



## **Středoškolská technika 2025**

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

### **Přípravek pro ELM – měření na operačních zesilovačích**

**Vojtěch Novotný**

**Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola, Písek, Karla Čapka 402;**

**se sídlem: Karla Čapka 402, 397 01 Písek**

## Anotace

Tato maturitní práce se zabývá předěláním, upravením a rozšířením měřícího přípravku na měření operačních zesilovačů. Od předešlého přípravku, kde byl pouze operační zesilovač v invertujícím a neinvertujícím zapojení, je zde i zapojení rozdílové a zapojení s otevřenou zpětnou vazbou. Zároveň je součástí maturitní práce i upravení protokolu k měření na operačních zesilovačích, aby souhlasil s novým přípravkem a měřením.

**Klíčová slova:** operační zesilovač, invertující, neinvertující, otevřená zpětná vazba, protokol

## Annotation

This graduation work deals with the remodeling, modification and expansion of a measuring device for measuring operational amplifiers. From the previous device, where there was only an operational amplifier in inverting and non-inverting configuration, there is also a differential and an open loop configuration. At the same time, the graduation work also includes the adjustment of the protocol for measuring operational amplifiers to comply with the new device and measurements.

**Key words:** operational amplifier, inverting, non-inverting, open loop, protocol

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Martinu Mužíkovi za aktivní pomoc a pozitivní přístup při tvorbě dlouhodobé maturitní práce a Jakubovi Jarošovi za vypůjčení nářadí a prostor k realizaci praktické části maturitní práce.

# Obsah

|        |                                                  |    |
|--------|--------------------------------------------------|----|
| 1.     | Úvod.....                                        | 5  |
| 2.     | Teoretický rozbor.....                           | 5  |
| 2.1.   | Operační zesilovače .....                        | 5  |
| 2.2.   | Invertující zapojení .....                       | 6  |
| 2.3.   | Neinvertující zapojení.....                      | 7  |
| 2.4.   | Rozdílové zapojení.....                          | 8  |
| 3.     | Popis autorského řešení .....                    | 9  |
| 3.1.   | Výběr operačního zesilovače .....                | 9  |
| 3.2.   | Návrh přípravků pro ELM .....                    | 9  |
| 3.2.1. | Rozvržení přípravků a desek plošného spoje ..... | 9  |
| 3.2.2. | Výběr programu.....                              | 10 |
| 3.2.3. | Návrh první desky .....                          | 10 |
| 3.2.4. | Návrh druhé desky.....                           | 13 |
| 3.3.   | Proměrování prototypu .....                      | 15 |
| 3.4.   | Tvorba desek plošného spoje .....                | 17 |
| 3.4.1. | Leptání desek.....                               | 17 |
| 3.4.2. | Vrtání a pájení desek .....                      | 19 |
| 3.5.   | Návrh potisků pro přípravky .....                | 20 |
| 3.6.   | Kompletace přípravků .....                       | 21 |
| 3.7.   | Měření hotových přípravků .....                  | 23 |
| 4.     | Závěr .....                                      | 24 |
| 5.     | Zdroje.....                                      | 25 |
| 6.     | Citace .....                                     | 26 |
| 7.     | Přílohy.....                                     | 27 |

# 1. Úvod

Cílem této maturitní práce je opravit stávající přípravky a zároveň je rozšířit o nové možnosti zapojení operačních zesilovačů. V současnosti se na škole provádí měření pouze na operačním zesilovači v invertujícím a neinvertujícím zapojení, a proto je mým úkolem rozšířit přípravek a měření o další varianty zapojení. Těmito rozšířeními jsou rozdílové zapojení a zapojení s otevřenou zpětnou vazbou.

Jak již bylo zmíněno, cílem této maturitní práce není pouze vytvoření měřicího přípravku, ale také úprava a rozšíření měřicího protokolu. Ten musí být přizpůsoben tak, aby odpovídal novým měřicím přípravkům a umožňoval jejich efektivní využití při praktických měřeních. Úprava protokolu zahrnuje nejen přidání podrobných postupů pro práci s rozšířenými zapojeními operačních zesilovačů, ale také zpřesnění metodiky měření, aby bylo dosaženo co nejpřesnějších a nejspolehlivějších výsledků. Tento krok je důležitý pro zajištění srozumitelnosti a správného provedení měření studenty, kteří budou s přípravky pracovat.

## 2. Teoretický rozbor

### 2.1. Operační zesilovače

Operační zesilovač (OZ) je elektronická součástka, která se často používá v obvodech pro zpracování analogových signálů. Je to zesilovač, který umí výrazně zesílit slabý signál a má vysoký vstupní odpor a nízký výstupní odpor. Má dva vstupy – jeden invertující, který obrací polaritu signálu, a druhý neinvertující, který nechává signál beze změny. Kromě těchto vstupů má také vývody pro napájení a úpravy jeho vlastností, například kmitočtovou kompenzaci. Operační zesilovače se nejčastěji používají ke zpracování stejnosměrných signálů, ale mohou pracovat i se střídavými signály, i když s určitými omezeními.

#### **Definice některých základních pojmů:**

**Napětové zesílení  $A_u$**  při otevřené smyčce zpětné vazby je zesílení definované pro předepsanou zátěž, napájecí napětí a maximálně přípustný (nezkreslený) vstupní signál, při kompenzované napětové nesymetrii vstupů. (je to vlastně zesílení

samotného OZ, pro praktické použití velké. V konkrétních aplikacích se zesílení pomocí záporné zpětné vazby, viz dále, nastavuje na požadovanou hodnotu.) [1]

**Napěťová nesymetrie vstupů  $U_{I0}$**  (napěťový ofset, vstupní zbytkové napětí) je napětí, které se musí přivést mezi vstupy, aby výstupní napětí bylo nulové. (Některé OZ mají na kompenzaci  $U_{I0}$  zvláštní vstupy.) [1]

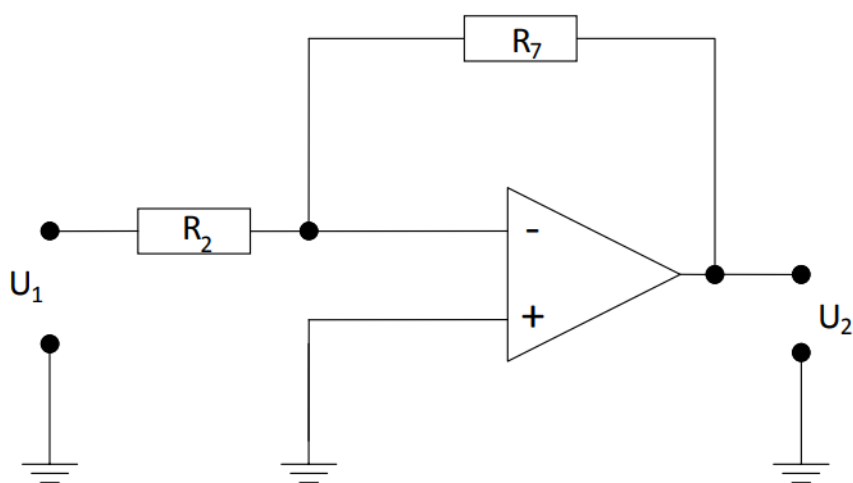
**Proudová nesymetrie vstupů  $I_{I0}$**  (proudový ofset, vstupní zbytkový proud) je rozdíl proudů mezi oběma vstupy, aby výstupní napětí bylo nulové. [1]

**Průměrný teplotní součinitel napěťové (proudové) nesymetrie vstupů  $\alpha_{UI0}$**  je poměr změny napěťové (proudové) nesymetrie vstupů k teplotnímu intervalu, v němž změna nastala. Označuje se také jako teplotní drift napětí (proudu). [1]

