signálů .....	- 16 -
Obrázek 6 - Schéma zapojení regulace otáček ventilátoru.....	- 21 -
Obrázek 7 - Schéma zapojení vstupního/výstupního dílu .....	- 22 -
Obrázek 8 - Schéma zapojení generátoru nosného kmitočtu, modulátoru a budiče 1.....	- 24 -
Obrázek 9 - Změřený průběh signálu z generátoru (CH1) a z komparátoru (CH2) na kanále 1 .....	- 25 -
Obrázek 10 - Změřený průběh na vstupu modulátoru (CH2) a na výstupu (CH1) na kanále 1 .....	- 26 -
Obrázek 11 - Schéma zapojení modulu transformátoru 1 .....	- 29 -
Obrázek 12 - Schéma zapojení modulu signalizace .....	- 30 -
Obrázek 13 - Schéma zapojení převodníku metalika-optika.....	- 31 -
Obrázek 14 - chybně, nedochází k posunu hodnoty ocr a výsledný kmitočet je neměnný .	- 34 -
Obrázek 15 - správně, velikostí posunu hodnoty ocr lze měnit výsledný kmitočet .....	- 34 -
Obrázek 16 – Princip pseudo16bitového časovače, před překlopením stavu výstupu časovač 2× přeteče .....	- 36 -
Obrázek 17 - Sestavená skříň .....	- 44 -
Obrázek 18 - Výrobní výkres redukce kodéru.....	- 45 -
Obrázek 19 - Osazený ovládací panel .....	- 46 -
Obrázek 20 - Osazený zadní panel .....	- 46 -
Obrázek 21 - Výrobní výkres izolátoru .....	- 48 -
Obrázek 22 - Výrobní výkres držáku portálu .....	- 49 -
Obrázek 23 - Výrobní výkres držáku ventilátoru .....	- 49 -
Obrázek 24 - Skříň s portálem a 3D výtisky .....	- 50 -
Obrázek 25 - Chassis s pryžovými nožkami .....	- 50 -
Obrázek 26 - Výkres upraveného VN transformátoru.....	- 53 -
Obrázek 27 - Upravené VN transformátory v zalévacím přípravku .....	- 53 -
Obrázek 28 - Nová stupnice ampérmetru .....	- 55 -
Obrázek 29 - Upravený ampérmetr .....	- 56 -
Obrázek 30 - Výrobní výkres podložky tranzistoru .....	- 58 -
Obrázek 31 - Kompletně sestavené zařízení.....	- 60 -
Obrázek 32 - Výrobek v provozu .....	- 60 -

## 8 SEZNAM PŘÍLOH

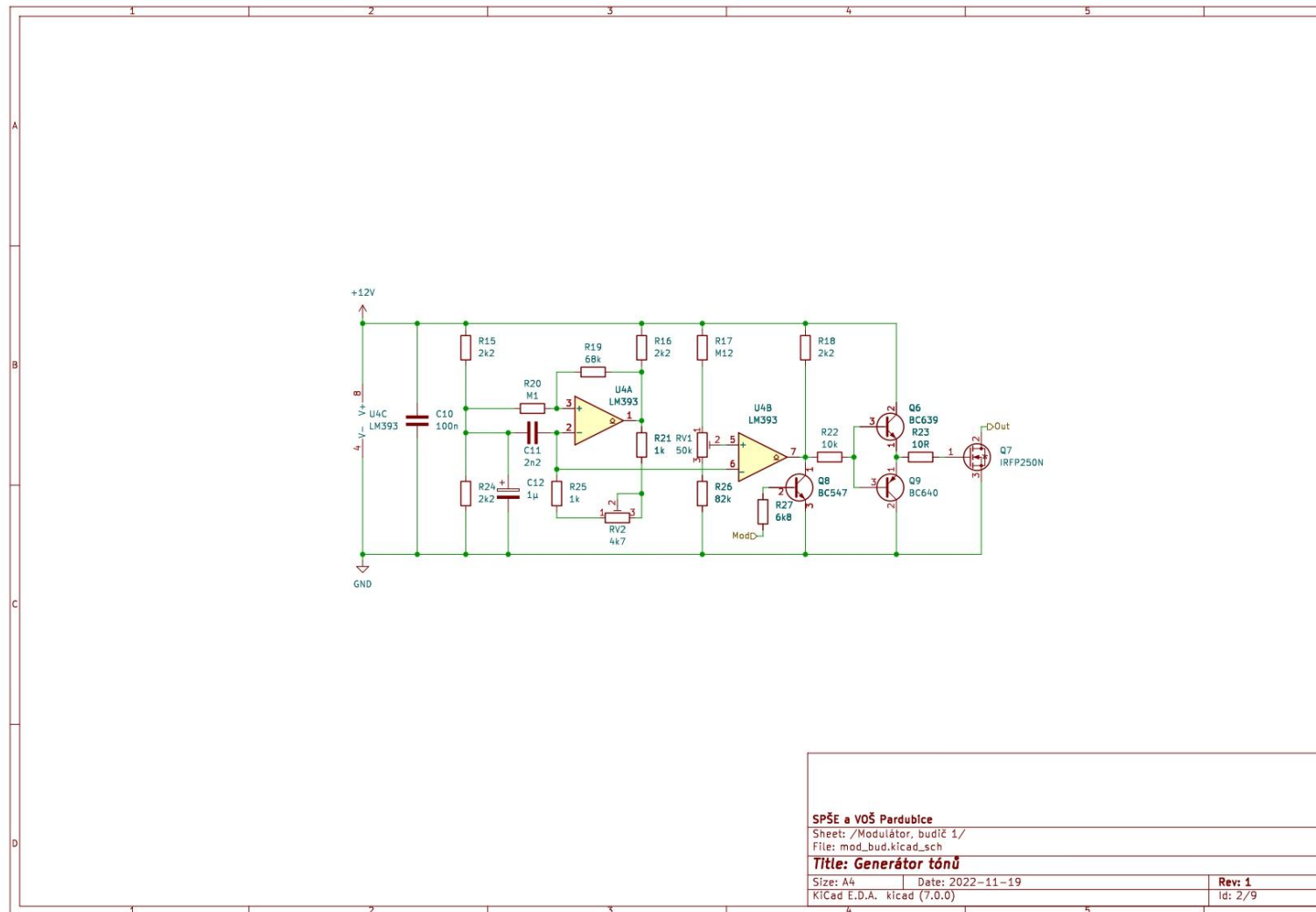
Příloha 1 - Blokové schéma.....	- 7 -
Příloha 2 - Schéma zapojení řídicí jednotky.....	- 8 -
Příloha 3 - Schéma zapojení generátoru nosného kmitočtu 1 .....	- 9 -
Příloha 4 - Schéma zapojení generátoru nosného kmitočtu 2 .....	- 10 -
Příloha 5 - Schéma zapojení generátoru nosného kmitočtu 3 .....	- 11 -
Příloha 6 - Schéma zapojení ovládacího panelu.....	- 12 -
Příloha 7 - Schéma zapojení zadního panelu.....	- 13 -
Příloha 8 - Schéma zapojení převodníku metalika-optika.....	- 14 -
Příloha 9 - Schéma zapojení modulů transformátorů .....	- 15 -
Příloha 10 - Schéma zapojení regulace teploty .....	- 16 -
Příloha 11 - Výrobní výkres skříně .....	- 17 -
Příloha 12 - Výrobní výkres ovládacího panelu .....	- 18 -
Příloha 13 - Výrobní výkres zadního panelu .....	- 19 -
Příloha 14 - Výrobní výkres měděného portálu .....	- 20 -
Příloha 15 - Výrobní výkres chassis .....	- 21 -
Příloha 16 - Výrobní výkres přípravku na zalévání.....	- 22 -
Příloha 17 - Popisné štítky.....	- 23 -
Příloha 18 – Výrobní výkres převodníku metalika-optika .....	- 24 -
Příloha 19 - DPS základní deska .....	- 25 -
Příloha 20 - DPS regulace teploty, vstupního/výstupního dílu, obvodu signalizace a převodníku metalika-optika.....	- 26 -
Příloha 21 - DPS modulů VN transformátorů .....	- 27 -
Příloha 22 - Osazovací plány, pohled z vrchu .....	- 28 -
Příloha 23 - Osazovací plány, pohled ze spodu.....	- 29 -



