



Středoškolská technika 2024

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Vytvoření přípravku pro měření parametrů operačních zesilovačů

Creation of device for measuring parameters operational amplifiers

Šimon Frómel

Střední škola elektrotechnická,
Tyršova 781, Lipník nad Bečvou

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 12: Tvorba učebních pomůcek, didaktická technologie

VYTVOŘENÍ PŘÍPRAVKU PRO MĚŘENÍ PARAMETRŮ OPERAČNÍCH ZESILOVAČŮ

Šimon Frómel

Olomoucký kraj

Lipník nad Bečvou 2024

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 12: Tvorba učebních pomůcek, didaktická technologie

VYTVOŘENÍ PŘÍPRAVKU PRO MĚŘENÍ PARAMETRŮ OPERAČNÍCH ZESILOVAČŮ

CREATION OF DEVICE FOR MEASURING PARAMETERS OPERATIONAL AMPLIFIERS

Autor: Šimon Frömel
Škola: Střední škola elektrotechnická, Tyršova 781,
751 31, Lipník nad Bečvou
Kraj: Olomoucký
Konzultant: Ing. Lukáš Kozíel

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Lipníku n. Bečvou dne: 26. 3. 2024

Šimon Frömel

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce panu Ing. Lukáši Kozielovi za podnětné nápady a stylistické připomínky. Děkuji panu Ing. Petru Hronkovi za pomoc při realizaci a manufakturační desky plošných spojů a výtisk ochranné krabičky. Děkuji panu Ing. Miroslavovi Chyškovi za podnětné nápady a připomínky pro návrh desky plošných spojů a dodání osazovaných součástek. Děkuji paní Ing. Miladě Figalové za podnětné návrhy a připomínky k stylistickým úpravám a vedení práce pro soutěž SOČ. Děkuji mému otci za kreativní nápady a řešení při spolupráci na výrobě přípravku.

Anotace

Cílem práce je vytvoření nového moderního přípravku pro měření parametrů operačních zesilovačů za účelem rozšíření obsahu praktického vyučování ve specializovaných laboratořích. Předmětem práce je také vypracování výukových materiálů a zadání konkrétních měřících úloh. Přípravek včetně měřících úloh a výukových materiálů bude použitý pro doplnění příslušného tematického celku předmětu Elektrická měření na Střední škole elektrotechnické v Lipníku nad Bečvou.

Klíčová slova

Parametry operačních zesilovačů; měřící úlohy pro výuku; DPS; 3D tisk

Anotation

The thesis aims to create a new modern device for measuring the parameters of operational amplifiers to expand the content of practical teaching in specialized laboratories. The subject of the work is also the development of teaching materials and the assignment of specific measuring tasks. The preparation, including measurement tasks and teaching materials, will be used to supplement the relevant thematic unit of the subject of Electrical Measurements at the Secondary School of Electrical Engineering in Lipník nad Bečvou.

Key words

Parameters of operational amplifiers; measuring tasks for teaching; PCB; 3D printing

Obsah

ÚVOD.....	9
TEORETICKÁ ČÁST	10
1 OPERAČNÍ ZESILOVAČ – STRUKTURA, PRINCIP, VLASTNOSTI	10
1.1 ZÁKLADNÍ DEFINICE	10
1.2 CHARAKTERISTIKA IN/OUT PINŮ	10
1.3 ZÁKLADNÍ ZAPOJENÍ A POJMENOVÁNÍ POTENCIÁLŮ	11
1.4 VLASTNOSTI IDEÁLNÍHO OPERAČNÍHO ZESILOVAČE	11
1.5 VLASTNOSTI REÁLNÉHO OPERAČNÍHO ZESILOVAČE	12
1.6 PARAMETRY OPERAČNÍHO ZESILOVAČE.....	13
1.6.1 Statické parametry	13
1.6.2 Dynamické parametry	13
1.6.3 Chybové parametry	13
1.7 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA.....	14
2 ANALÝZA PARAMETRŮ – TEORIE, VÝPOČTY, DŮVOD	15
2.1 MĚŘENÍ CHYBOVÝCH PARAMETRŮ.....	15
2.1.1 Vstupní klidové proudy I_B^+ , I_B^- a I_B	15
2.1.2 Vstupní proudová nesymetrie I_{OS}	17
2.1.3 Vstupní napěťová nesymetrie U_{OS}	18
2.2 MĚŘENÍ STATICKÝCH PARAMETRŮ	19
2.2.1 Zesilovací činitel a zisk, A , a	19
2.2.2 Poměr potlačení souhlasného režimu CMRR	21
2.3 MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH PARAMETRŮ	22
2.3.1 Rychlost přeběhu SR	22
2.3.2 Frekvenční charakteristika, parametry B , GBP a UGB	23
PRAKTICKÁ ČÁST	25
3 REALIZACE PŘÍPRAVKU – KONSTRUKCE A POPIS PŘÍPRAVKU.....	25
3.1 POSTUP REALIZACE	25
3.2 POPIS PŘÍPRAVKU	26
3.2.1 Hlavní deska plošných spojů	26
3.2.2 Celkový navigační plánec.....	29
3.2.3 Ochranná krabička.....	30
3.3 SEZNAM KOMPONENTŮ POUŽITÝCH NA PŘÍPRAVKU	32
4 MĚŘÍCÍ ÚLOHY DO VÝUKY – ZADÁNÍ, POSTUP, PRAVIDLA	33
4.1 MĚŘENÍ ZESILOVACÍHO Činitele a zisku + ÚVOD	34
4.2 MĚŘENÍ VSTUPNÍCH KLIDOVÝCH PROUDŮ A PROUDOVÉ NESYMETRIE	37
4.3 MĚŘENÍ POMĚRU POTLAČENÍ SOUHLASNÉHO REŽIMU A NAPĚŤOVÉ NESYMETRIE	39
4.4 MĚŘENÍ RYCHLOSTI PŘEBĚHU	42
4.5 MĚŘENÍ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY.....	44
ZÁVĚR.....	47
5 SEZNAM ZKRATEK.....	48
6 SEZNAM SCHÉMATICKÝCH ZAPOJENÍ, OBRÁZKŮ, ROVNIC A TABULEK	49
6.1 SEZNAM SCHÉMATICKÝCH ZAPOJENÍ	49
6.2 SEZNAM ROVNIC	49

6.3	SEZNAM OBRÁZKŮ	50
6.4	SEZNAM TABULEK	50
7	BIBLIOGRAFICKÝ ZÁZNAM	51
8	SEZNAM PŘÍLOH	53
9	PŘÍLOHY.....	I

Úvod

Hlavním cílem mé práce je doplnění současného vybavení pro elektrotechnická laboratorní praktika, která slouží studentům pro praktická měření. Konkrétně se jedná o vytvoření přípravku pro měření parametrů operačních zesilovačů, což ve vybavení laboratoří v současné době chybí. Domnívám se, že schopnost práce s operačními zesilovači je v elektrotechnickém oboru nepostradatelná. Nedílnou součástí práce je vytvoření doprovodného návodu k obsluze přípravku a zejména vypracování teoretických materiálů včetně sad zadání měřících úloh do příslušných vyučovacích hodin.

Práce SOČ je rozčleněna na dvě části, a to na praktickou a teoretickou. V teoretické části se věnuji základním principům funkce operačního zesilovače a dále i detailní analýze vybraných parametrů. Teoretická část zároveň slouží jako praktická pomůcka v podobě teoretických materiálů pro individuální přípravu žáků na konkrétní měřící úlohy. V praktické části jsou právě tyto vybrané parametry postupně strukturovány do konkrétních měřících úloh, které jsou nadále v hodinách praktického předmětu Elektrická měření probírány. Součástí mé práce je vytvoření kompletního návrhu desky plošných spojů, návrhu modelu krabičky a sestrojení navigačního plánu. Následuje návrh postupu realizace přípravku včetně jeho otestování.