**Potlačení součtového signálu CMR** je definováno jako poměr vstupního napěťového rozsahu k maximální změně napěťové nesymetrie, v tomto rozsahu vyjádřené v dB. [1]

## 2.2. Invertující zapojení

Za předpokladu ideálního zesilovače se proud  $i_{\text{vstup}}$  vstupující do zesilovače musí rovnat proudu  $i_{\text{výstup}}$ , který prochází zpětnou vazbou a výstupní napětí se musí rovnat napětí na zpětnovazebním odporu  $R_7$ . [1]

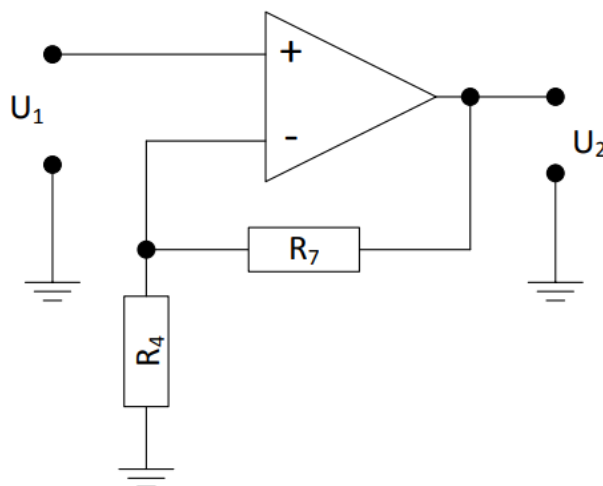


Obr. 1 – schéma invertujícího zapojení [1]

Velikost napěťového zesílení  $A_u$  neinvertujícího zapojení je dána poměrem  $A_u = \frac{R_7}{R_2}$

U tohoto zapojení dojde k posunu fáze mezi vstupním a výstupním napětím o  $180^\circ$ . Je-li tedy na vstupu např. kladné napětí, získáme na výstupu invertujícího zapojení zesílené záporné napětí a naopak. [1]

### 2.3. Neinvertující zapojení



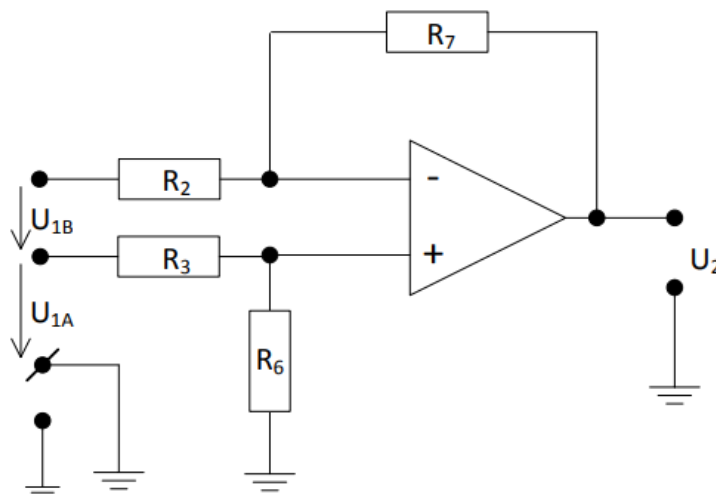
Obr. 2 – schéma neinvertujícího zapojení [1]

$$A_u = \frac{R_7}{R_4} + 1$$

Vstupní napěťový signál je ve fázi s výstupním zesíleným napěťovým signálem. Je-li tedy na vstupu např. kladné napětí, na výstupu získáme zesílené napětí téže polarity. [1]

## 2.4. Rozdílové zapojení

Toto zapojení se používá pro sledování dvou signálů s velmi málo odlišnými hodnotami napětí, výstupní napětí je úměrné rozdílu napětí na vstupech. Pro operaci rozdílu dvou signálů se často používá vlastností neinvertujícího a invertujícího vstupu. [1]



Obr. 3 – schéma rozdílového zapojení [1]

$$U_2 = (U_{1A} - U_{1B}) \frac{R_7}{R_2}$$

za podmínky:  $R_7/R_2 = R_6/R_3$ . Poměr odporů  $R_7/R_2$  umožňuje násobení rozdílu konstantou, a proto se daného zapojení používá k zesilování rozdílového napětí.

Lze na něj pohlížet tak, že invertující zesilovač zesiluje napětí  $U_1$  a neinvertující zesilovač zesiluje  $U_2$ , takže napětí  $U_2$  musí být zmenšeno odporovým děličem  $R_3/R_2$ , tak aby zesílení obou větví bylo stejné. [1]

## **3. Popis autorského řešení**

### **3.1. Výběr operačního zesilovače**

Než jsem mohl začít navrhovat zapojení s operačním zesilovačem, musel jsem si nejdřív vybrat ten správný typ. Při výběru jsem bral v úvahu několik důležitých parametrů, jako je například zesílení, způsob napájení nebo velikost napájecího napětí.

Nejdůležitější však pro mě bylo, aby zesilovač udržel stabilní zesílení i při vyšších frekvencích. Během školního měření jsem si všiml, že námi používané zesilovače začínají ztrácet zesílení už kolem 20 kHz, což je přibližně horní hranice slyšitelného zvuku.

Proto jsem se při výběru zaměřil hlavně na šířku pásma, tedy na to, jak dobře zesilovač zvládá pracovat s vyššími kmitočty. Čím větší má tento parametr, tím lépe si poradí se zesílením i při vyšších frekvencích, aniž by signál začal slábnout.

Nakonec jsem si vybral zesilovač LM741CN/NOPB. Tento zesilovač má dostatečné zesílení k tomu, abychom ho byli schopni využít při školním měření. I když existují operační zesilovače, které jsou napájeny nesymetrickým napájením, tak jsem se rozhodl vybrat operační zesilovač se symetrickým napájením, poněvadž díky tomu bude korespondovat s výukou na naší škole. Navíc je jeho napájecí napětí  $\pm 18$  V což se od současného zesilovače na škole příliš neliší.

### **3.2. Návrh přípravků pro ELM**

#### **3.2.1. Rozvržení přípravků a desek plošného spoje**

Musel jsem nejprve navrhnout, jak přípravky budou zhotoveny a kolik jich bude. Po konzultaci s vedoucím práce a ředitelem školy jsem se rozhodl, že zhotovím dva přípravky a v každém přípravku bude jedna deska plošného spoje.

Použitý operační zesilovač je jednokanálový. Přemýšlel jsem o výběru operačního zesilovače se dvěma kanály. Dvoukanálový operační zesilovač by velice usnadnil design plošného spoje, ale i po dlouhém hledání jsem nenašel operační zesilovač s požadovanými parametry. Výhoda jednoho kanálu je, že pokud by se poškodil operační zesilovač u jednoho zapojení, ale ne u druhého, tak stačí vyměnit jen ten rozbitý za cca 30 Kč. Pokud by to byl dvoukanálový, tak bychom měnili zesilovač až za 100 Kč.