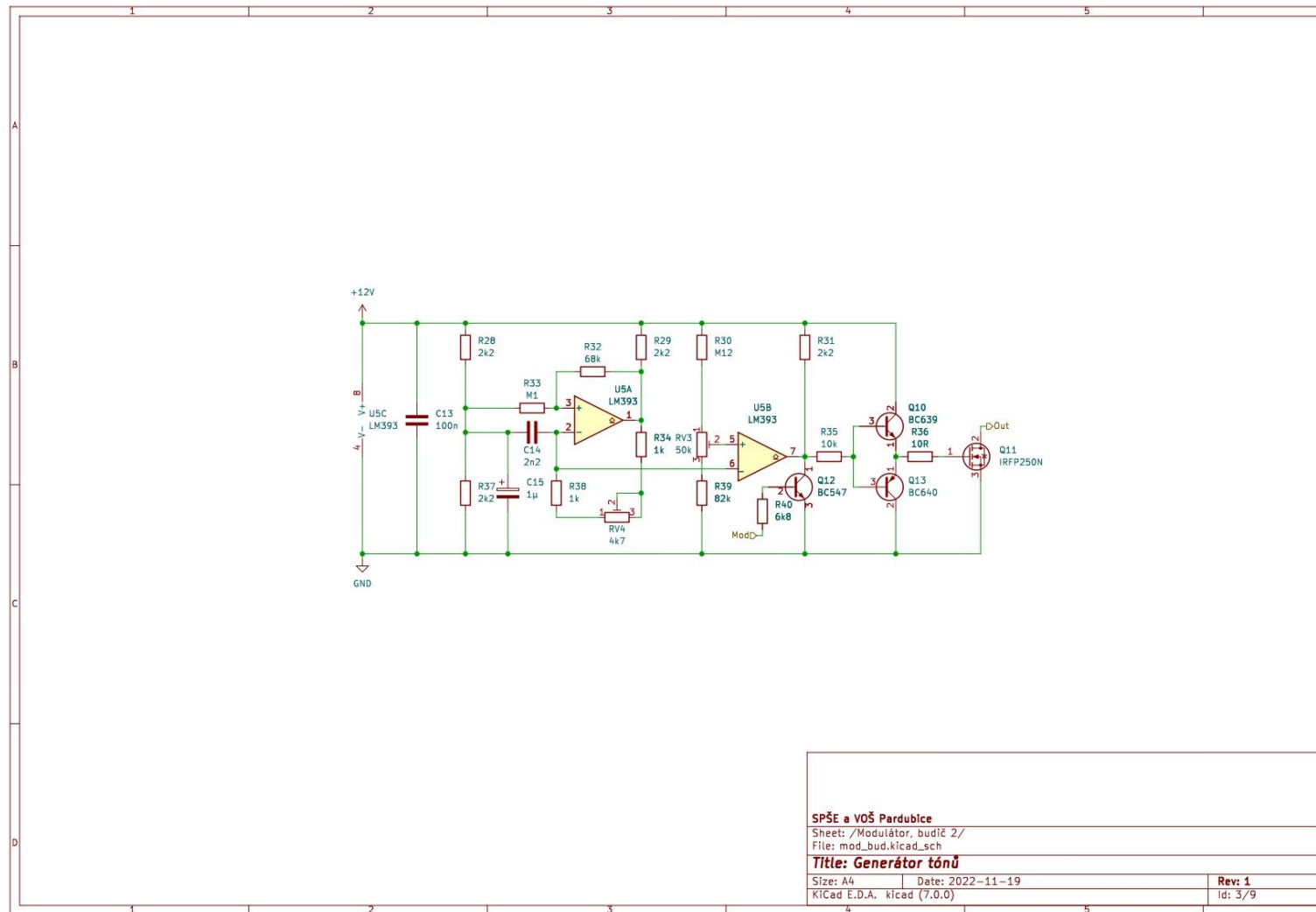
*Príloha 1 - Blokové schéma*







Příloha 3 - Schéma zapojení generátoru nosného kmitočtu 1



**SPŠE a VOŠ Pardubice**

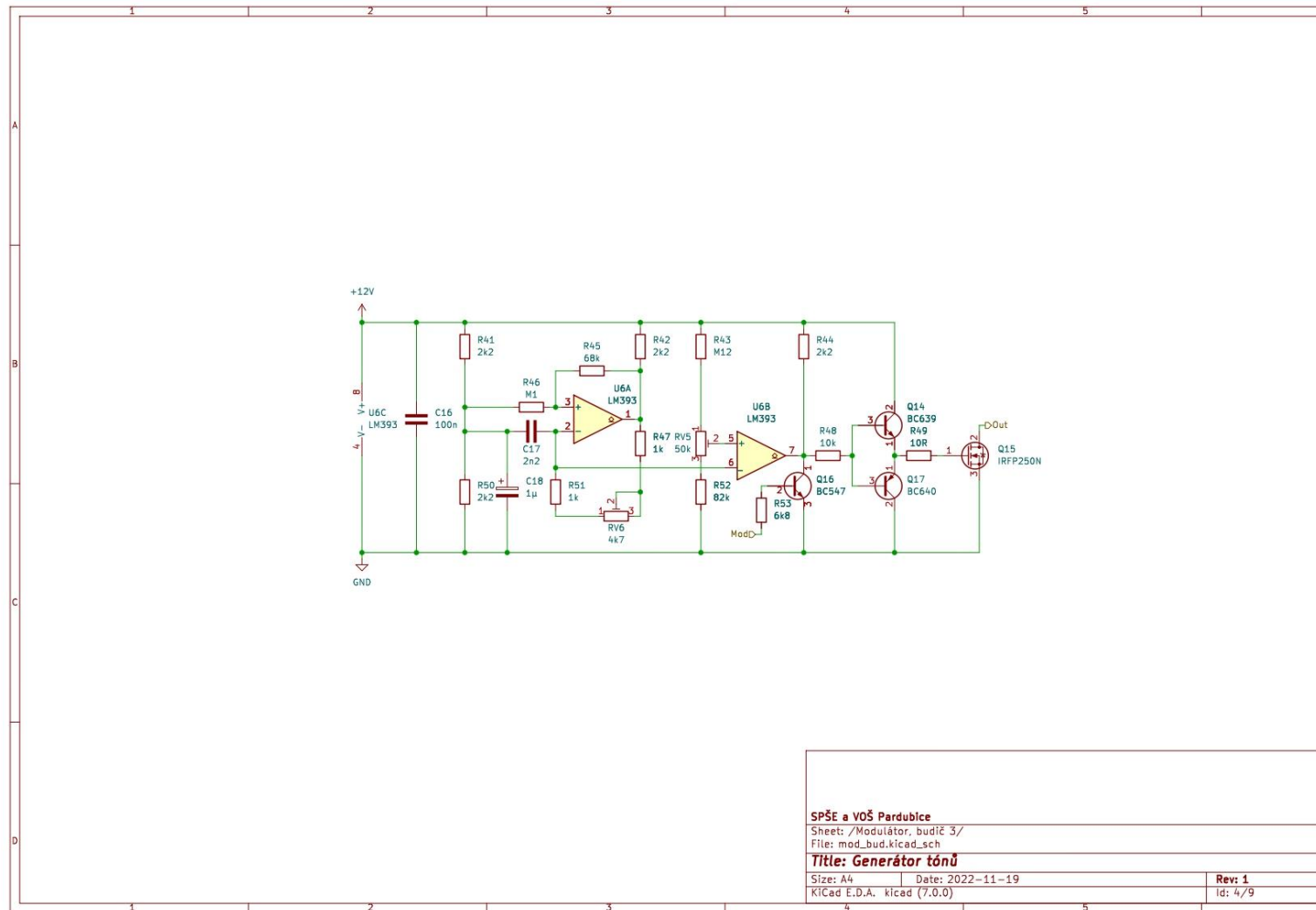
Sheet: /Modulátor, budič 2/  
File: mod\_bud.kicad\_sch

**Title: Generátor tónů**

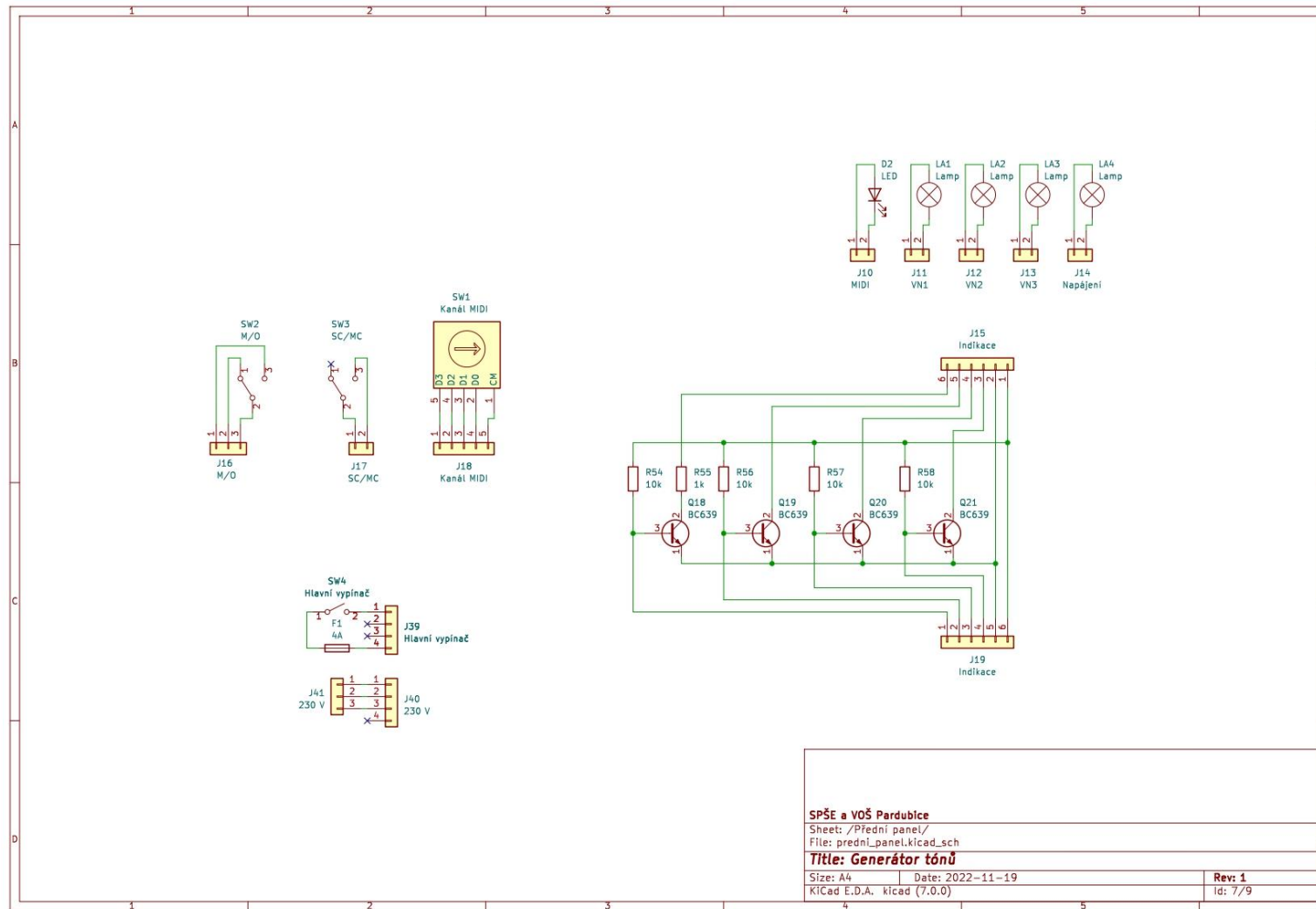
Size: A4 Date: 2022-11-19  
KiCad E.D.A. kicad (7.0.0)