Motivací pro mě bylo vyzorované nedostatečné „nadšení“ mých spolužáků při studiu zvoleného oboru. Ať už je jejich důvod jakýkoliv, snažím se, aby moje práce vykazovala určité prvky hravosti a zejména zvědavosti. Tuto snahu dále podporuji zakomponováním vlastních intuitivních schématických zapojení. Ta původní byla často převzata z různých zdrojů, proto nebyla jednotná.

Další, mnohem ambicióznější a osobní motivací, je „zapsání se do historie školy“. Ať už se bude jednat o uvedení mého autorství u přípravku, který bude sloužit jako pomůcka v předmětu Elektrická měření, nebo o snahu uspět v soutěži SOČ. Obojí rozhodně může přispět k mému rozvoji v rámci studia zvoleného oboru.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Operační zesilovač – struktura, princip, vlastnosti

Operační zesilovač je elektronické zařízení ve formě IO. Zesiluje nebo zeslabuje vstupní signál. Struktura operačního zesilovače je tvořena pasivními prvky, jako jsou rezistory a kondenzátory, a aktivními prvky, jakými jsou tranzistory bipolární, a unipolárními tranzistory typu JFET nebo MOSFET. (Zemánek 2015)

V běžném IO operačním zesilovači je přibližně 10 až 30 tranzistorů, které tvoří jednotlivé zesilovací stupně. Běžně je tvořen 3 zesilovacími stupni. První stupeň je vstupní diferenční zesilovač s velkým zesílením vstupů $+U_{IN}$ a $-U_{IN}$ a vysokým vstupním odporem. Proto je před výstupem tohoto zesilovače strukturován jeden nebo případně několik tzv. proudových zrcadel, které zesilují proud. Struktura je zakončena výstupním zesilovačem, který zajišťuje, že výstupní signál je dostatečně zesílen a správně řízen, aby odpovídal signálu tvořenému parametry operačního zesilovače. (Zemánek 2015)

Operační zesilovače jsou jedním ze stavebních bloků v oblasti elektroniky. Hlavní síla spočívá ve velmi jednoduchém a přesném zvýšení amplitudy signálu, která je zapotřebí v zařízeních pracujících s analogovým signálem, jako je audiotechnika, elektronické filtry a v medicínské technice, kde je kritickým bodem kvalita zpracovaného signálu. To ale neznamená, že se nevyužívá i v digitálních soustavách. Operační zesilovače mohou sloužit také jako převodník analogového signálu právě na digitální, který je pak využíván v číslicové technice. Oblastmi pro digitální signály, kde se využívá, je automatizace, robotika a ovládání zařízení. (Zemánek 2015)

1.1 Základní definice

Operační zesilovač přijímá vstupní signál, který zesiluje na základě hodnoty daného zesilovacího činitele $[A]$, ten je dán poměrem rozdílu výstupního napětí oproti zemi $[\Delta U_{OUT}]$ a rozdílem napětí mezi invertující a neinvertující větví $[\Delta U_{IN}]$ (Rovnice 9:). Na výsledném signálu se také podílí frekvence a napěťová a proudová nesymetrie. (Zemánek 2015)

1.2 Charakteristika IN/OUT pinů

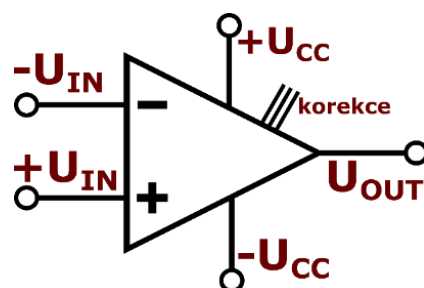
Invertující vstup $[-U_{IN}]$: Dojde k posunutí fáze zesíleného výstupního signálu o 180° , neboli převrácení signálu.

Neinvertující vstup $[+U_{IN}]$: Nedochází k žádnému posunutí fáze na výstupu.

Napájecí vstupy $[+U_{CC}$ a $-U_{CC}]$: Musí být symetrické a v požadovaných hodnotách: ($\pm 15V$; $\pm 12V$; $\pm 10V$; $\pm 5V$).

U_{OUT} – Výstupní napětí oproti zemi.

Vstupy korekce: Některé kvalitnější mají tyto pomocné vstupy, kterými lze upravovat jeho vlastnosti a parametry, především kompenzaci napěťové a proudové nesymetrie a odfiltrování šumu. Taktéž nazývány jako kompenzační vstupy. (Suchý 2020)



Schématické zapojení 1: Základní označení operačního zesilovače.
Foto autor

1.3 Základní zapojení a pojmenování potenciálů

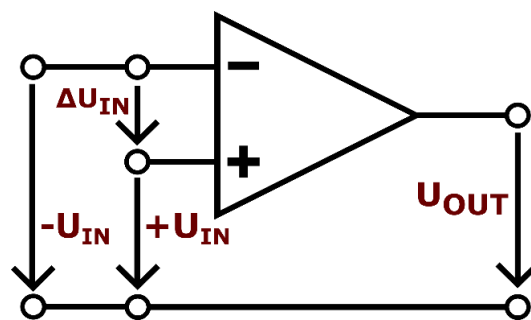
U_{OUT} ... Napětí mezi výstupem a zemí.

ΔU_{IN} ... Rozdíl napětí mezi invertující a neinvertující větví.

$-U_{IN}$... Napětí mezi invertující větví a zemí.

$+U_{IN}$... Napětí mezi neinvertující větví a zemí.

Dalšími parametry, které ovlivňují hodnotu zesilovacího činitele $[A]$, jsou vstupní a zpětnovazební odpory, závislost na frekvenci, odolnost proti šumu a teplotním vlivům. Tyto parametry se podílí na přesnosti a stabilitě operačního zesilovače. (Suchý 2020)



Schématické zapojení 2: Základní zapojení o. z.
Foto autor

1.4 Vlastnosti ideálního operačního zesilovače

Ideální operační zesilovač je takový, který je charakterizován těmito vlastnostmi:

- **Nekonečně velké napěťové zesílení $[A_U = \infty]$:** Možnost libovolného nastavení úrovně zesílení.
- **Nekonečně velký vstupní odpor $[R_{IN} = \infty]$:** Nevznikají ztráty na proudu a nedochází tudíž ke zkreslení signálu.
- **Nulový výstupní odpor $[R_{OUT} = 0]$:** Bez ohledu na zátěž dodává konzistentní a stabilní signál.
- **Nekonečně velká šířka pásma $[B]$:** Neexistuje jakékoliv zpoždění se srovnáním signálu operačního zesilovače.
- **Nulový šum:** Nevytváří žádné rušivé elementy.
- **Parametry nezávisí na teplotě:** Parametry nejsou ovlivňovány momentální teplotou.