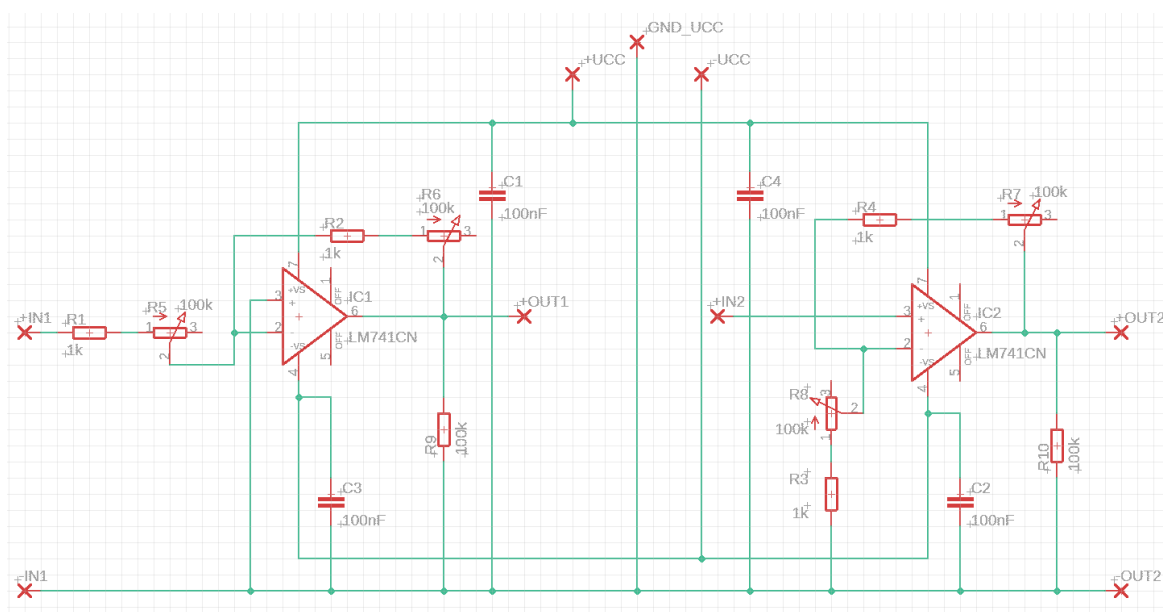
### 3.2.2. Výběr programu

Deska přípravku bude navržena tak, aby obsahovala dva operační zesilovače. Tento požadavek ovlivní i celkový design plošného spoje. Návrh musí zohlednit správné zapojení a umístění těchto součástek. Na tento úkol jsem si vybral program EAGLE. Hlavním důvodem, proč jsem si vybral EAGLE jako můj program pro tvorbu desek plošného spoje, bylo to, že v něm mám asi největší zkušenosti. Jsou samozřejmě další možnosti jako je například Fusion360, ale na rozdíl od EAGLu jsem v tomto programu nikdy nedělal.

### 3.2.3. Návrh první desky

Rozhodl jsem se, že na prvním plošném spoji bude invertované zapojení a neinvertované zapojení operačního zesilovače. Důvodem pro moje rozhodnutí byla myšlenka, aby v jednom přípravku byly obě zapojení operačních zesilovačů, která jsou ovládána a nastavována potenciometry. Dalším důvodem je typ měření, které se na těchto dvou zapojení bude provozovat. Na obou zapojeních se bude provádět měření závislosti napětového zesílení na kmitočtu. Pomocí potenciometrů budeme nastavovat samotné napětové zesílení. To bude buď 20 dB, nebo 40 dB.

Abych mohl navrhnout desku plošného spoje, musel jsem nejdříve nakreslit schéma samotného zapojení. Finální schéma zapojení vypadá takto:

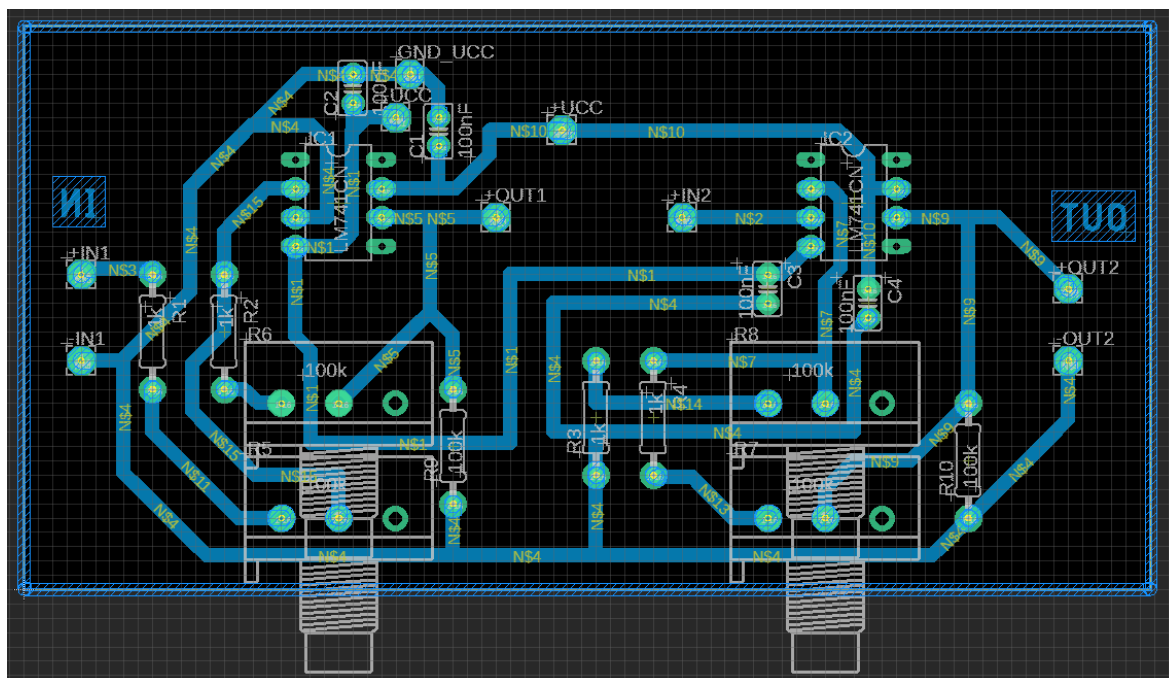


Obr. 4 – schéma invertujícího a neinvertujícího zapojení operačního zesilovače

Ze schématu je vidět, že oba operační zesilovače mají společnou zem i napájení. Důvodem je to, že přípravek bude mít pouze jeden vstup a jeden výstup. Výběr aktivního zesilovače zajistí přepínač umístěný uprostřed desky. Jeho funkcí bude odpojovat jedny kladné vstupy a výstupy a připojovat druhé. Toto řešení eliminuje potřebu dvou sad vstupů a výstupů. Místo nich zde budou jen jedny vstupní a výstupní svorky. Díky tomu nebude nutné přepojovat zařízení, stačí jen přepnout mezi invertujícím a neinvertujícím zapojením.

Na levé části schématu je operační zesilovač v invertujícím zapojení a na pravé části je v zapojení neinvertujícím. Jako hlavní odpory jsem pro obě zapojení zvolil potenciometry o velikosti 100 k $\Omega$ . Velikost odporu 100 k $\Omega$  jsem zvolil z několika důvodů, které ovlivňují nastavování zesílení. Pokud bych použil menší odpor, například 10 k $\Omega$ , rozsah potenciometrů by byl příliš malý. To by znamenalo, že i drobná změna nastavení potenciometru by měla výrazný dopad na výsledné zesílení, což by ztížilo přesné doladění požadovaných hodnot. Naopak, při použití většího odporu, například 1 M $\Omega$ , by se situace obrátila. Rozsah potenciometru by byl sice větší, ale rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší možnou hodnotou odporu by způsobil obtížné a zdlouhavé nastavování konkrétních úrovní zesílení, například 20 dB a 40 dB. Z těchto důvodů jsem se rozhodl pro hodnotu 100 k $\Omega$ , která představuje vhodný kompromis mezi dostatečným rozsahem a přesností nastavení. Kdyby se náhodou stalo to, že někdo nastaví jeden nebo oba potenciometry na minimum, tak jsem před každý potenciometr dal předřadný 1 k $\Omega$  odpor. Tím pádem i když by byly oba potenciometry nastaveny na minimum, tak v obvodu bude alespoň 1 k $\Omega$  odpor na vstupu a ve zpětné vazbě. Kondenzátory jsou napojeny na napájecí piny z důvodu správného fungování zesilovače (viz. Příloha IV). Také jsem dal na oba výstupy zatěžovací odpor. Ten je tam z důvodu ochrany operačního zesilovače, pokud by někdo na vstup pustil signál a obvod by pracoval „na prázdko“.