Rev: 1  
Id: 3/9

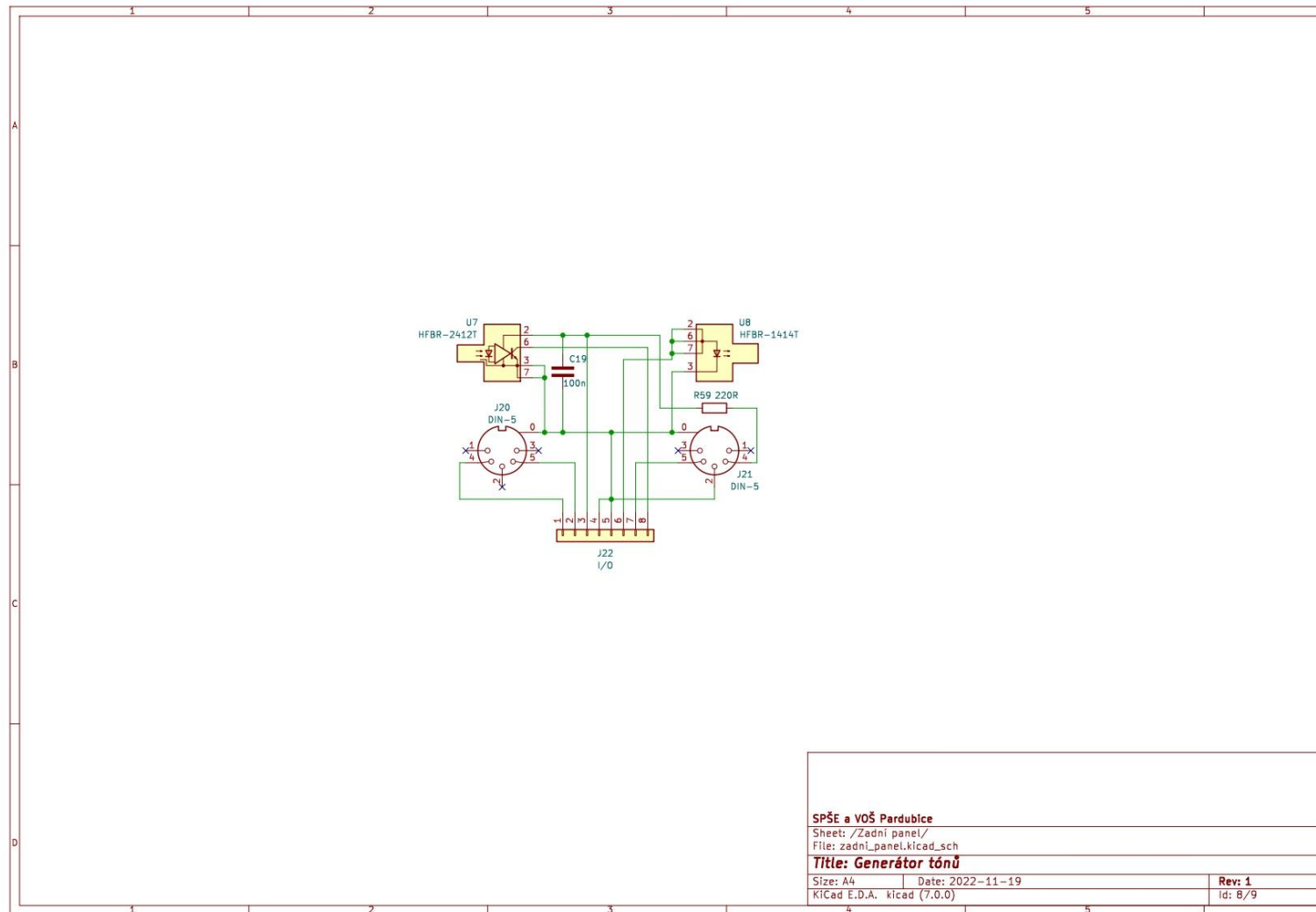
Příloha 4 - Schéma zapojení generátoru nosného kmitočtu 2



Příloha 5 - Schéma zapojení generátoru nosného kmitočtu 3



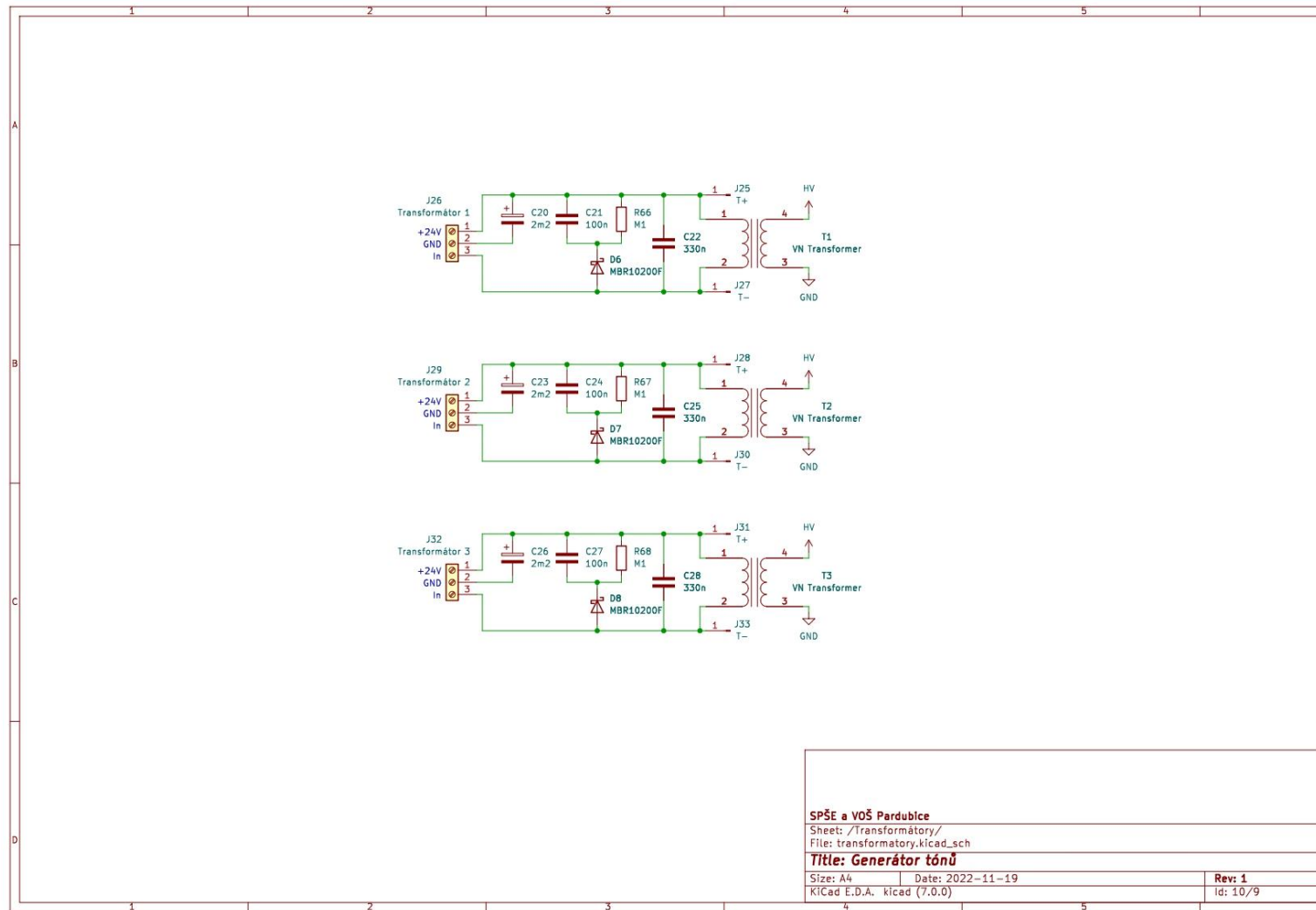
Příloha 6 - Schéma zapojení ovládacího panelu



<b>SPŠE a VOŠ Pardubice</b>		
Sheet: /Zadní panel/		
File: zadni_panel.kicad_sch		
<b>Title: Generátor tónů</b>		
Size: A4	Date: 2022-11-19	Rev: 1
KiCad E.D.A. kicad (7.0.0)		Id: 8/9