V praxi neexistují ideální o. z. Snažíme se k nim ale co nejvíce přiblížit. (Zemánek 2015)

1.5 Vlastnosti reálného operačního zesilovače

Dle Zemánka (2015) jsou charakteristické rysy vlastnostmi operačního zesilovače, dle kterých předpokládáme jeho chování v daných situacích. V praxi se snažíme co nejvíce přiblížit vlastnostem ideálního o. z. Běžné rozsahy parametrů pro reálný operační zesilovač jsou následující:

- **Napět'ové zesílení [A_U]:** Udává, kolikrát se zvětší nebo zmenší výstupní napětí vzhledem k vstupnímu. Zesilovače mají obvykle hodnoty zesílení v rozmezí od ~ 0 do 10^6 .
- **Proudové zesílení [A_I]:** Udává, kolikrát se zvětší nebo zmenší výstupní proud vzhledem k vstupnímu. Podobně jako napět'ové zesílení, i proudové zesílení se pohybuje v rozmezí od ~ 0 do 10^6 .
- **Vstupní odpor [R_{IN}]:** Hodnota odporu na vstupech zesilovače. Ideálně by měl být co největší, ideálně nekonečný, obvykle se pohybuje v rozmezí od $10^9 \Omega$ do $10^{14} \Omega$.
- **Výstupní odpor [R_{OUT}]:** Hodnota odporu na výstupu zesilovače. Ideálně by měl být co nejmenší, ideálně nulový. Obvykle se pohybuje v rozmezí od 1Ω do 10Ω , ale s použitím zpětné vazby lze dosáhnout hodnot v $m\Omega$.
- **Šířka pásma [B]:** Rozsah frekvence, ve kterém je operační zesilovač schopen přenášet signál bez útlumu. Obvykle se pohybuje od 20 Hz do 10 GHz, v závislosti na konkrétním typu operačního zesilovače.
- **Napět'ová nesymetrie [U_{os}]:** Reálná odchylka od ideálního předpokladu, vyjadřující rozdíl mezi vstupy zesilovače. Typicky se vyjadřuje v řádech milivoltů.
- **Proudová nesymetrie [I_{os}]:** Reálná odchylka od ideálního předpokladu, vyjadřující rozdíl mezi vstupy zesilovače. Typicky se vyjadřuje v řádech miliampérů až nanoampérů.
- **Vstupní klidový proud [I_B]:** Je to proud, který je potřebný ke správnému nastavení operačního zesilovače, ačkoli může způsobit zkreslení signálu. Obvykle je však v řádech nanoampérů až pikoampérů.
- **Poměr potlačení souhlasného režimu [$CMRR$]:** Udává míru, jak dobře operační zesilovač potlačuje souhlasný signál na vstupu, vyjádřený v desítkách až stovkách dB.
- **Přeběh [SR]:** Rychlost, s jakou operační zesilovač mění své výstupní napětí v reakci na změnu vstupního napětí. Vyjadřuje se v jednotkách V/ μs . Rychlost změny je zejména důležitá při práci s vysokofrekvenčními signály.
- **Napájecí napětí [$+U_{CC}$] a [$-U_{CC}$]:** Specifikuje napětí potřebné pro provoz operačního zesilovače, s normalizovanými hodnotami jako: $\pm 5 V$, $\pm 12 V$, $\pm 15 V$.
- **Teplotní stabilita:** Udává rozsah teplot, ve kterém si operační zesilovač zachovává své specifické vlastnosti bez deformace a změn. Obvykle se udává v rozmezí od $-40^\circ C$ do $125^\circ C$.

1.6 Parametry operačního zesilovače

Parametry jsou měřené charakteristiky, které popisují vlastnosti a chování operačního zesilovače. Dle parametrů určíme, zda je daný o. z. vhodný pro naši konkrétní aplikaci.

Parametry dělíme do dvou kategorií, jsou buď statické nebo dynamické. Hlavní rozdíl mezi statickými a dynamickými parametry o. z. je implementace frekvenčního spektra a času. Chybové parametry jsou skupiny parametrů, dle kterých upravujeme nastavení o. z. pro budoucí přesnější výsledky.

1.6.1 Statické parametry

Jsou to parametry, které charakterizují o. z. při ustáleném neměnném stavu. Jsou relativně nezávislé na frekvenci signálu. (Hospůdka 2020)

- Napětové zesílení $[A_U]$
- Proudové zesílení $[A_I]$
- Zesilovací činitel $[A]$
- Zisk $[a]$
- Vstupní odpor $[R_{IN}]$
- Výstupní odpor $[R_{OUT}]$
- Vstupní napětová nesymetrie $[U_{OS}]$
- Vstupní proudová nesymetrie $[I_{OS}]$
- Poměr potlačení souhlasného režimu $[CMRR]$

1.6.2 Dynamické parametry

Jsou to parametry, které popisují schopnost o. z. patřičně reagovat na změny vstupního signálu v čase. Jsou velmi citlivé na frekvenci signálu a na období před ustálením signálu. (Hospůdka 2020)

- Šířka pásma $[B]$
- Produkt zesílení a šířky pásma $[GBP]$
- Frekvence jednotkové zesílení $[UGB]$
- Rychlost přeběhu $[SR]$

1.6.3 Chybové parametry

Jsou to parametry, které se zaměřují na popis a jejich porovnání mezi předpokládanou ideální hodnotou a skutečnou reálnou hodnotou. Tyto rozdíly jsou právě měřené chybové parametry, jako jsou dané nesymetrie a odchylky. Vznikají kvůli vnitřní neperfektnosti a nesymetrii daných vnitřních prvků, spojení a teplotních vlivů. (Hospůdka 2020)

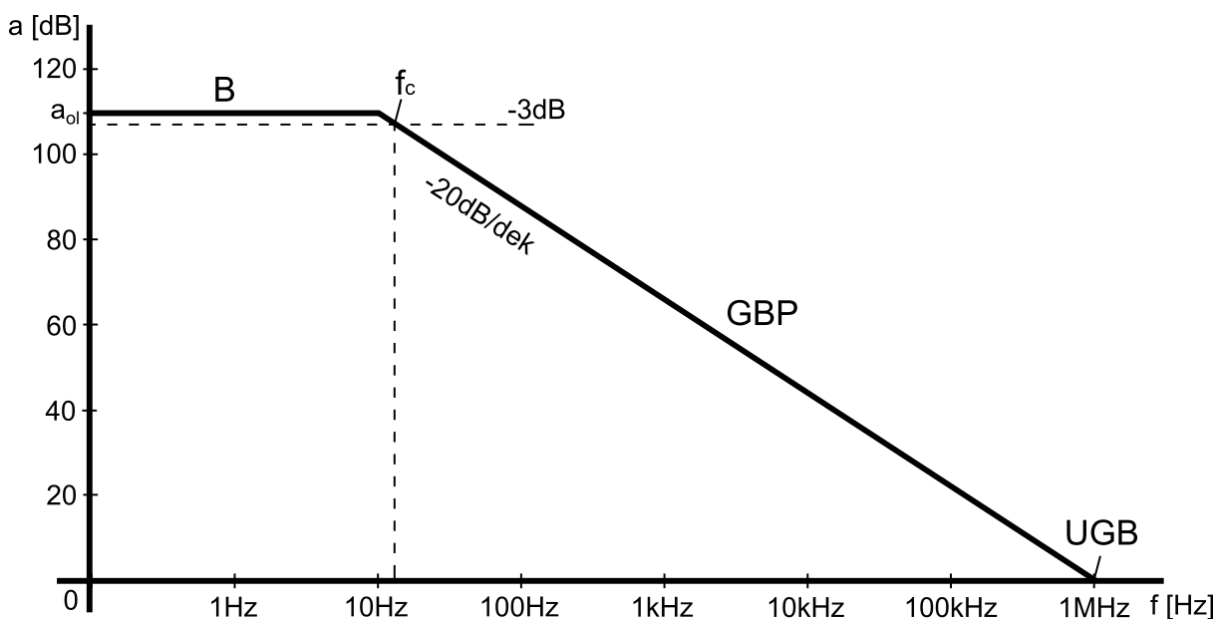
- Vstupní průměrný klidový proud $[I_B]$
- Vstupní klidové proudy $[I_B^+]$ a $[I_B^-]$
- Vstupní proudová nesymetrie $[I_{OS}]$
- Vstupní napětová nesymetrie $[U_{OS}]$

Jednotlivé parametry budu podrobněji rozebírat v dalších kapitolách. Budu zjišťovat samotný smysl a dopad na vlastnosti o. z. pomocí měření na konkrétním příkladě daným postupem měření dle přiložených schémat a výpočtů dle vzorců.