Finální návrh první desky plošného spoje:

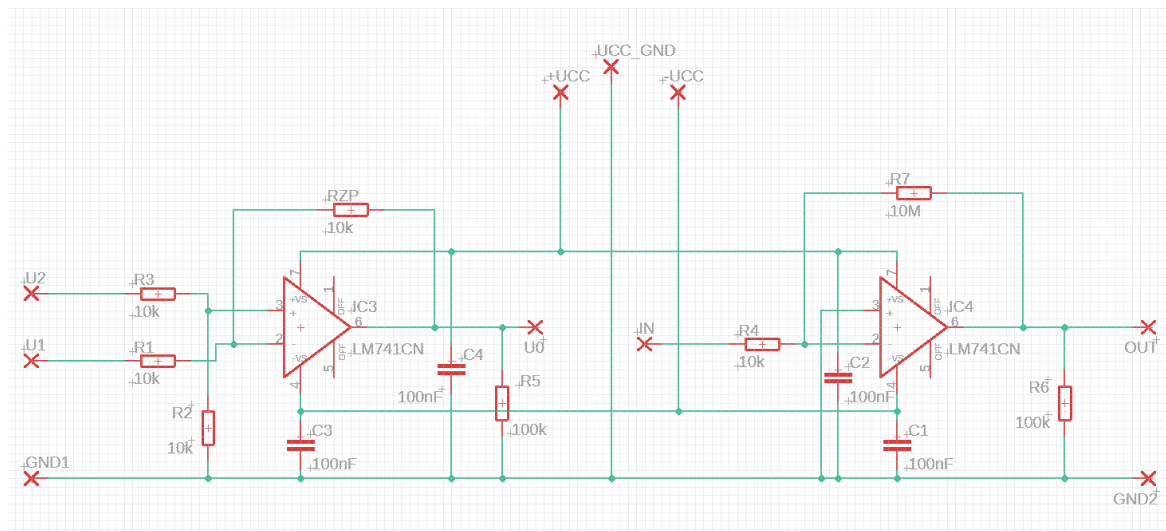


Obr. 5 – deska plošného spoje pro invertující a neinvertující zapojení v programu EAGLE

Při navrhování a rozložení cest plošného spoje jsem často využíval funkci Autorouter, která usnadňuje práci při tvorbě návrhu. Tato funkce automaticky navádí vodivé cesty tak, aby se správně propojily jednotlivé součástky na desce. Během tohoto procesu se také stará o to, aby se žádné spoje vzájemně nekřížily, což je důležité pro správnou funkčnost celého zapojení. Díky použití Autorouteru jsem mohl efektivně optimalizovat rozmístění spojů a ušetřit čas, který by jinak bylo nutné věnovat manuálním úpravám tras. Jediné, co bylo nutné dělat manuálně, byly menší úpravy cest, které byly až moc blízko u sebe a mohl by kvůli tomu vzniknout problém během leptání samotné desky.

### 3.2.4. Návrh druhé desky

Protože na první desce máme invertující a neinvertující zapojení, tak na této desce bude rozdílové zapojení a zapojení operačního zesilovače s otevřenou zpětnou vazbou. Návrh schématu pro druhou desku je dost podobný jako u desky první.



Obr. 6 – schéma rozdílového zapojení a zapojení s otevřenou zpětnou vazbou

Ze schématu si můžeme povšimnout, že oba operační zesilovače sdílejí stejné napájení a společnou zem. Tento aspekt zapojení zůstává neměnný oproti designu první desky, což zajišťuje konzistenci a stabilitu celého obvodu. Stejně tak i kondenzátory, které jsou připojeny ke kladným a záporným napájecím pinům zesilovače, plní stejnou funkci jako na první desce. Jejich úkolem je filtrovat případné rušení a stabilizovat napájecí napětí, což je klíčové pro správnou činnost operačních zesilovačů. Kromě toho si lze všimnout, že odpory na výstupech mají shodnou hodnotu 100 k $\Omega$ , stejně jako u prvního návrhu desky.

Na levé části schématu můžeme vidět rozdílové zapojení operačního zesilovače, které se svým principem výrazně liší od ostatních tří zapojení na desce. Toto specifické zapojení umožňuje zpracovávat dva vstupní signály současně, což je zásadní rozdíl oproti běžnějším zapojením, jako je zapojení invertující a neinvertující, kde se signál přivádí pouze na jeden ze vstupů. V tomto případě bude napětí přiváděno jak na invertovaný, tak na neinvertovaný vstup zesilovače, což umožňuje realizovat aritmetickou operaci mezi oběma vstupy.

Další významnou odlišností oproti ostatním zapojením je typ vstupního signálu. Zatímco u jiných zapojení se typicky pracuje se střídavým signálem, zde budeme na vstupy přivádět napětí stejnosměrné. Důvodem je princip činnosti rozdílového

zesilovače, který, jak už název napovídá, funguje jako odčítací obvod. Jeho úkolem je odečíst jedno vstupní napětí od druhého a výsledný rozdíl následně zesílit podle daného zisku. Tento zisk je určen poměrem odporu  $R_{zp}$  (zpětnovazebního odporu) a odporu  $R_1$ , což umožňuje přesné nastavení požadované úrovně zesílení.

Aby toto zapojení správně fungovalo a skutečně realizovalo rozdílové zesílení, je nutné dodržet důležitou podmínku.

$$\frac{R_{zp}}{R_1} = \frac{R_2}{R_3}$$

Pokud by tato podmínka nebyla splněna, mohlo by dojít k nesprávné funkci obvodu, například k posunutí výstupního napětí nebo ke zkreslení signálu.

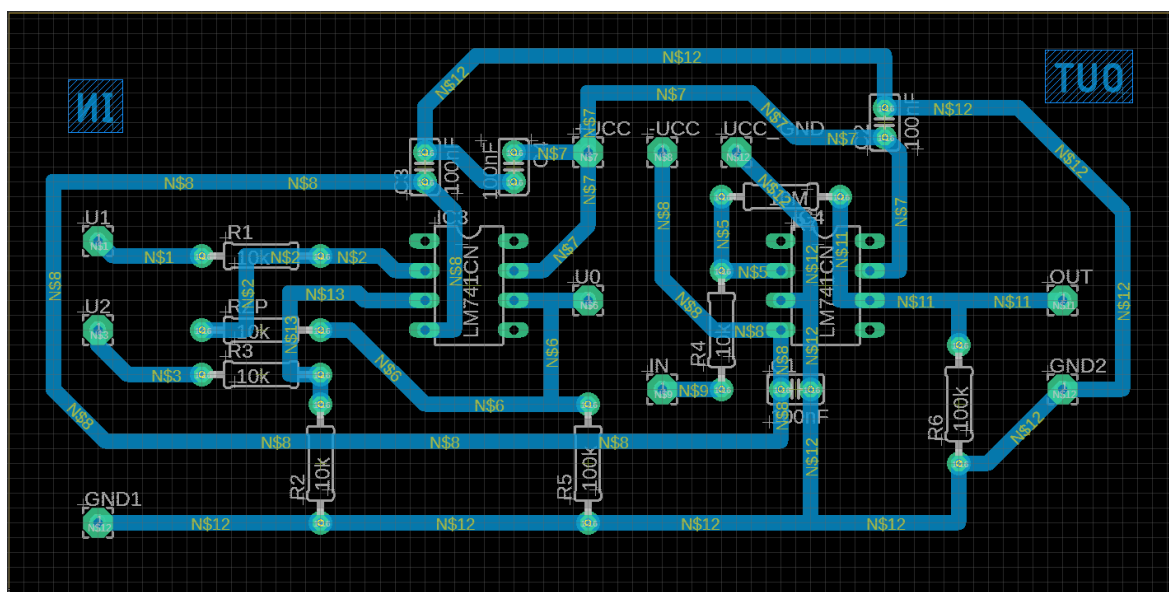
Nakonec jsem se rozhodl, že všechny odpory budou stejné, a to o velikosti 10 k $\Omega$ . Díky takto zvoleným odporům bude na výstupu skutečně jen rozdíl dvou vstupních napětí.