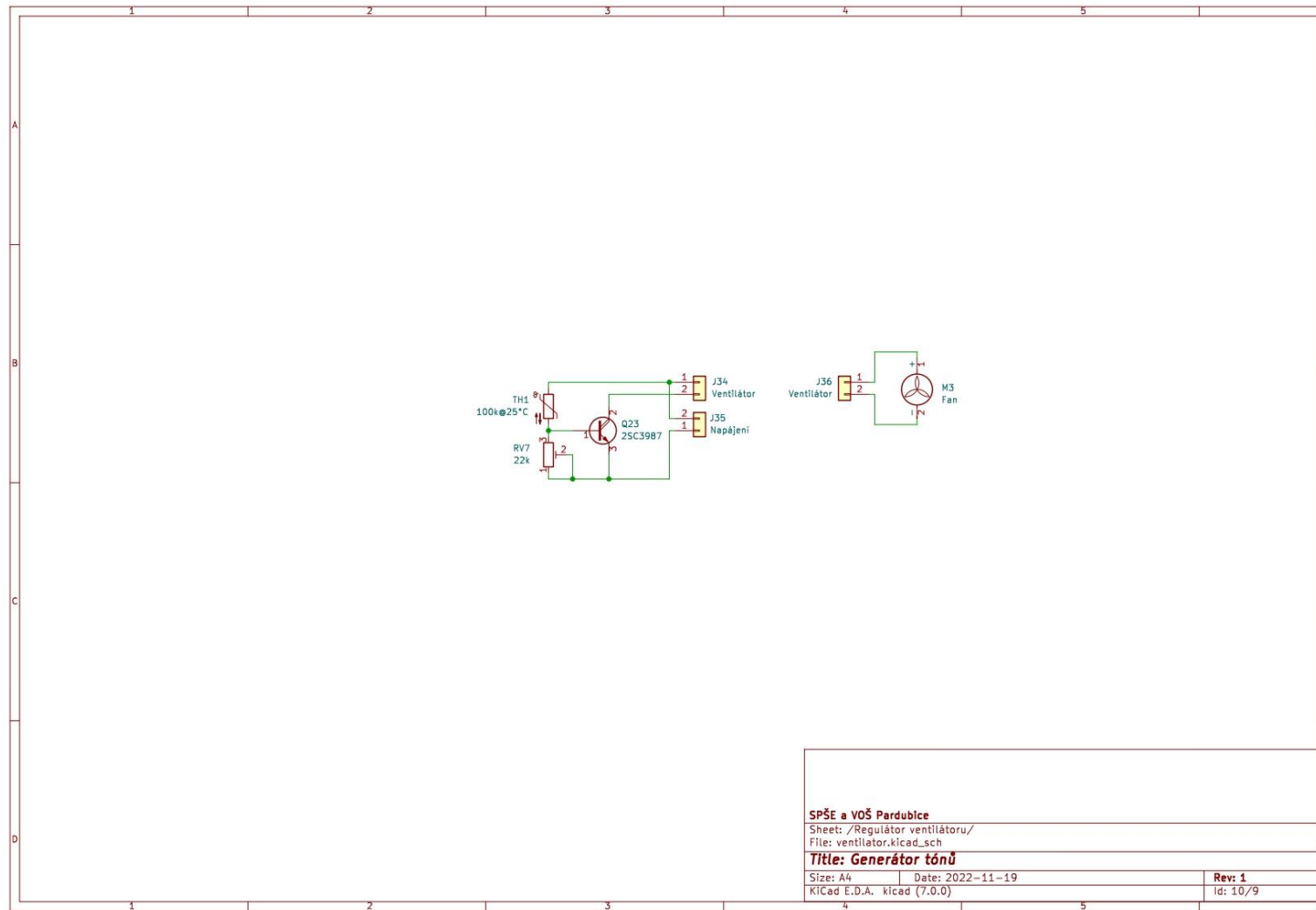
Příloha 7 - Schéma zapojení zadního panelu





<b>SPŠE a VOŠ Pardubice</b>		
Sheet: /Transformátory/		
File: transformatory.kicad_sch		
<b>Title: Generátor tónů</b>		
Size: A4	Date: 2022-11-19	Rev: 1
KiCad E.D.A. kicad (7.0.0)		Id: 10/9

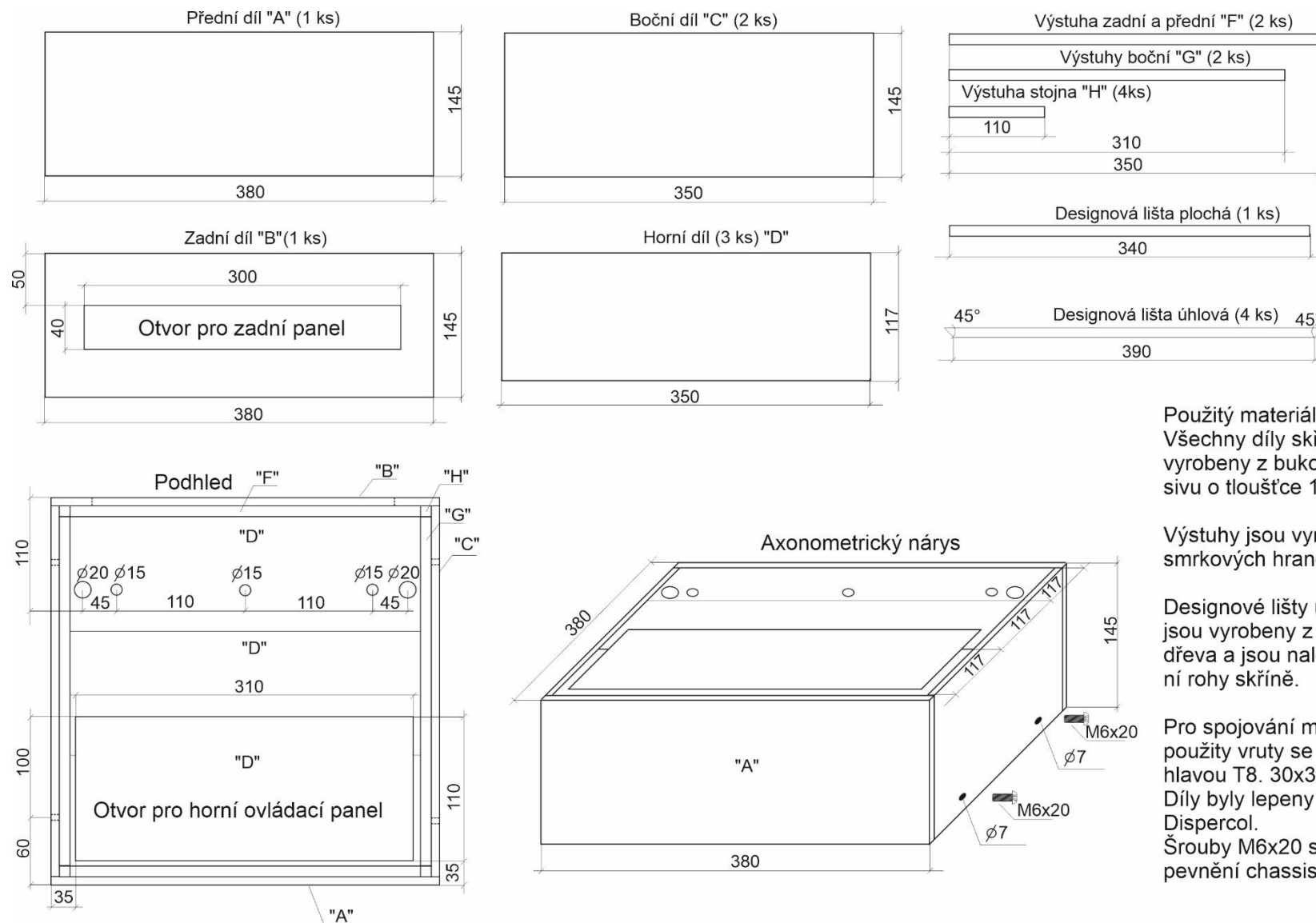
Příloha 9 - Schéma zapojení modulů transformátorů



<b>SPŠE a VOŠ Pardubice</b>		
Sheet: /Regulátor ventilátoru/		
File: ventilator.kicad_sch		
<b>Title: Generátor tónů</b>		
Size: A4	Date: 2022-11-19	Rev: 1
KiCad E.D.A. kicad (7.0.0)		Id: 10/9

Příloha 10 - Schéma zapojení regulace teploty





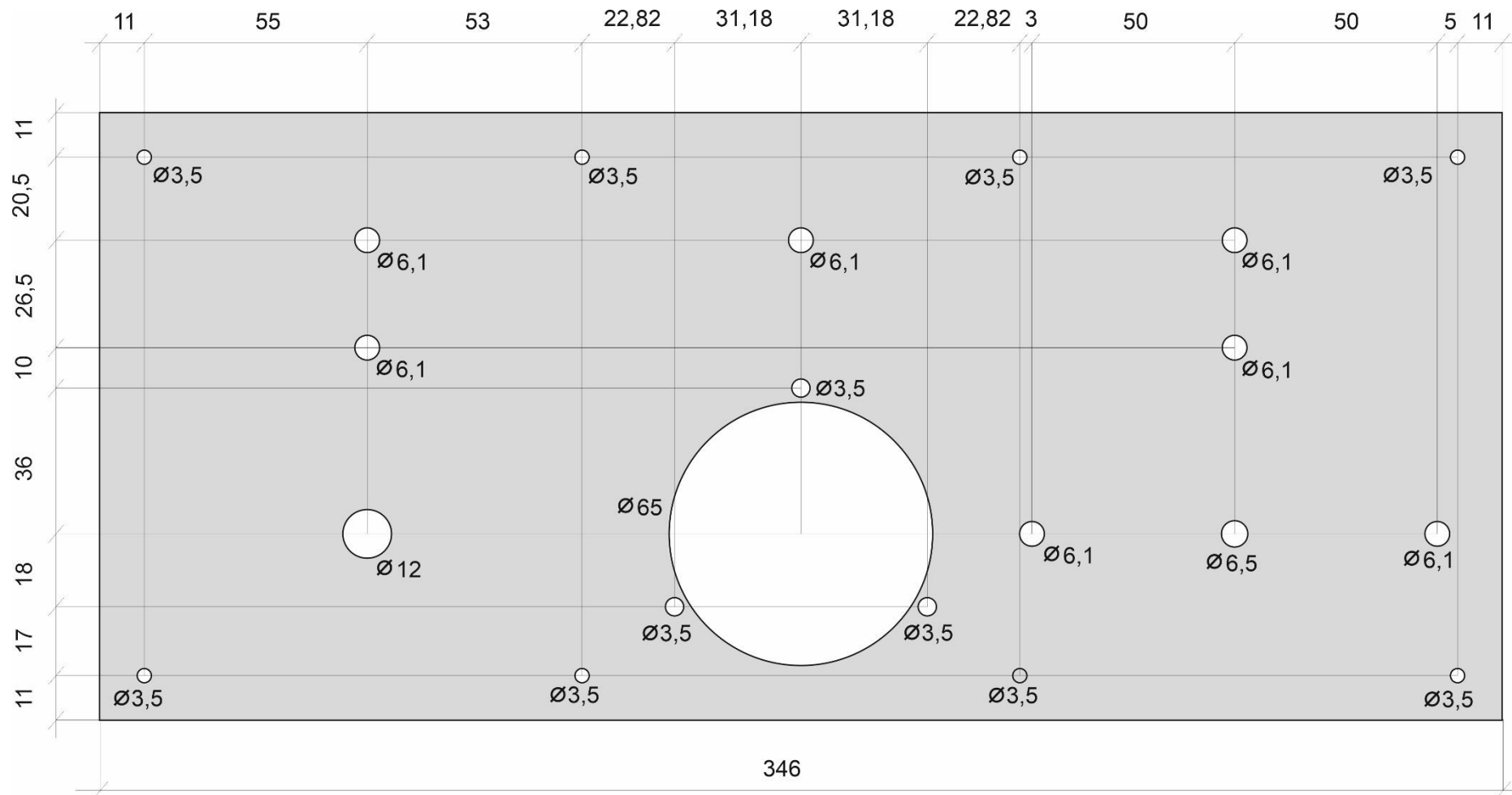
Použitý materiál:  
Všechny díly skříně jsou vyrobeny z bukového masivu o tloušťce 15 mm.