1.7 Frekvenční charakteristika

Frekvenční charakteristika popisuje reakci změny zisku na vstupní frekvenci. Frekvenční charakteristika se vytváří za účelem vyhodnocení výsledného maximálního zisku a posuvu fáze. Charakteristika slouží také jako vizualizace změn zesílení v závislosti na frekvenci signálu. Frekvenční charakteristika je tvořena vertikální osou zisku $[a]$ v jednotkách dB a horizontální osou vstupní frekvence $[f]$ v logaritmickém měřítku v jednotkách Hz. (Williams 2022)

Níže je uvedena frekvenční charakteristika operačního zesilovače se zapojenou zpětnou vazbou v otevřené smyčce. (viz Obrázek 1: Frekvenční charakteristika. Foto autor)



Obrázek 1: Frekvenční charakteristika. Foto autor

Oblast od 0 Hz do tzv. bodu „horní frekvenční meze“ $[f_c]$ se nazývá šířka pásma $[B]$, kde nedochází k útlumu zisku signálu. Po tomto bodě následuje křivka, která klesá ve vztahu 20 dB/dek, což znamená pokles 20 dB za jednu dekádu. Dekáda představuje násobek deseti. Tato oblast se nazývá oblastí produktu zesílení a šířky pásma $[GBP]$. Tato oblast končí v bodě kompletního utlumení a nazývá se bodem frekvence jednotkového zesílení $[UGB]$. Tento bod je při takové frekvenci, při které je zesílení $[A = 1]$, tudíž zisk signálu je $[a = 0 \text{ dB}]$. (Williams 2022)

Šířka pásma $[B]$: Představuje oblast, při které dochází k minimálnímu útlumu a nejvyššího možného zesílení z frekvenční charakteristiky.

Horní frekvenční meze $[f_c]$: Představuje hranici mezi oblastí $[B]$ maximální hodnoty zisku $[a]$ a oblastí $[GB]$, kde dochází k utlumení zisku, kvůli zvyšující se frekvenci. Tento přelom nastává při překročení tolerance zisku -3 dB.

Produkt zesílení a šířky pásma $[GBP]$: Popisuje oblast, kde dochází k poklesu zisku s nárůstem frekvence. Vyjadřuje součin maximálního zesílení $[A_{ol}]$ a šířky pásma $[B]$.

Frekvence jednotkového zesílení $[UGB]$: Je frekvence, při které je zisk $[a = 0 \text{ dB}]$ a $[A = 1]$.

Jak sestavit frekvenční charakteristiku operačního zesilovače je popsáno zde: (Frekvenční charakteristika, parametry B, GBP a UGB).

2 Analýza parametrů – teorie, výpočty, důvod

Tato kapitola se zabývá vysvětlením teoretického základu jednotlivých parametrů takovým způsobem, aby bylo vysvětlení výstižné a snadno pochopitelné. Kromě teoretického rozboru uvádím i řadu praktických informací k metodám měření. Student zde najdete odpovědi na řadu různých otázek typu: „Co jsou parametry a jejich limitace?“, „Jak to mám zapojit a proč?“, „Jak to vypočítat?“, „Jak ten přípravek funguje?“, „K čemu je mi to měření potřebné?“, „Mohu získané informace aplikovat i na jiné úlohy?“, „Jak zvládnout chybná měření a řešit vzniklé problémy?“ a mnoho dalších.

2.1 Měření chybových parametrů

Chybové parametry tvoří důležitou roli při aplikacích, kde je přesnost parametrů velmi důležitá. „Vstupní offset“ operačního zesilovače je souhrnné označení pro složky stejnosměrného napětí nebo proudu, které jsou v jakési nerovnováze, tím se myslí, že i při klidovém stavu je na výstupu odklon od předpokládané nulové hodnoty, jak v napětí, tak i proudu. Pro příklad lze uvést typickou hodnotu proudového offsetu danou výrobcem, $I_{OS} = 2 \text{ nA}$, tudíž ve výsledné aplikaci bude o tuto hodnotu výsledný proud posunut.

Při měření velmi malých hodnot, jako jsou právě tyto chybové parametry, je třeba mít spolehlivé a přesné měřicí přístroje, také i kvalitní stabilní napájecí napětí pro operační zesilovač, protože většina těchto parametrů je ovlivňována jeho napájecím napětím a nesymetrickou strukturou.

Tyto nepřesnosti můžeme odstranit pomocí vnějších kompenzačních vstupů operačního zesilovače nebo zavedením zpětné vazby.

2.1.1 Vstupní klidové proudy I_B^+ , I_B^- a I_B

Vstupní klidové proudy odpovídají proudům na bázích tranzistorů v rozdílovém zesilovači ve vstupní části o. z. Tyto proudy jsou také dle původu vzniku nazývány jako biasové.

V reálné aplikaci je nezbytné zmínit rozdíl mezi těmito vstupními klidovými proudy I_B^+ a I_B^- . Důvod je ten, že i přes nenulové klidové proudy může být odchýlení nulové za předpokladu, že hodnoty těchto klidových proudů budou stejné. Důsledkem toho je skutečnost, že tento rozdíl nebude interferovat s výsledným předpokládaným signálem. (Zemánek 2015)

Tento rozdíl je další parametr, který se nazývá vstupní proudová nesymetrie I_{OS} . Bude uveden v následující kapitole viz (Vstupní proudová nesymetrie I_{OS}). Proto je důležité pochopit vznik těchto klidových proudů, který tento další parametr následně tvoří.

Výpočet klidových proudů $[I_B^+]$ a $[I_B^-]$:

Hodnotu jednotlivých klidových proudů zjistíme, když změříme milivoltmetrem napětí mezi výstupem o. z. a zemí a vydělíme hodnotou ekvivalentního rezistoru patřičného zapojení. Dle použité patřičné větve se odvíjí i označení, o jaký vstupní klidový proud se jedná. Vztahy:

$$I_B^+ = \frac{U_{OUT}}{R_{eq}} \quad I_B^- = \frac{U_{OUT}}{R_{eq}}$$

Rovnice 1: Výpočet vstupních klidových proudů I_B^+ a I_B^-

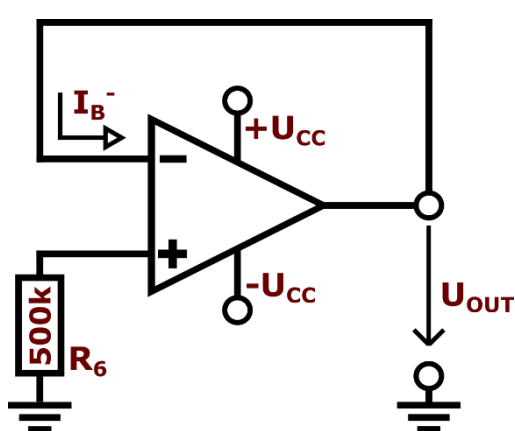
U_{OUT} ... představuje napětí mezi výstupem a zemí