Druhým zapojením na schématu je operační zesilovač s otevřenou zpětnou vazbou, který se chová téměř jako „ideální“ zesilovač. V teorii by měl mít nekonečně velké zesílení, což znamená, že i velmi slabý vstupní signál by mohl způsobit obrovskou změnu na výstupu. V praxi to ale není úplně možné, protože žádná součástka není dokonalá a takové zapojení by se nedalo běžně použít, například pro měření.

Abych tomu předešel a obvod byl lépe ovladatelný, přidal jsem odpor do zpětné vazby. Tento odpor omezuje zesílení na rozumnou úroveň a pomáhá obvodu správně fungovat. Zvolil jsem odpor s velmi vysokou hodnotou 10 M $\Omega$ , což znamená, že zesílení je stále extrémně vysoké, ale ne „nekonečné“.

Díky tomuto odporu se obvod chová podobně jako běžné invertující zapojení, jen s velmi silným zesílením. To znamená, že i malá změna vstupního napětí se na výstupu projeví jako velký rozdíl. Takové zapojení může být užitečné například pro zesílení velmi slabých signálů nebo jako součást obvodů, které detekují změny napětí. Na druhou stranu, kvůli vysokému zesílení je toto zapojení také hodně citlivé na rušení, takže je důležité brát to při použití v úvahu.

Finální návrh druhé desky plošného spoje:

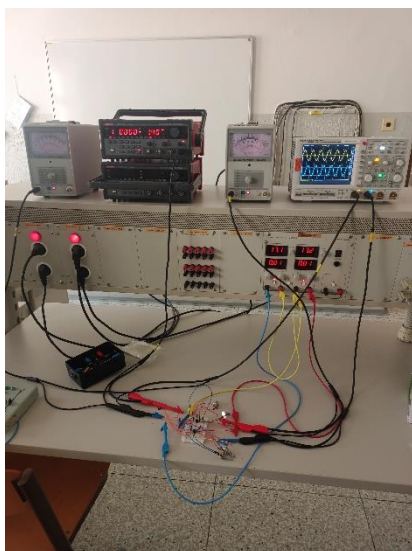


Obr. 7 – deska plošného spoje pro rozdílové zapojení a zapojení s otevřenou zpětnou vazbou v programu EAGLE

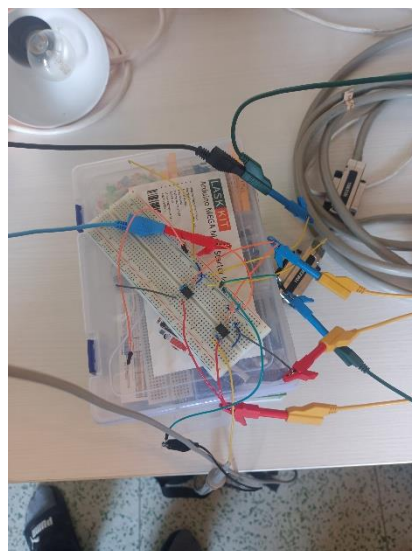
### 3.3. Proměřování prototypu

Než jsem se pustil do samotné výroby desek, bylo nejprve nutné všechny součástky důkladně otestovat a proměřit, abych měl jistotu, že obvod bude správně fungovat. Toto testování mi pomohlo odhalit případné chyby v zapojení a ověřit, zda jednotlivé komponenty pracují tak, jak mají. Pro měření a kontrolu jsem používal školní měřicí přístroje, které mi umožnily přesně sledovat hodnoty napětí, proudu a dalších důležitých parametrů obvodu.

Abych mohl snadno provádět úpravy a testovat různé varianty zapojení, rozhodl jsem se použít nepájivé pole (breadboard). Tento typ desky umožňuje rychlé sestavení obvodu bez nutnosti pájení, což znamená, že jakékoli změny v zapojení lze provést okamžitě a bez složitého přepracovávání celého návrhu. Pokud jsem tedy potřeboval například vyměnit odpor za jinou hodnotu nebo upravit propojení součástek, stačilo jen přehodit vodiče a mohl jsem pokračovat v testování.



*Obr. 8 – měření prototypu invertujícího a neinvertujícího zapojení*



*Obr. 9 – měření prototypu rozdílového zapojení a zapojení otevřené zpětné vazby*

Testovací měření proběhlo velmi úspěšně a potvrdilo, že většina návrhu funguje podle očekávání. Naštěstí se na prototypy neobjevily žádné závažné chyby, které by vyžadovaly zásadní úpravy. Přesto jsem během testování narazil na několik drobných problémů, které bylo potřeba doladit, zejména pokud šlo o správné nastavení hodnot některých odporů.

Nejvýznamnější úpravu jsem musel provést u zapojení s otevřenou zpětnou vazbou a u vstupního odporu invertujícího zapojení. Původně jsem plánoval pro otevřenou zpětnou vazbu použít odpor o velikosti  $1\text{ M}\Omega$ , což nebyla vyloženě špatná volba, ale výsledky nebyly úplně ideální. Po několika testech a porovnáních jsem se rozhodl hodnotu tohoto odporu zvýšit na  $10\text{ M}\Omega$ , což vedlo k výrazně lepším výsledkům. Díky této změně se zesílení obvodu dostalo na vhodnější úroveň a celkové chování zapojení se stabilizovalo. U invertujícího zapojení nastal problém u zesílení  $40\text{ dB}$ , na které se šlo špatně dostat. Důvodem byla nižší kvalita potenciometrů. Na maximálním nastaveném odporu nemají přesně  $100\text{ k}\Omega$ , ale hodnoty mezi  $88$  až  $94\text{ k}\Omega$ . Kvůli tomu jsem se rozhodl změnit odpor na vstupu z  $1\text{ k}\Omega$  na  $500\text{ }\Omega$ . Díky této změně se na zesílení  $40\text{ dB}$  dostaneme mnohem snáze.

Tyto drobné úpravy ukázaly, jak důležité je provést pečlivé testování před finální výrobou. I když se návrh zdál na první pohled správný, až praktická zkouška

na prototypu odhalila detaily, které bylo nutné upravit pro dosažení optimálního výkonu obvodu.

### **3.4. Tvorba desek plošného spoje**

#### **3.4.1. Leptání desek**

Po dokončení návrhu a úspěšném ověření jeho funkčnosti prostřednictvím testovacího měření jsem se konečně mohl pustit do výroby samotných desek plošného spoje. Tento proces zahrnoval několik klíčových kroků, které bylo nutné provést s maximální pečlivostí, aby výsledné desky odpovídaly původnímu návrhu a správně fungovaly.

Prvním krokem při výrobě plošného spoje bylo připravit si vhodnou cuprexitovou desku. Nejprve jsem si tedy musel odříznout kus desky, který přibližně odpovídal rozměrům navrženého plošného spoje. Přesná velikost je důležitá, aby se deska pohodlně vešla do leptací lázně a zároveň aby na ní nebylo zbytečně mnoho nevyužitého materiálu. Po odříznutí následovalo důkladné očištění a obroušení povrchu desky, což jsem provedl pomocí jemného smirkového papíru. Tento krok je klíčový, protože odstraní oxidaci a případné nečistoty, které by mohly ovlivnit přenos návrhu na desku.