Výstuhy jsou vyrobeny ze smrkových hranolů 20 x 20 mm.

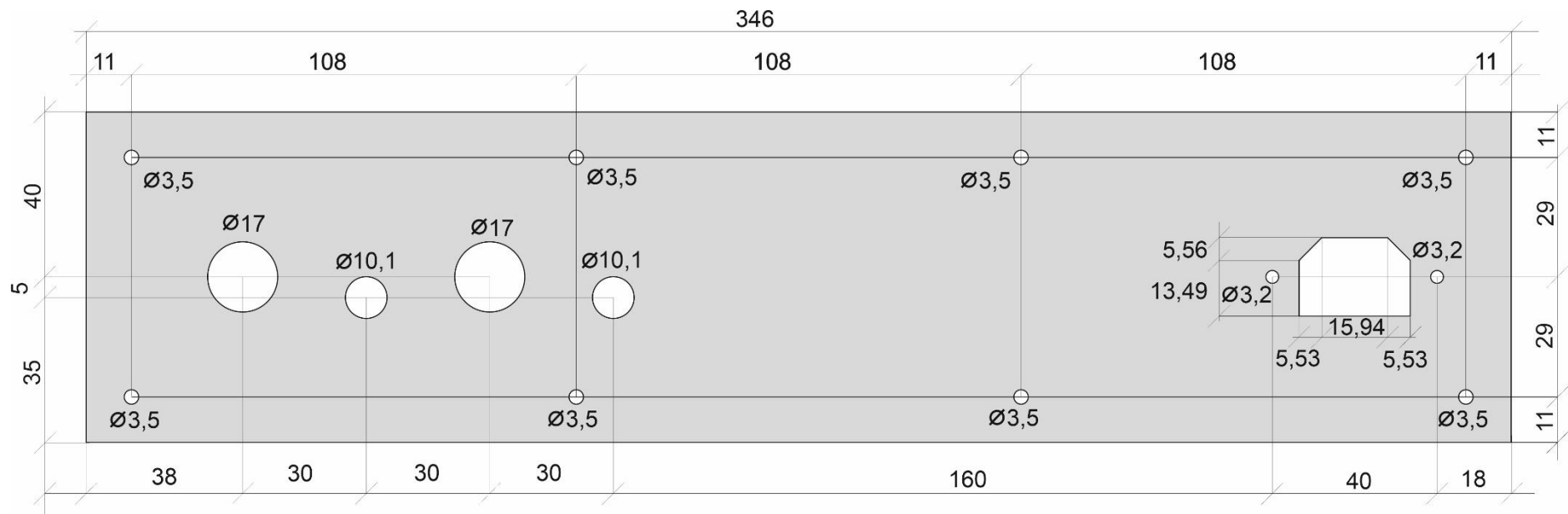
Designové lišty úhlové a ploché jsou vyrobeny z borového dřeva a jsou nalepeny na horní rohy skříně.

Pro spojování materiálu byly použity vruty se zápustnou hlavou T8. 30x3,5 mm  
Díly byly lepeny lepidlem Dispercol.  
Šrouby M6x20 slouží k připevnění chassis.

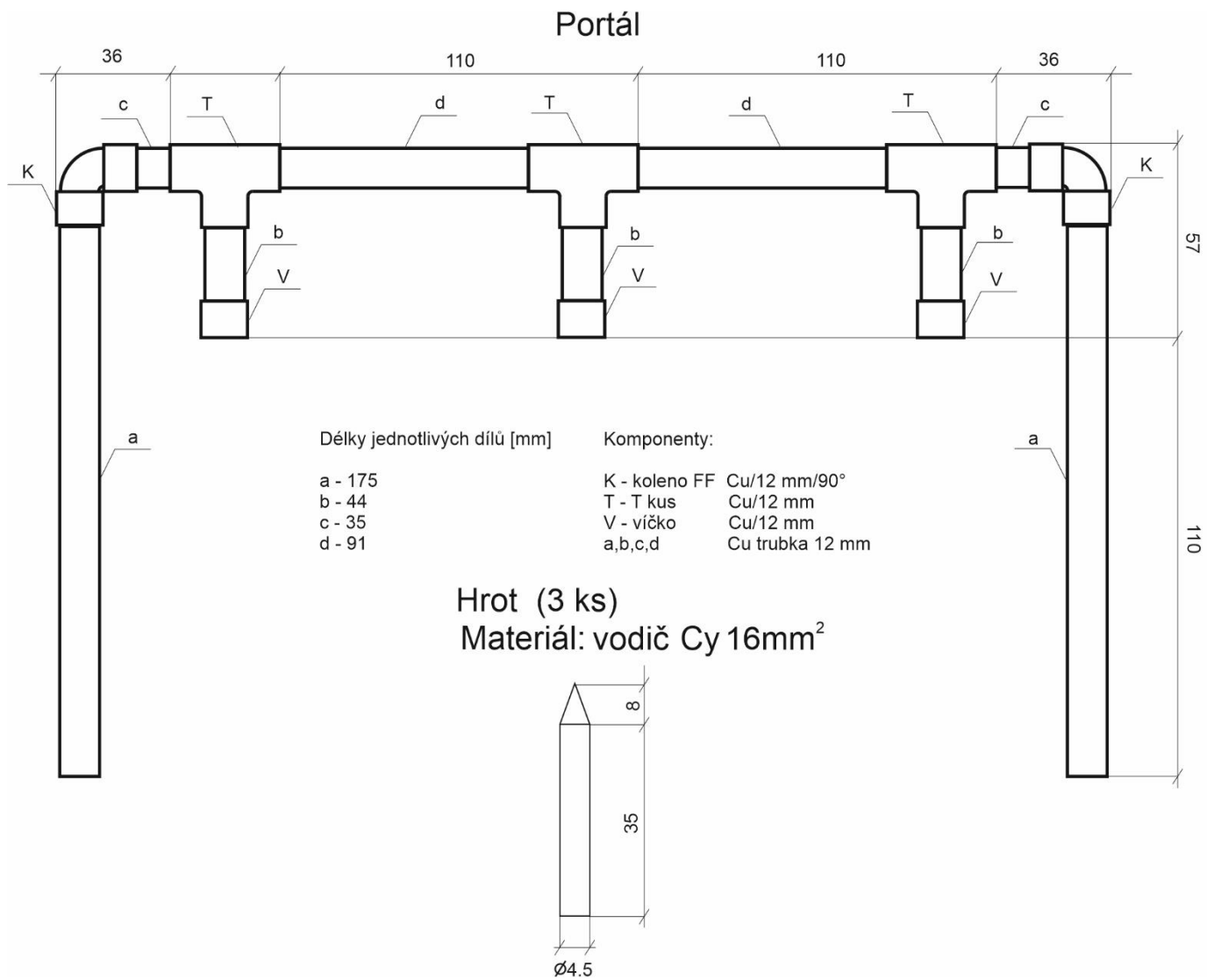
Príloha 11 - Výrobní výkres skříně



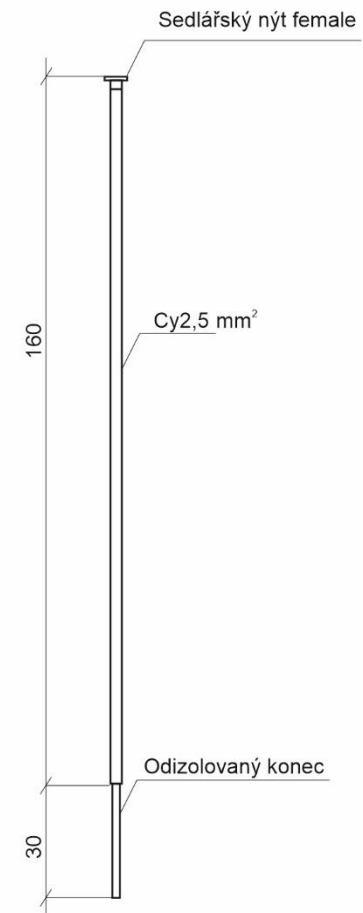
Příloha 12 - Výrobní výkres ovládacího panelu