R_{eq} ... představuje hodnotu ekvivalentní rezistoru

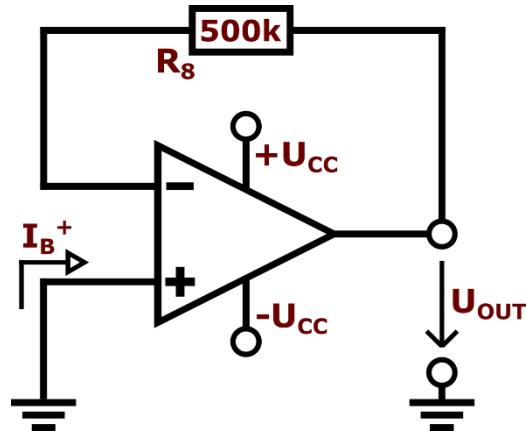
I_B^+ ... představuje hodnotu vstupního klidového proudu na neinvertující větvi

I_B^- ... představuje hodnotu vstupního klidového proudu na invertující větvi

Schématické zapojení pro měření klidových proudů $[I_B^+]$ a $[I_B^-]$:



Schématické zapojení 4: Měření vstupního klidového proudu I_B^- .
Foto autor



Schématické zapojení 3: Měření vstupního klidového proudu I_B^+ .
Foto autor

Výpočet průměrného klidového proudu $[I_B]$:

Vstupní klidový proud je tvořen průměrem součtu klidového proudu $[I_B^-]$ na invertující větvi a klidového proudu $[I_B^+]$ na neinvertující větvi, proto je odvozený vztah následující:

$$I_B = \frac{I_B^- + I_B^+}{2}$$

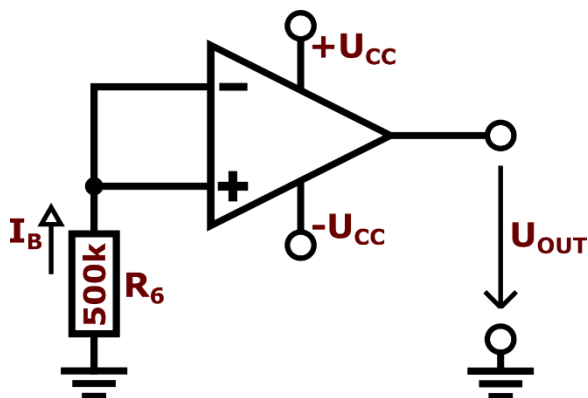
Rovnice 2: Výpočet průměrné hodnoty klidového proudu I_B

I_B ... představuje průměr součtu vstupních klidových proudů

I_B^+ ... představuje hodnotu vstupního klidového proudu na neinvertující větvi

I_B^- ... představuje hodnotu vstupního klidového proudu na invertující větvi

Schématické zapojení pro měření průměru klidového proudu $[I_B]$:



Schématické zapojení 5: Měření průměrné hodnoty klidového proudu I_B .
Foto autor

2.1.2 Vstupní proudová nesymetrie I_{os}

Pokud při navrhování o. z. použijeme dvě kompletně parametricky identické kopie zapojení, například část rozdílového zesilovače na vstupu, nikdy se nepodaří vytvořit požadovanou symetrii.

Dle Zemánka (2015) je důsledkem této nesymetrie rozdíl vstupních klidových proudů, které jsou identické proudům na bázích příslušných tranzistorů v rozdílovém zesilovači ve vstupní části o. z. Tento rozdíl mezi proudy báze je tvořen v důsledku rozdílného proudové zesílení h_{21} těchto tranzistorů. Dle tohoto rozboru jej lze vyjádřit jako rozdíl vstupních klidových proudů:

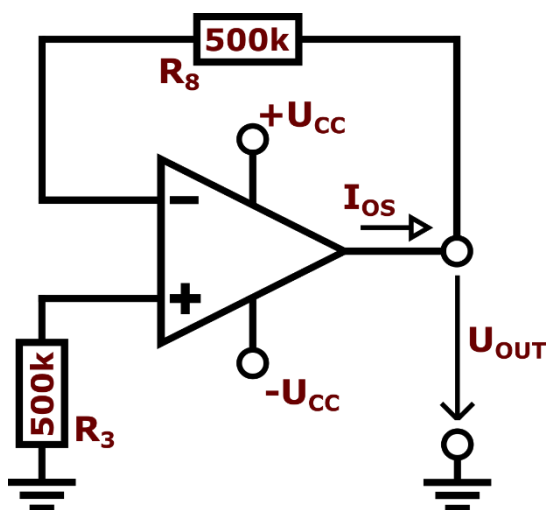
$$I_{os} = I_B^+ - I_B^-$$

Rovnice 3: Výpočet proudového offsetu I_{os} pomocí rozdílu

Tento rozdíl vstupních klidových proudů se nazývá proudová nesymetrie, offset vstupního proudu, nebo také obecněji jako vstupní zbytkový proud a značí se $[I_{os}]$.

Od vstupního klidového proudu I_B se odlišuje tím, že $[I_{os}]$ udává rozdíl mezi jednotlivými klidovými proudy, zatímco I_B udává průměrnou hodnotu součtu těchto klidových proudů.

Schématické zapojení pro měření proudové nesymetrie $[I_{os}]$:



Schématické zapojení 6: Měření proudové nesymetrie I_{os} .

Foto autor

Výpočet proudové nesymetrie $[I_{os}]$:

Hodnotu proudové nesymetrie je možno vypočítat pomocí rozdílu mezi jednotlivými klidovými proudy $[I_B^+]$ a $[I_B^-]$ nebo spojením jejich zapojení, kdy výsledné zapojení uvádím výše. Pro druhou metodu lze využít vzorec pro výpočet proudové nesymetrie $[I_{os}]$, kdy obě větve jsou připojeny do série s rezistorem vysoké hodnoty:

$$I_{os} = \frac{U_{out}}{R_{eq}}$$

Rovnice 4: Výpočet proudové nesymetrie I_{os}

I_{os} ... hodnota proudu, o kterou se výstup vychýlí

U_{out} ... napětí mezi výstupem a zemí

R_{eq} ... ekvivalentní hodnota rezistoru v zapojení

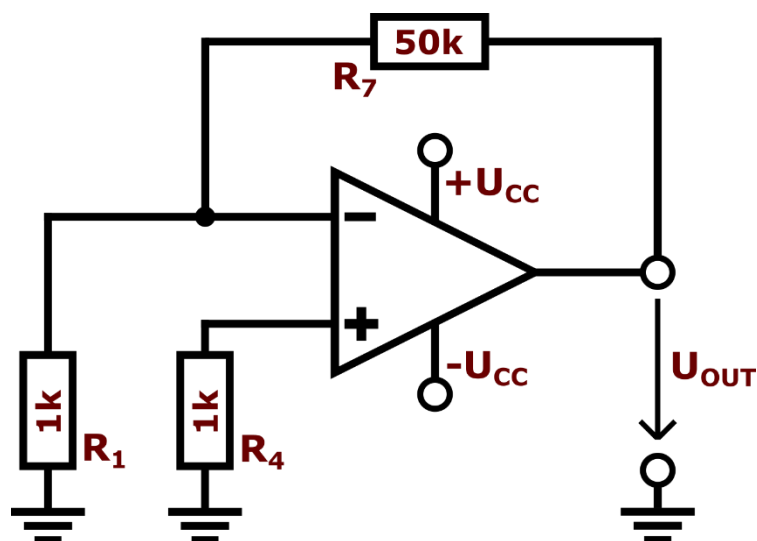
2.1.3 Vstupní napěťová nesymetrie U_{OS}

Pro běžné zesílení mají být na vstupech rozdílné hodnoty odporu pro získání různého poměru napětí na jednotlivých vstupech. Tento rozdíl $[\Delta U_{IN}]$ je pak dělitelem výstupního napětí viz (Rovnice 8: Výpočet zesilovacího činitele A), tím se získá hodnota zesílení $[A]$. Při aplikaci je výsledné výstupní napětí ovlivněno právě napěťovou nesymetrií, kdy je reálný výsledek posunut o hodnotu $[U_{OS}]$, tato odchylka tudíž způsobuje nepřesnost, a proto je nutné ji řešit. (Hospůdka 2020)

Dále ještě dochází k samovolným změnám vstupní napěťové nesymetrie. Důvodem je jev, tzv. „drift“, který je důsledkem změn teploty jednotlivých komponent v operačním zesilovači.