Po důkladném obroušení jsem se musel zbavit i možných mastnot, které by mohly bránit přilnutí fotocitlivé vrstvy. K tomu jsem použil teplou vodu s mýdlem, díky čemuž jsem povrch dokonale odmastil. Po tomto kroku je velmi důležité na desku už nesahat holýma rukama, protože by se na ni mohly přenést další nečistoty nebo mastnota z pokožky, což by mohlo negativně ovlivnit celý proces. Takto připravenou desku jsem položil na rovnou plochu a rovnoměrně ji postříkal pozitivním lakem. Následně jsem ji nechal vytvrdit při teplotě přibližně 70 °C po dobu 15 minut.

Jakmile byla deska vytvrzená, bylo nutné na její povrch přenést návrh vodivých cest. K tomu jsem použil UV osvit, ale předtím bylo třeba mít návrh plošného spoje připravený v odpovídajícím měřítku 1:1. Tento návrh jsem vytiskl na běžný papír a následně ho natřel speciálním transparentním roztokem, který způsobí, že bílá část papíru se stane průsvitnou, zatímco černé cesty zůstanou neprůsvitné. Takto připravený návrh jsem pečlivě umístil na desku a společně s ní ho vložil pod UV lampu na dobu přibližně šesti minut. Během tohoto procesu se motiv cest „vtiskl“ do světlocitlivé vrstvy na desce.

Po osvitu následoval další důležitý krok – vyvolání návrhu v alkalické lázni. K tomu jsem použil sedmiprocentní roztok hydroxidu sodného (NaOH), do kterého jsem desku opatrně ponořil. Tento proces je poměrně rychlý a vyžaduje pečlivé sledování, aby deska v lázni nezůstala příliš dlouho. Pokud by tam byla ponechána příliš dlouhou dobu, mohlo by dojít ke ztrátě částí návrhu a tím k poškození celého spoje. V případě, že se něco nepovede nebo je návrh nečitelný, lze desku omýt a celý postup opakovat od začátku. Dokud se nezačne leptat, je možné proces přenosu návrhu provádět opakovaně, což umožňuje opravy a doladění, než přejdu k finálnímu leptání.

Poté, co jsem dokončil všechny předchozí kroky a ujistil se, že je návrh na desce správně vyvolaný, jsem se mohl pustit do samotného leptání. Tento krok je jedním z nejdůležitějších v celém procesu výroby plošného spoje, protože právě při něm se z desky odstraní přebytečná měď a zůstanou pouze požadované vodivé cesty. K leptání jsem použil leptací roztok chloridu železitého ( $\text{FeCl}_3$ ), který je běžně využíván pro tuto metodu díky své schopnosti efektivně odstraňovat měď.

Samotný proces leptání je ve srovnání s vyvoláváním návrhu výrazně delší a vyžaduje trpělivost i zvýšenou pozornost. Doba leptání závisí na několika faktorech, jako je koncentrace roztoku, teplota nebo pohyb desky v lázni. Pokud je leptací lázeň příliš studená, může se proces značně zpomalit, zatímco při vyšších teplotách probíhá rychleji, ale zároveň hrozí riziko nechtěného odleptání i těch částí, které by měly zůstat zachované. Proto je dobré občas desku z roztoku vyjmout a zkontrolovat stav leptání.

Pokud by se během leptání stalo, že se odleptá nějaká část, která měla zůstat zachována, existují v podstatě dvě možnosti, jak situaci řešit. První a nejradikálnější možností by bylo vytvoření zcela nové desky a opakování celého postupu od začátku, což je sice nejčistší řešení, ale také časově náročné. Druhou možností, kterou lze v některých případech využít, je oprava poškozených cest pomocí cínu. Tato metoda spočívá v tom, že se poškozené nebo přerušené cesty překlenou pájkou, čímž se spoj obnoví. Většinou se pro usnadnění používá kousek měděného drátku, na který se cín může lépe přichytit.

I když takto opravená deska nemusí vypadat esteticky dokonale, ve většině případů tato oprava nijak negativně neovlivní funkčnost obvodu. Pokud je spoj správně opraven a vodivost cesty obnovena, může deska bez problémů plnit svou funkci. Nicméně je vždy lepší se podobným problémům vyhnout pečlivou kontrolou během

leptání, aby nebylo nutné dodatečně zasahovat do již hotové desky. Hotové desky musíme ještě očistit alkoholem a zalakovat, abychom předešli oxidaci cest.

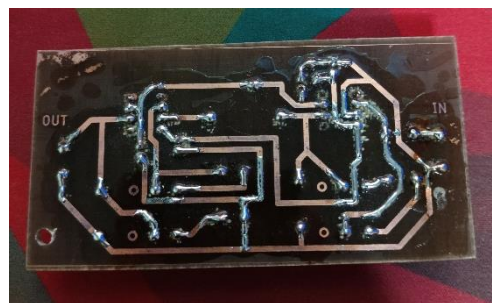
### 3.4.2. Vrtání a pájení desek

Abychom mohli osadit vyleptané desky, musíme do nich nejdříve vyvrtat díry pro dané součástky. Při vrtání je důležité si zkontrolovat, zda máme správný vrták a jestli je vrták dostatečně ostrý. Pokud by vrták byl moc tupý, mohl by při vrtání poškodit nebo zcela zničit plošku mědi, kam chceme součástku zapájet.

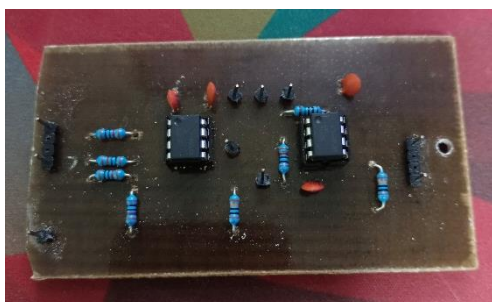
Po vyvrtání děr jsem si ještě zkontroloval, zda jsem na nějakou nezapomněl, abych nepřipájel většinu součástek a na konci jsem nezjistil, že mi nějaká chybí. Bylo by pak velmi obtížné ji dovrtávat zpětně bez poškození nějakých součástek. Nakonec už jsem jenom napájel součástky na správná místa a zkontroloval pájení, jestli mi tam nevznikli nějaké studené spoje.



*Obr. 10 – horní strana první  
desky plošného spoje*



*Obr. 11 – dolní strana první  
desky plošného spoje*



*Obr. 12 – horní strana druhé  
desky plošného spoje*



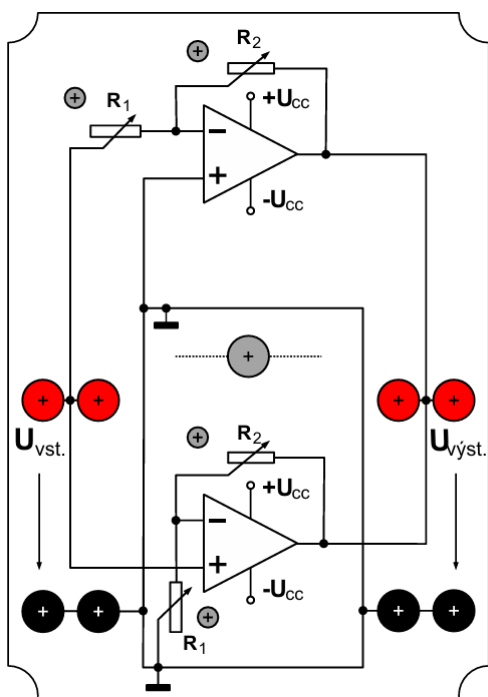
*Obr. 13 – dolní strana druhé desky  
plošného spoje*