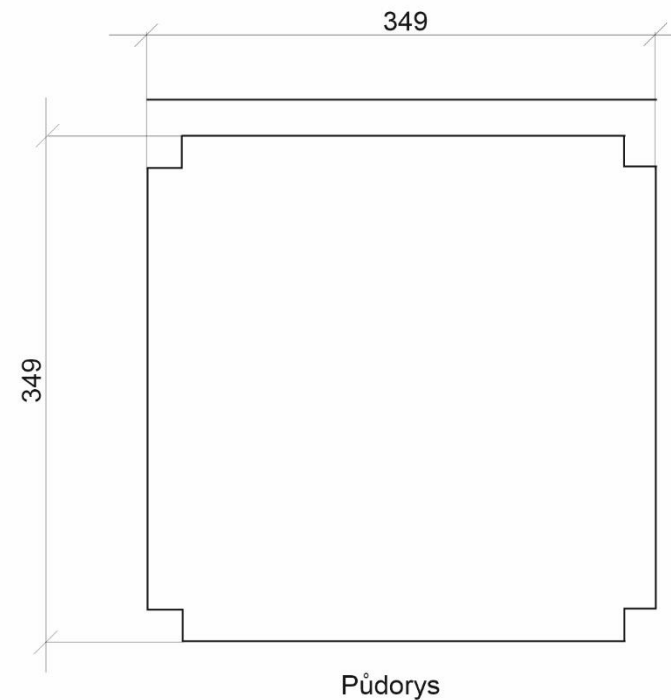
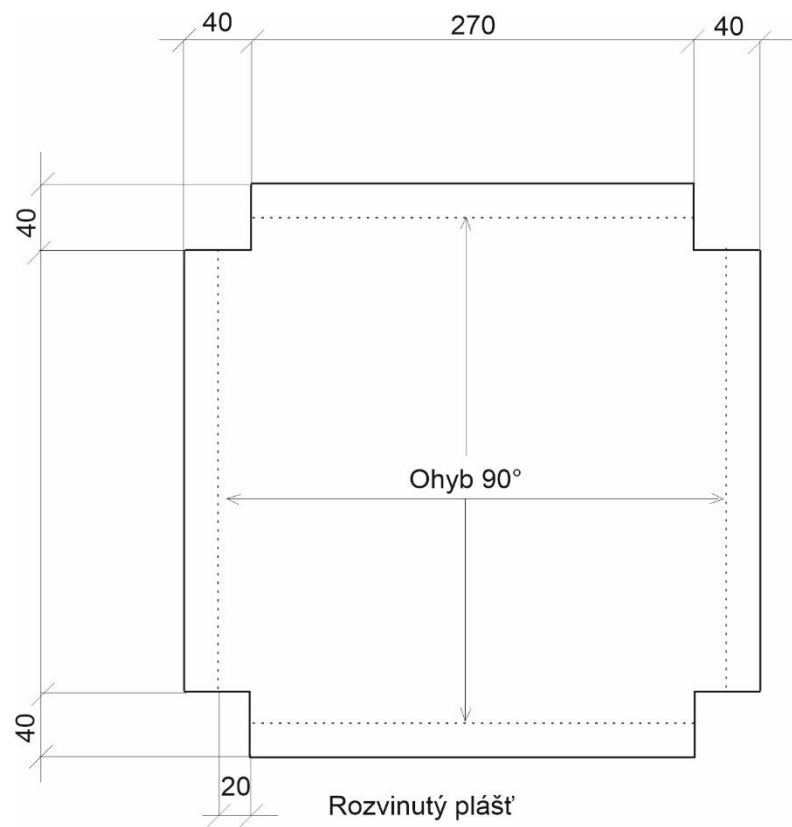
*Příloha 13 - Výrobní výkres zadního panelu*