Vyřeší se její kompenzací buď přizpůsobením hodnot rezistorů v aplikaci, nebo jejím vykompenzování pomocí vstupů pro korekci. Tyto vstupy, avšak neobsahují všechny o. z.

Schématické zapojení pro měření napěťové nesymetrie $[U_{OS}]$:



Schématické zapojení 7: Měření napěťové nesymetrie U_{OS} .
Foto autor

Výpočet napěťové nesymetrie [U_{os}]:

Dle Hospůdky (2020) je vstupní napěťová nesymetrie důsledkem nesymetrie vstupních tranzistorů, která je způsobována rozdílně nasycenými proudy a rozdíly jejich kolektorových proudů. V klidovém stavu při napájení existuje na vstupech o. z. offset napětí, který je dán rozdílem těchto napětí, z této definice se může odvodit vzorec:

$$U_{os} = U^{-} - U^{+}$$

Rovnice 5: Výpočet napěťového offsetu U_{os} pomocí rozdílu

Aby bylo možno zjistit tento napěťový offset, tak se musí na vstupech o. z. přiřadit takové odpory, u kterých budou jejich ekvivalentní hodnoty sobě rovny, tudíž mezi nimi bude platit $\Delta U_{IN} = 0$ V. Pouze tehdy lze změřit výstupní napětí, které při vydělení ekvivalentní hodnoty rezistoru v záporné zpětné vazbě a rezistoru na invertující větvi tvoří offset napětí, nebo také obecněji řečeno zbytkové napětí, to je značeno jako [U_{os}]. Vzorec je následující:

$$U_{os} = \frac{U_{OUT}}{\frac{R_{eqzp}}{R_{eq}}}$$

Rovnice 6: Výpočet napěťového offsetu U_{os}

U_{os} ... představuje hodnotu zbytkového napětí

U_{OUT} ... představuje hodnotu napětí na výstupu oproti zemi

R_{eqzp} ... představuje ekvivalentní hodnotu rezistoru v záporné zpětné vazbě

R_{eq} ... představuje ekvivalentní hodnotu rezistoru na invertující větvi

2.2 Měření statických parametrů

Statické parametry vytvářejí charakter operačního zesilovače, dle kterých vznikají různé variace pro jeho aplikace. Jsou to parametry, které se nejčastěji vyhledávají a dle nich se provádí výběr vhodných operačních zesilovačů pro konkrétní aplikace.

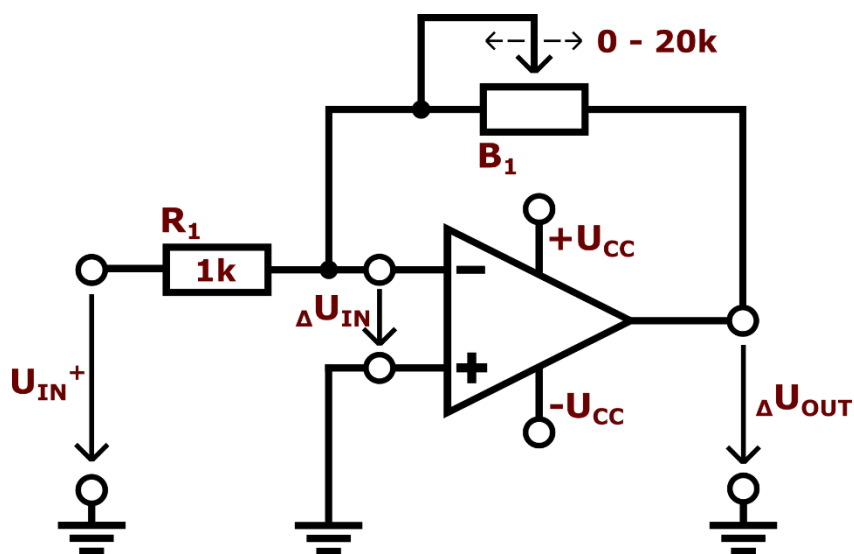
Jejich porozumění je kritické pro správný výběr a jejich následné použití.

2.2.1 Zesilovací činitel a zisk, A, a

Je klíčový parametr operačního zesilovače, který udává poměr zesílení mezi vstupem a výstupem. Buď se udává v hodnotách decibelů z hlediska praxe, nebo pro snazší znázornění a porozumění jako číselná hodnota, která udává konkrétní hodnotu zesílení signálu. (Zemánek 2015)

Pro zjištění zesilovacího činitele je třeba znát hodnotu vstupního a výstupního napětí. Pro zjištění vstupního napětí je nutné odečíst napětí na invertující a neinvertující větvi operačního zesilovače, pro zjištění výstupního napětí provést odečet napětí na výstupu oproti zemi.

Schématické zapojení pro měření zesilovacího činitele:



Schématické zapojení 8: Měření zesilovacího činitele A.

Foto autor

Výpočet zesilovacího činitele [A]:

Nejdříve musíme zjistit vstupní napětí, abychom jej mohli porovnat s výstupním napětím, proto buď rovnou zjistíme napětí $[\Delta U_{IN}]$, nebo jej vypočítáme po zjištění hodnot napětí na jednotlivých vstupech o. z. Vztah pro vstupní napětí $[\Delta U_{IN}]$ je:

$$\Delta U_{IN} = U_{IN}^- - U_{IN}^+$$

Rovnice 7: Výpočet ΔU_{IN}

ΔU_{IN} ... rozdíl napětí mezi vstupy invertující a neinvertující větvi

U_{IN}^- ... napětí mezi invertující větví a zemí

U_{IN}^+ ... napětí mezi neinvertující větví a zemí

Pro určení zesilovacího činitele [A] ve formě čísla změříme poměr mezi vstupním napětím $[\Delta U_{IN}]$ oproti zemi a výstupním napětím oproti zemi $[\Delta U_{OUT}]$ a pomocí následujícího vztahu vypočítáme:

$$A = \frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta U_{IN}} = - \frac{R \text{ (ve zpětné vazbě)}}{R \text{ (na vstupu)}}$$

Rovnice 8: Výpočet zesilovacího činitele A

Zisk [a] se uvádí v decibelech, tato jednotka se používá spíše v odbornějších aplikacích. Vzorec pro vypočítání zisku [a] je následující:

$$a = 20 \times \log \left(\frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta U_{IN}} \right)$$