### 3.5. Návrh potisků pro přípravky

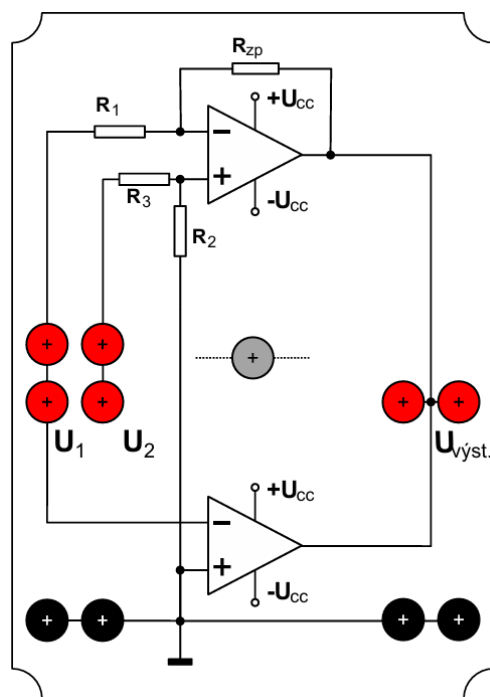
Než jsem mohl začít připravovat přípravky pro kompletaci, musel jsem nejdříve navrhnout potisk, který dám na vršek krabice. Návrh jsem se rozhodl navrhnout v programu Affinity. Program se velmi podobá programu Photoshop, ale je levnější, a dokonce jsme se v něm učili na naší škole.

Když jsem začal navrhovat potisk, tak mi došlo, že celý přípravek bude muset být na výšku, a ne na šířku, jak jsem původně plánoval. Schémata zapojení by se nad sebe nevešla, pokud by přípravek byl orientován na šířku. Hlavní věci, co jsem potřeboval vidět z potisku byla umístění konektorů, přepínačů a potenciometrů.

Finální návrhy vypadají takto:



Obr. 14 – Potisk přípravku s invertujícím a neinvertujícím zapojením



Obr. 15 – Potisk přípravku s rozdílovým zapojením a zapojením s otevřenou zpětnou vazbou

Červená kolečka znázorňují místa, kde budou červené konektory a černá kolečka zase kde budou černé konektory. Malá šedá kolečka jsou pozice potenciometrů a velká kolečka uprostřed nám říkají kde budou přepínače.

### 3.6. Kompletace přípravků

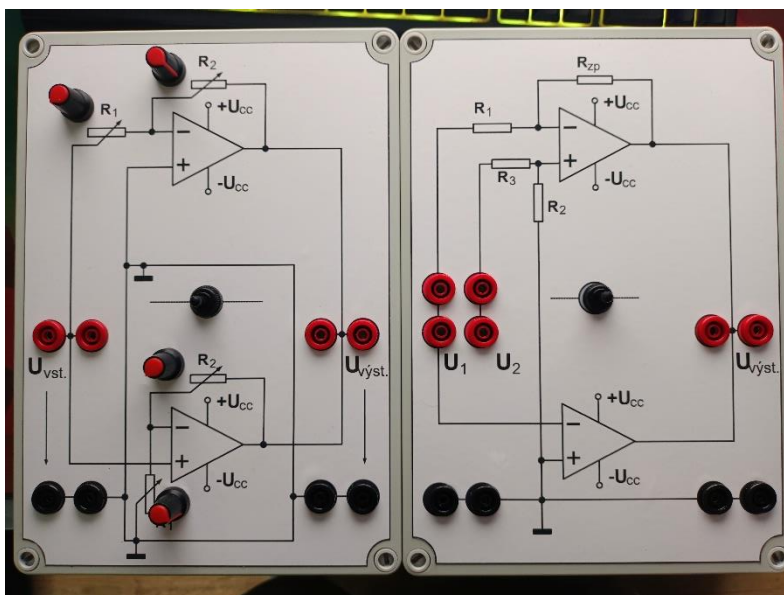
S hotovými návrhy potisků jsem se mohl konečně pustit do kompletování přípravků. Oba přípravky jsem sestavoval stejným způsobem, aby byl proces co nejjednodušší a výsledné zařízení vypadalo jednotně. Nejdříve jsem si nechal ve škole vytisknout na lepicí papír potisky, které jsem následně vyřezal podle černých krajních linek. Tento krok byl důležitý pro zajištění přesnosti při lepení na krabice, aby výsledný vzhled byl co nejestetičtější. Po pečlivém nalepení potisků jsem si podle naznačených míst vyvrtal otvory odpovídajících rozměrů, aby bylo možné snadno namontovat jednotlivé komponenty.

Do nově vzniklých děr jsem postupně namontoval všechny potřebné prvky. Nejprve jsem připevnil konektory, následně potenciometry a nakonec přepínače. Správné rozmístění těchto součástek bylo klíčové pro pohodlné ovládání celého přípravku. Kromě těchto prvků jsem musel také na víko krabice umístit konektory pro napájení zesilovačů. Rozhodl jsem se je umístit z boku víka, aby byly dobře dostupné a zároveň aby byly esteticky vycentrovány. Díky tomu jsou konektory snadno přístupné, ale zároveň nepřekázejí při používání zařízení.

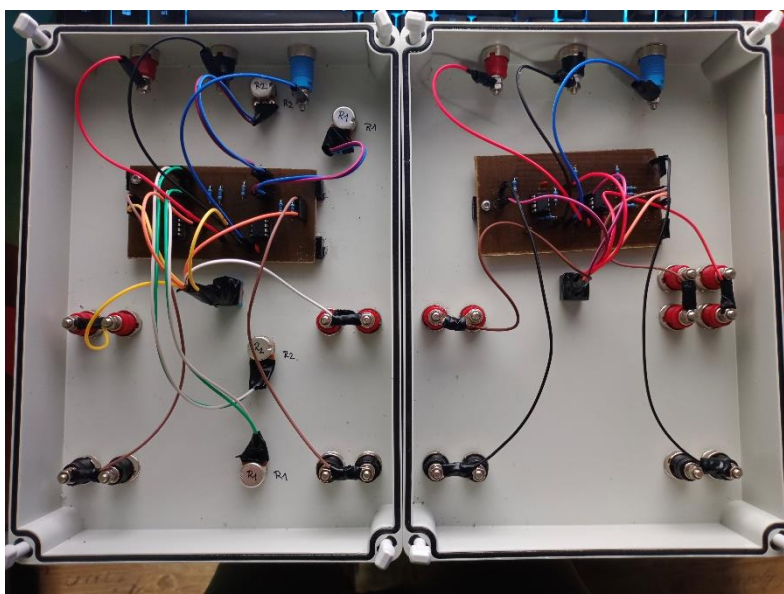
Po dokončení přípravy krabičky jsem musel vyřešit ještě jeden důležitý problém – připevnění desek plošných spojů uvnitř krabice. Nejprve jsem plánoval použít stejnou metodu jako u předešlých přípravků, tedy klasické upevnění pomocí šroubů a matic. Nakonec mě však napadlo použít jiný způsob, inspirovaný upevněním SSD disků v počítačových skříních. Tento systém je velmi jednoduchý a umožňuje snadnější manipulaci s deskou. Na jedné straně jsou připevněny dvě plošky, do kterých se deska zasune, a na druhé straně je jedna ploška s otvorem pro šroub, která společně se zabudovanou matkou umožňuje pevné zajištění desky jediným šroubkem. Díky tomuto řešení lze desku kdykoliv snadno vyjmout bez složité demontáže celého přípravku. Všechny upevňovací plošky byly vytištěny na 3D tiskárně (viz. Příloha VII a Příloha VIII) a přilepeny vteřinovým lepidlem.