### Nasouvací trn (3 ks)

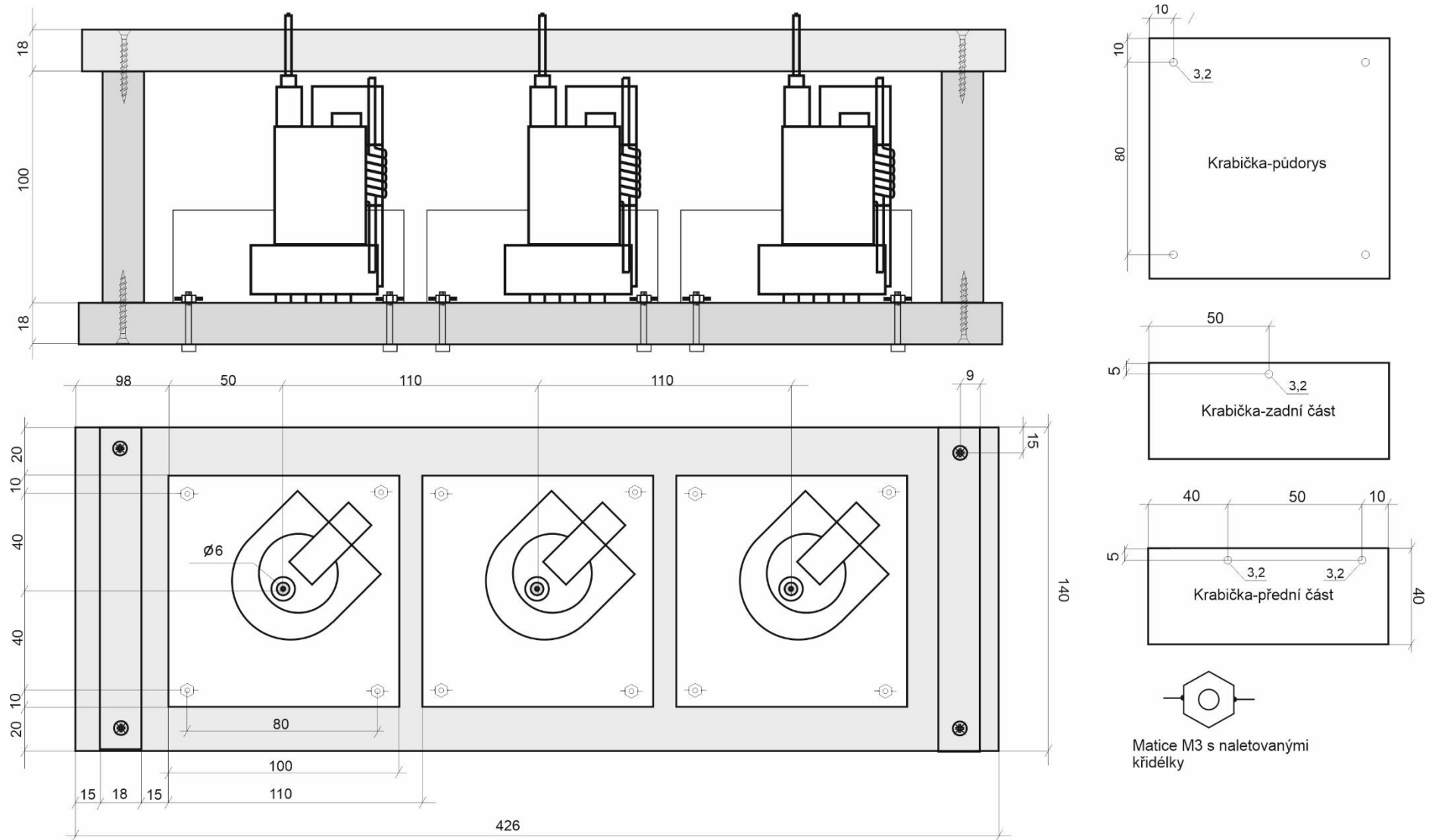


Příloha 14 - Výrobní výkres měděného portálu



Materiál: černý plech 1,5 mm

Příloha 15 - Výrobní výkres chassis



Příloha 16 - Výrobní výkres přípravku na zalévání

POWER

SIGNAL

CHANNEL 1

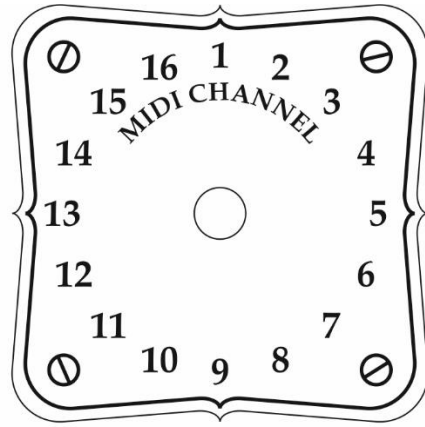
CHANNEL 2

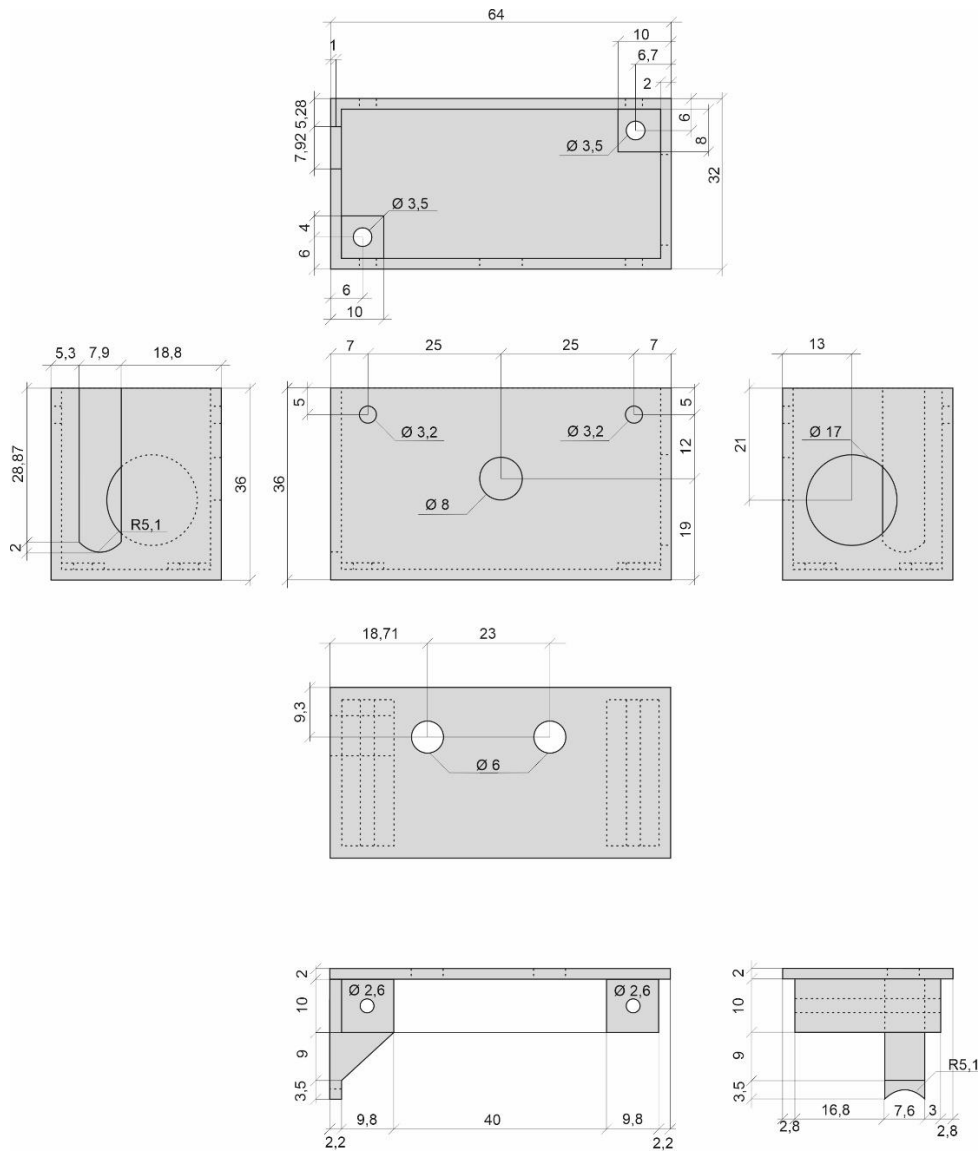
CHANNEL 3

INPUTS

OUTPUTS

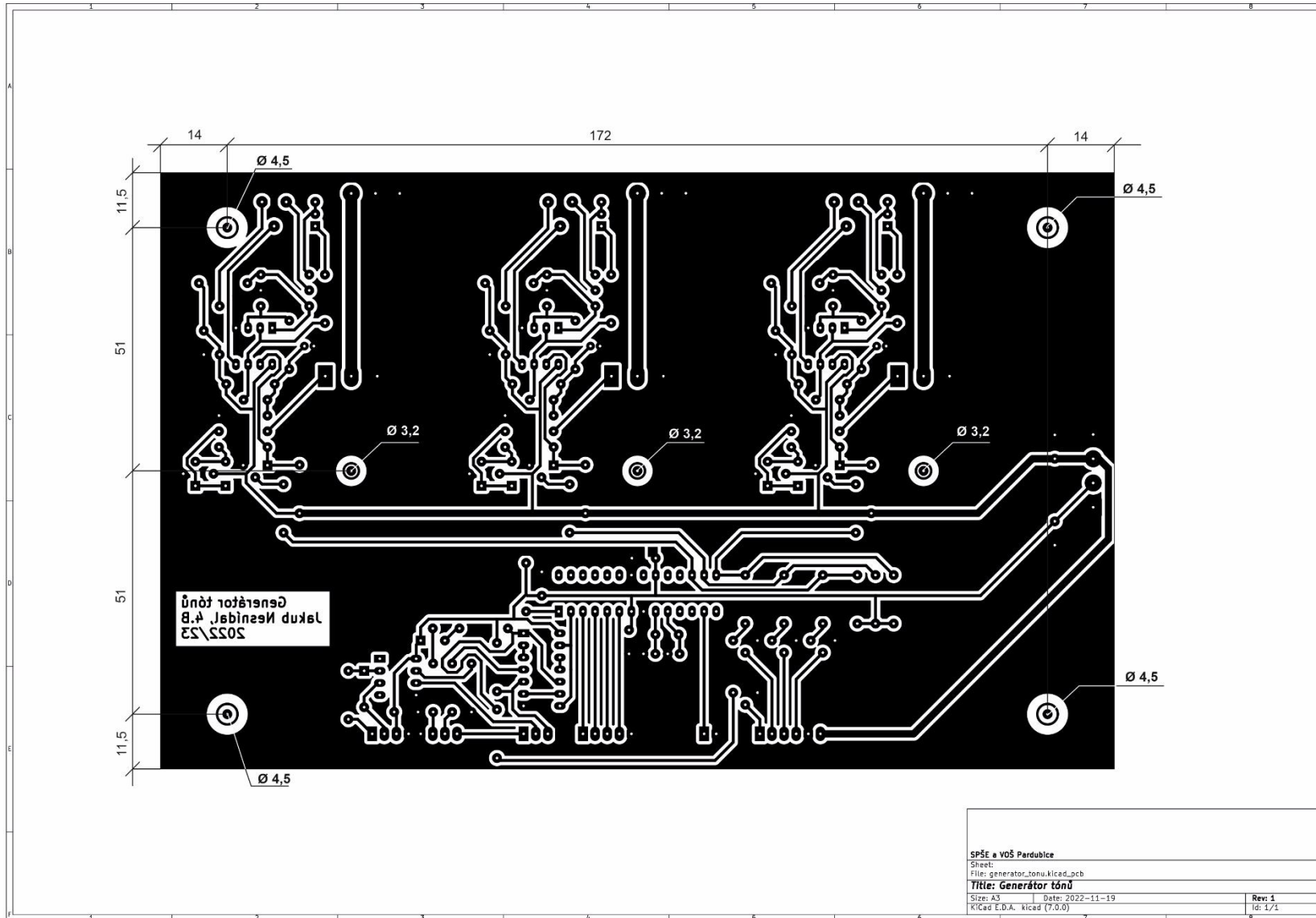
~230 VOLTS



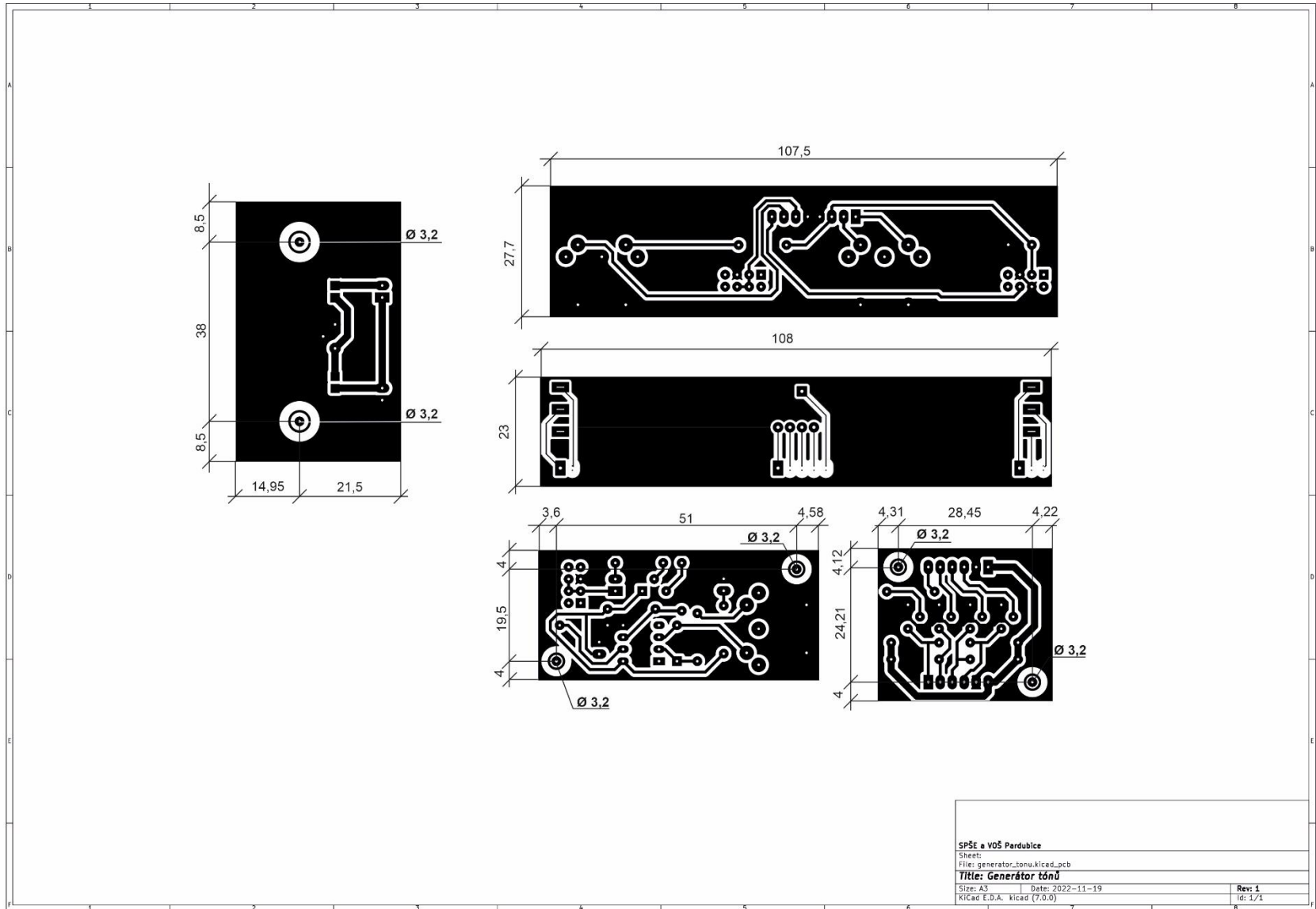