Rovnice 9: Výpočet zisku a

A ... zesilovací činitel, udává poměr zesílení mezi odpory na vstupu a zpětné vazbě

a ... zisk, udává hodnotu zesílení signálu mezi vstupem a výstupem v decibelech

ΔU_{OUT} ... rozdíl napětí mezi výstupem a zemí

ΔU_{IN} ... rozdíl napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem

2.2.2 Poměr potlačení souhlasného režimu CMRR

Význam jednotlivých písmen: „Common-Mode Rejection Rate“ v překladu: jako činitel potlačení souhlasného rušení. Jde o neideálnost mezi vstupem a výstupem o. z., kde při souhlasném napětí vzniká nepoměr v napětí. (Hospůdka 2020)

Vzhledem k principu klasického zesílení jde o rozdílný poměr mezi jednotlivými napětími na vstupech oproti zemi k dosáhnutí zesílení na výstupu oproti zemi. Souhlasným režimem se myslí stejné hodnoty napětí na jednotlivých vstupech oproti zemi, tudíž není žádný rozdíl, takže ani žádné zesílení napětí oproti vstupu. (Hospůdka 2020)

Může se zdát, že jde o stejný princip jako u napěťové nesymetrie, a opravdu tomu tak je. Avšak s tím rozdílem, že při měření $[U_{OS}]$ se řeší nesymetrie napětí, která vzniká při samotném napájení o. z. Při měření CMRR se ale řeší nesymetrie, která je tvořena rozdílem mezi souhlasným napětím na vstupech operačního zesilovače. (Zemánek 2015)

Pro přesný výpočet je klíčové použití rezistorů s velmi nízkou tolerancí a co nejlepší ošetření ostatních chybových parametrů buď jejich kompenzací, nebo zahrnutím do počtu.

Výpočet poměru potlačení souhlasného režimu [CMRR]:

$$CMRR = 20 \log \left| \frac{\Delta U_{IN}^+ - \Delta U_{IN}^-}{\Delta U_{OUT}^+ - \Delta U_{OUT}^-} \right| = 20 \log \left| \frac{\Delta U_{IN}}{\Delta U_{OUT}} \right|$$

Rovnice 10: Výpočet činitele poměru potlačení souhlasného napětí CMRR

ΔU_{IN}^+ ... napětí mezi vstupy při kladné polaritě napětí

ΔU_{IN}^- ... napětí mezi vstupy při záporné polaritě napětí

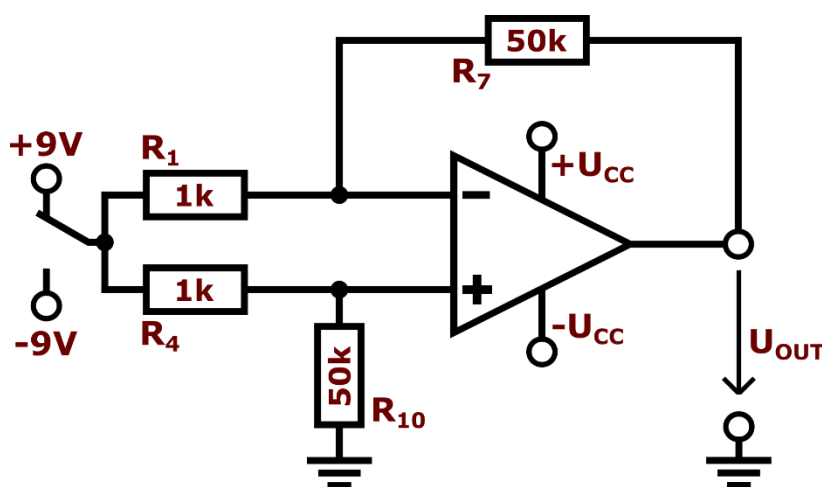
ΔU_{OUT}^+ ... napětí na výstupu oproti zemi při kladné polaritě napětí

ΔU_{OUT}^- ... napětí na výstupu oproti zemi při záporné polaritě napětí

ΔU_{IN} ... absolutní rozdíl mezi ΔU_{IN}^+ a ΔU_{IN}^-

ΔU_{OUT} ... absolutní rozdíl mezi ΔU_{OUT}^+ a ΔU_{OUT}^-

Schématické zapojení pro měření poměru potlačení souhlasného režimu [CMRR]:



Schématické zapojení 9: Měření CMRR.
Foto autor

2.3 Měření dynamických parametrů

Dynamické parametry jsou takové parametry, které popisují charakter operačního zesilovače při změně frekvence neboli kmitočtu. Proto se zaměřují na parametry, které jsou spojeny s časem.

Požadavky na kvalitu parametrů jsou důležité při aplikacích, kde je vyžadována přesnost a rychlost změny přenášeného signálu při vysokých kmitočtech.

2.3.1 Rychlost přeběhu SR

Je to rychlost reakce výstupu při změně na vstupu. V elektronice je rychlost přeběhu definována jako maximální rychlost změny výstupního napětí za jednotku času. Tato hodnota pomáhá identifikovat vhodnost použití o. z. při velmi vysokých frekvencích (více než 1 MHz). (Williams 2022)

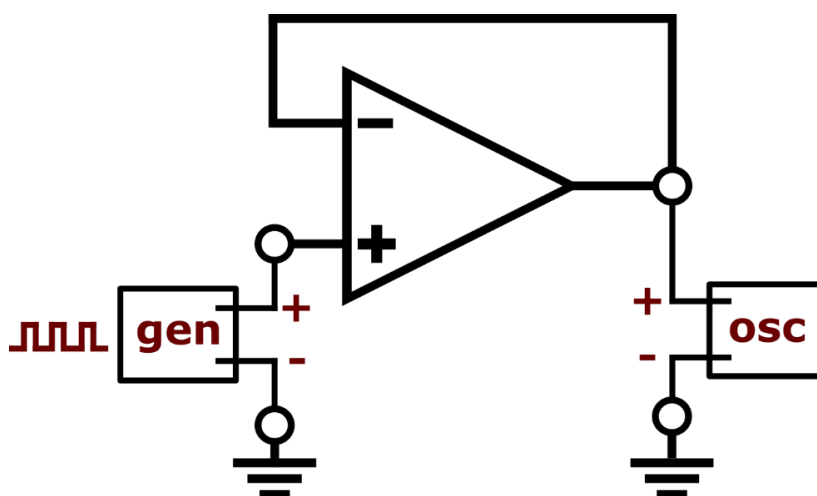
Značení [SR] pochází z anglického názvu „Slew Rate“ a jednotkou je počet voltů za sekundu (V/s). Rychlost této reakce by měla být co nejvyšší, nejlépe „nekonečná“, běžně je v hodnotách kolem 10 V/ μ s „10 voltů za jednu mikrosekundu“, (u LM741 je 0,5 V/ μ s).

Důvodem řešení tohoto parametru je hodnota zkreslení výsledného signálu při signálech vysokých skoků mezi napěťovými úrovněmi při vysokých frekvencích.

Příkladem může být obdélníkový signál, kde by při nevhodném o. z. docházelo k deformaci signálu z obdélníků na zkosené obdélníky a jejich hrany by byly posunuty oproti očekávaným polohám. Dalším příkladem z praxe by mohla být pomalá reakce motoru při jeho řízení a následně jeho nežádoucí zpoždění, příp. samotného zkreslení zvuku, kde se velmi často v aplikacích zesiluje velká směs různě vysokých amplitud a kvůli pomalému přeběhu změn by docházelo ke zkreslení zvuku. Proto se řeší tento parametr, aby se dosáhlo stabilního a spolehlivého přenosu signálu.

Pro diagnostiku tohoto parametru bude použitý generátor obdélníkového signálu, který je schopen vygenerovat alespoň vyšší frekvenci přibližně do 10 MHz a osciloskop s velmi vysokou rozlišovací schopností pro zaznamenání těchto rychlých změn.