Posledním krokem bylo propojení desky s krabicí a jejími ovládacími prvky. Aby byla údržba přípravku co nejjednodušší, rozhodl jsem se nepájet konektory na desku přímo, ale propojit je pomocí připojovacích kabelů. Na desce jsem připájel piny, do kterých se tyto kabely snadno zasunují. Toto řešení umožňuje rychlé odpojení a výměnu desky

v případě potřeby, například při poruše nebo úpravě zapojení. Opravy a údržba tak budou mnohem jednodušší, než kdyby byly kabely pevně připájeny.



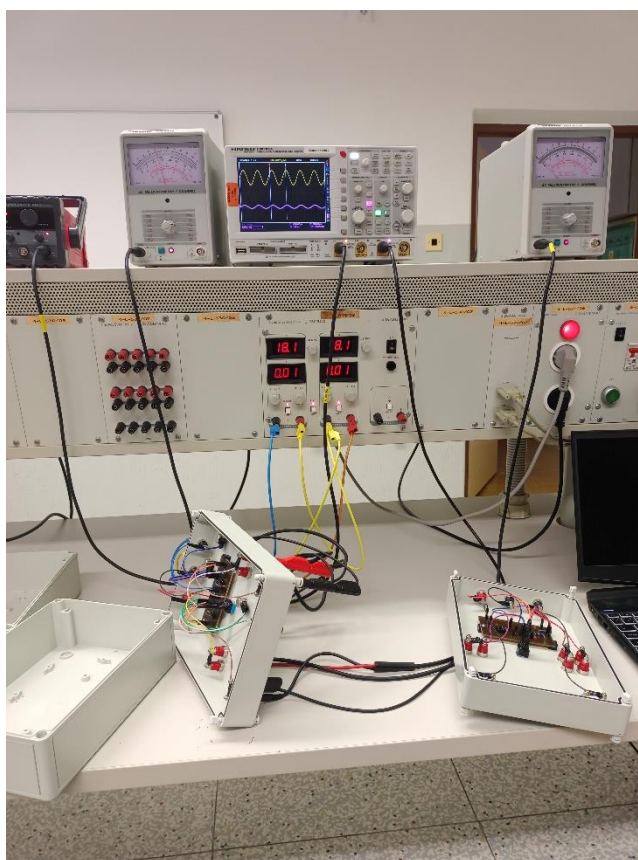
Obr. 16 – uzavřené přípravky



Obr. 17 – otevřené přípravky

### 3.7. Měření hotových přípravků

Jakmile jsem měl všechno prakticky hotové, zbývalo už jen poslední ověření, že přípravky skutečně fungují podle očekávání. Tento krok byl velmi důležitý, protože i přes pečlivou výrobu a montáž se mohly vyskytnout drobné chyby, které by mohly ovlivnit správnou funkčnost. Samotné měření probíhalo téměř identicky jako při testování prvních prototypů, kdy jsem ověřoval jednotlivé části zapojení. Postupně jsem změřil všechna zapojení, zkontroloval jejich parametry a porovnal výsledky s očekávanými hodnotami.



*Obr. 18 – finální měření na hotových přípravcích*

Během tohoto měření jsem narazil jen na několik drobných chyb, které naštěstí nebyly složité na opravu. Jednou z nich bylo nesprávné zapojení vývodů z přepínače, které byly otočené. Tuto chybu jsem snadno napravil jednoduše tím, že jsem přepínač povolil, otočil do správné polohy a znovu upevnil.

## 4. Závěr

Cílem této maturitní práce bylo opravení, vylepšení a rozšíření jak přípravků, tak i samotného protokolu měření. I když jsem před tím zkoušel nějaké menší projekty, tak mi tato maturitní práce ukázala, že i triviálně znějící zadání jako bylo toto, může nakonec být velmi obtížné. Dost dlouho jsem strávil jen nad výběrem vhodného operačního zesilovače. První, který vypadal jako ideální kandidát, se těsně před nákupem součástek ukázal jako špatná volba hlavně z důvodu, že neměl symetrické napájení. To jsem chtěl na vybraném operačním zesilovači ponechat, protože se na naší škole vyučuje, že operační zesilovače jsou napájeny právě symetrickým napájením. Toto byl jen jeden z mnoha hrbolů, které mě během této maturitní práce čekalo.

Dalo by se říct, že hnedka dalším hrbolem, byla tvorba desek. První deska mi trvala tři pokusy, než se mi jí podařilo správně a dostatečně vyvolat. Leptání na ní poté nebyl žádný problém. To samé se bohužel nedá říct o desce druhé. Druhou desku jsem bez problémů na první pokus vyvolal, ale jakmile došlo k leptání, už od začátku bylo zřejmé, že je něco špatně. Deska se v prostřední části docela dobře, a i rychle vyleptala, ale na okrajích bylo stále dost mědi. Nakonec i po dlouhém leptání, kde jsem značnou část času držel desku já a snažil se dostat leptací kapalinu na místa, kde bylo třeba, jsem desku musel vyndat nedoleptanou a s velkým množstvím poškozených cest. Téměř polovinu desky jsem musel vlastnoručně odbrousit a všechny cesty pocínovat, aby deska byla vůbec funkční. Naštěstí to stačilo, a i když deska vzhledově nevypadá úplně nejlépe, svou funkci splňuje bez jakýchkoliv problémů.

Taky se mi podařilo zničit jeden přepínač během přepravy do školy. I když to nezní příliš dobře, tak to byl problém naštěstí malý. V místním obchodě jsem dokázal sehnat úplně stejný model přepínače, takže stačilo jenom odpájet a odmontovat starý a přidělat nový.

Na úplný závěr bych podotkl to, že jestli bych dělal podobnou práci znova, tak bych udělal všechno úplně stejně, až na desky plošných spojů. Ty už bych nevyráběl leptáním, ale nechal bych si je na zakázku vyrobit a poslat. Hlavním důvodem tohoto rozhodnutí je hlavně spolehlivost vytvořených desek. Na dnešní dobu leptání zabírá dost práce a času, ale spolehlivost vyleptání desky není taková, jakou bych si představoval.

## 5. Zdroje

*Základní zapojení s operačními zesilovači.* Online. Eluc. Dostupné

z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/invertujici-zapojeni-operacniho-zesilovace>. [cit. 2025-03-29].

*Neinvertující zapojení operačního zesilovače.* Online. Eluc. Dostupné

z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/neinvertujici-zapojeni-operacniho-zesilovace>.

[cit. 2025-03-29].

*Rozdílové zapojení operačního zesilovače.* Online. Eluc. Dostupné

z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/rozdilove-zapojeni-operacniho-zesilovace>. [cit. 2025-03-29].

*OPERAČNÍ ZESILOVAČE.* Online. Informační Systém Masarykovy Univerzity. Dostupné

z: [https://is.muni.cz/el/sci/jaro2015/F6270/um/Operacni\\_zesilovace\\_navod.pdf](https://is.muni.cz/el/sci/jaro2015/F6270/um/Operacni_zesilovace_navod.pdf).

[cit. 2025-03-29].

## 6. Citace

- [1] OPERAČNÍ ZESILOVAČE. Online. 2015. Dostupné z:  
[https://is.muni.cz/el/sci/jaro2015/F6270/um/Operacni\\_zesilovace\\_navod.pdf](https://is.muni.cz/el/sci/jaro2015/F6270/um/Operacni_zesilovace_navod.pdf).  
[cit. 2025-03-27].

## **7. Přílohy**

(uvedeny v souboru Přílohy)

**Příloha I:** 4\_Měření\_na\_OZ\_MM – vzorový protokol

**Příloha II:** invertujici\_neinvertujici\_BRD

**Příloha III:** invertujici\_neinvertujici\_SCH

**Příloha IV:** LM741

**Příloha V:** rozdilovy\_otevrena\_zp\_vazba-2\_BRD

**Příloha VI:** rozdilovy\_otevrena\_zp\_vazba-2\_SCH

**Příloha VII:** sroub

**Příloha VIII:** zarazka