Příloha 18 – Výrobní výkres převodníku metalika-optika

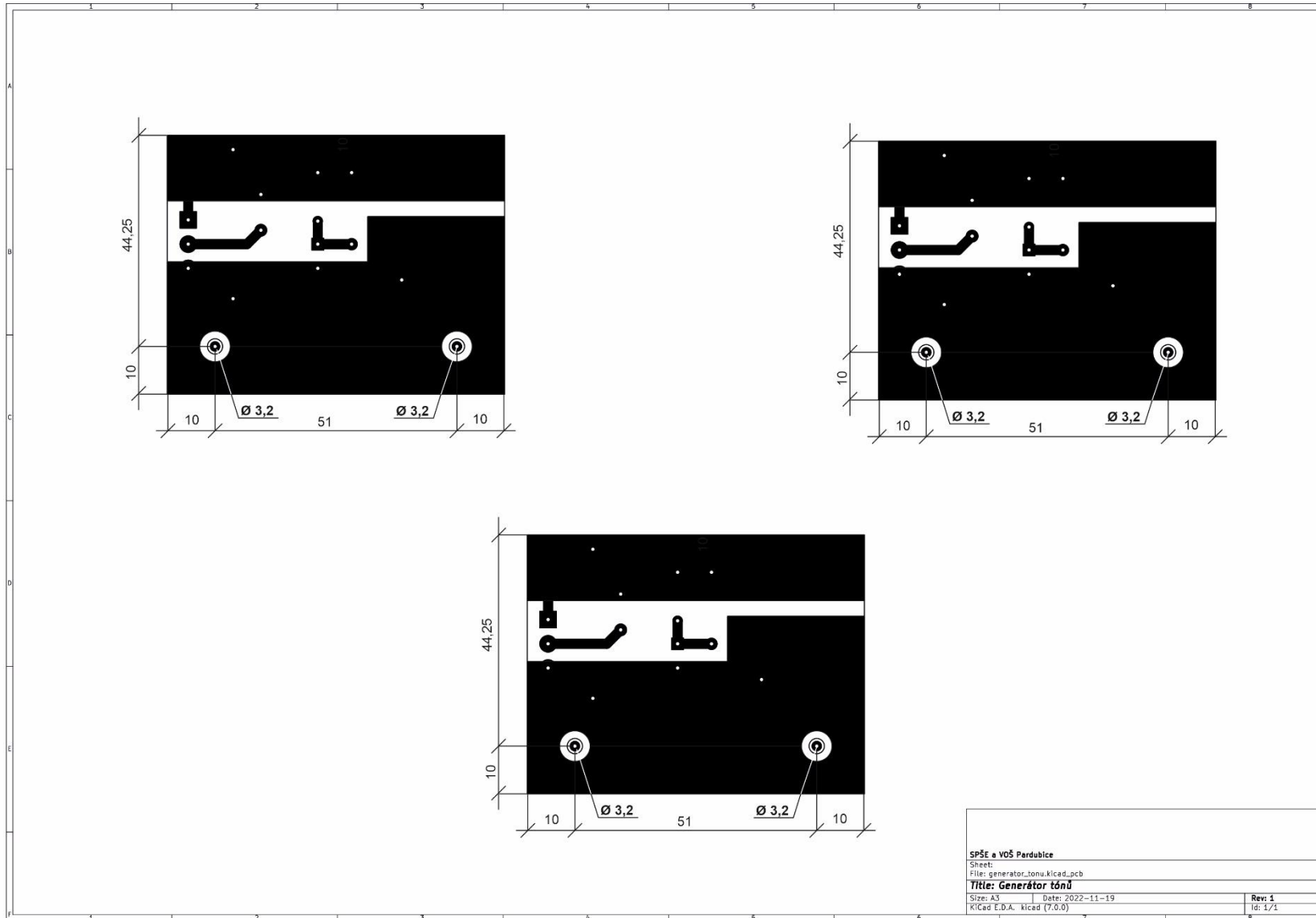




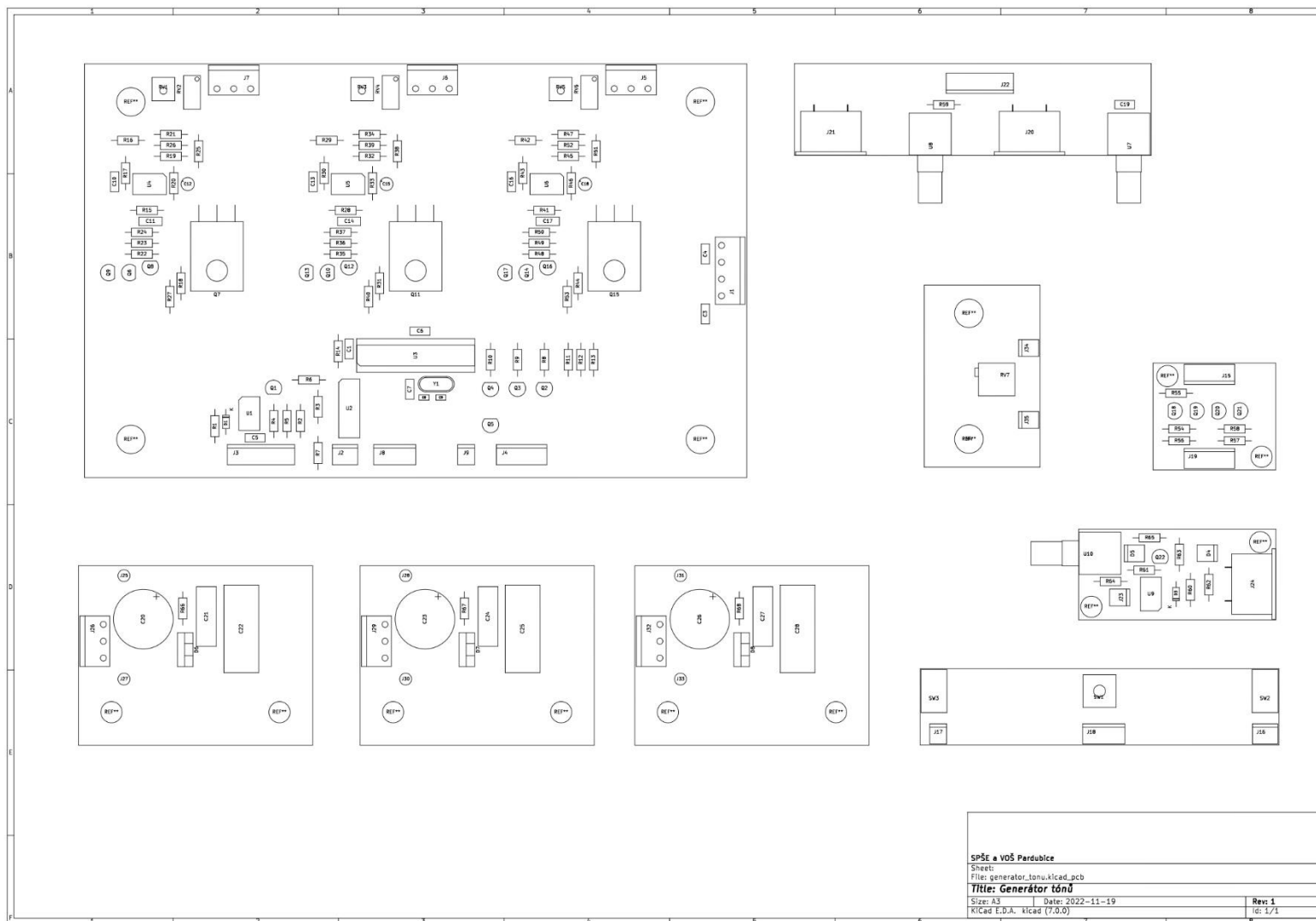
Příloha 19 - DPS základní deska



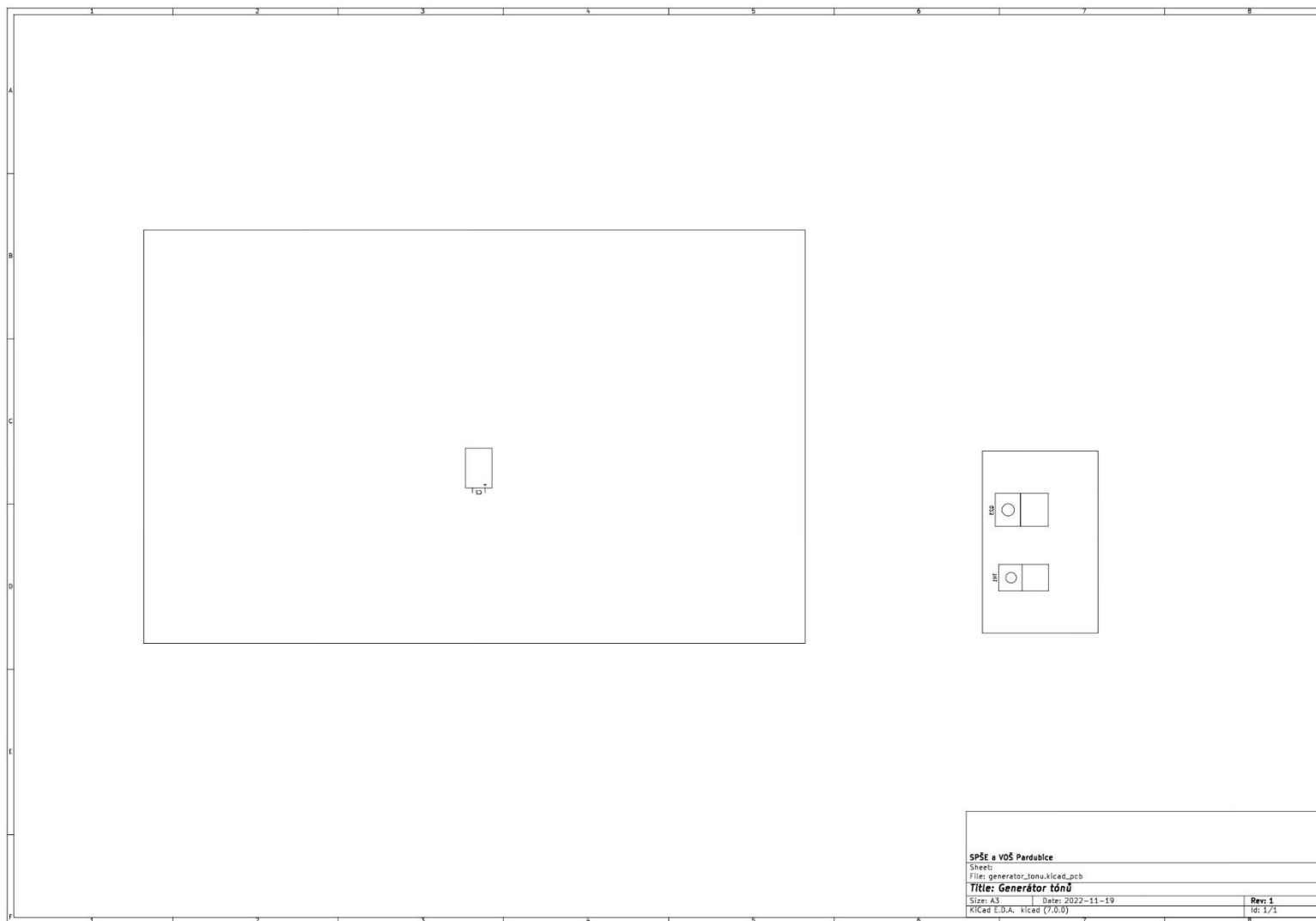
Příloha 20 - DPS regulace teploty, vstupního/výstupního dílu, obvodu signalizace a převodníku metalika-optika



Příloha 21 - DPS modulů VN transformátorů



Příloha 22 - Osazovací plány, pohled z vrchu



*Příloha 23 - Osazovací plány, pohled ze spodu*