Schématické zapojení pro měření rychlosti přeběhu [SR]:



Schématické zapojení 10: Měření rychlosti přeběhu SR.

Foto autor

Výpočet rychlosti přeběhu [SR]:

Na přípravku jsem zapojil o. z. jako sledovač a rovnou na jeho neinvertující vstup oproti zemi pak připojil generátor obdélníkového signálu. Osciloskopem jsem následně měřil výstupní signál.

Spočítá se počet dílků na časové základně, tedy ose x a také se zapíše nastavená konstanta. Vynásobením se vypočítá doba této reakce $[\Delta t]$. Spočítá se počet dílků na napěťové základně, tedy ose y a také se zapíše nastavená konstanta. Vynásobením se vypočítá úroveň změny úrovně napětí $[\Delta U]$. Vzorce jsou následující:

$$\Delta t = \text{počet dílků} \times \text{hodnota dílku}$$

Rovnice 11: Výpočet doby reakce Δt

$$\Delta U = \text{počet dílků} \times \text{hodnota dílku}$$

Rovnice 12: Výpočet napěťové reakce ΔU

Pro výpočet výsledné rychlosti se již tyto dvě hodnoty spolu vynásobí. Důležité je však dát pozor na typ použitých jednotek, v základu píšeme (V/s), pro praktičtější využití (V/ μ s). Zmiňovaný vztah pro výpočet:

$$SR = \Delta U \times \Delta t$$

Rovnice 13: Výpočet rychlosti přeběhu SR

Δt ... doba reakce, udává šířku celého procesu, přeběhu

ΔU ... napěťová reakce, udává výšku napětí potřebnou pro přeběh.

2.3.2 Frekvenční charakteristika, parametry B, GBP a UGB

Způsob zapojení zpětné vazby a nastaveného poměru má vliv na nastavení šířky pásma [B], což definuje rozsah všech frekvencí, při kterém je nejvyšší možné zesílení. (Williams 2022)

Existují dva příkladové modely zapojení zpětné vazby:

- **S otevřenou smyčkou [A_{ol}]:** Představuje zapojení o. z. bez připojené zpětné vazby. Toto zapojení má tu nevýhodu, že pokles zesílení při vyšších frekvencích začíná zpravidla už od 10 Hz. Oproti tomu ale dosahuje velmi vysokých zisků při velmi nízkých frekvencích. Detailní příklad charakteristiky je uveden zde: (Obrázek 1: Frekvenční charakteristika. Foto autor). (Williams 2022)
- **S uzavřenou smyčkou [A_d]:** Přestavuje zapojení o. z. se zavedenou zpětnou vazbou. Výška maximálního zesílení je nastavena poměrem odporů ve zpětné vazbě oproti vstupu.

ol ... je označení pro otevřenou smyčku (ol = open loop)

cl ... je označení pro uzavřenou smyčku (cl = closed loop)

Abychom bylo možné vypočítat údaje z frekvenční charakteristiky, musí být nejdříve sestrojena, a to pomocí měření frekvenční odezvy na operačním zesilovači. Další informace včetně postupu viz (Měření frekvenční charakteristiky).

Výpočet šířky pásma [B]:

Dle Williamse (2022) je k určení šířky pásma [B] zapotřebí znát frekvenci horní meze $[f_c]$, ta se buď vyčte z datasheetu nebo získá měřením frekvenční odezvy na operačním zesilovači.

Po jejím zjištění se šířka pásma vypočítá:

$$B = 2 \times f_c$$

Rovnice 14: Výpočet šířky pásma B

f_c ... horní frekvenční mez, udává bod, od kterého klesá zesílení a roste frekvence

B ... šířka pásma, definuje rozsah frekvence, pro kterou platí stejná hodnota zesílení

Výpočet produktu zesílení a šířky pásma [GBP]:

K určení produktu zesílení a šířky pásma [GBP] je zapotřebí již mít zapojený obvod se zpětnou vazbou a zvoleným poměrem odporů a tím i stanovenou maximální úroveň zisku. Pro výpočty je tedy nutno znát šířku pásma B a nejvyšší možný zesilovací činitel $[A_{cl}]$. Převod ze zisku $[a]$ na zesilovací činitel $[A]$ je umožněn tímto vztahem:

$$A = 10^{\frac{a}{20}}$$

Rovnice 15: Převod z logaritmického čísla

Pro převod zesilovacího činitele $[A]$ na zisk $[a]$ je vztah následující:

$$a = 20 \times \log(A)$$

Rovnice 16: Převod do logaritmického čísla

Pokud je známa správná hodnota zesilovacího činitele $[A]$, může se vynásobit šířkou pásma B a získá se produkt zesílení a šířky pásma [GBP]. Rovnice:

$$GBP = A_{cl} \times B$$

Rovnice 17: Výpočet produktu zesílení a šířky pásma GBP

GBP ... produkt zesílení a šířky pásma, součin zesilovacího činitele a šířky pásma

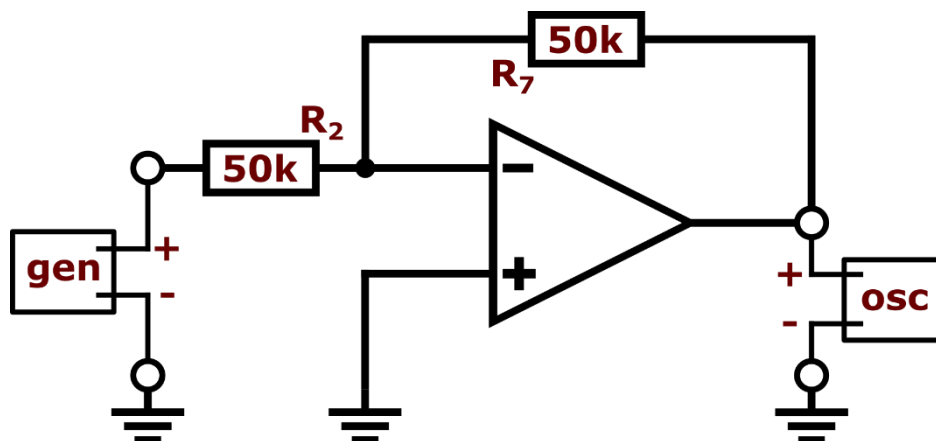
A ... zesilovací činitel, „takové“ nejvyšší zesílení

B ... šířka pásma, definuje rozsah frekvence, pro kterou platí stejná hodnota zesílení

Zjištění bodu frekvence jednotkového zesílení [UGB]:

Tento bod frekvence jednotkového zesílení je taková frekvence, při které je zesílení $[A = 1]$ a tudíž zisk $[a = 0 \text{ dB}]$. Jediným způsobem jeho zjištění je dle diagnostiky operačního zesilovače metoda frekvenční odezvy na přípravku. K této metodě je zapotřebí funkční generátor a osciloskop. [UGB] je v Hz. (Williams 2022)

Schématické zapojení pro měření parametrů frekvenční charakteristiky:



Schématické zapojení 11: Měření metodou frekvenční odezvy.

Foto autor

PRAKTICKÁ ČÁST

3 Realizace přípravku – konstrukce a popis přípravku

Celý přípravek se skládá z jedné hlavní desky plošného spoje, která je uložena ve dvoudílné krabici. Interaktivní části z DPS jsou z vnější strany přístupné, což umožňuje manipulaci s přípravkem. Na povrchu krabice je pomocí zdírek připevněn navigační plánec, dle kterého je zřejmé, jak jsou jednotlivé součásti propojovány.

Hlavním interaktivním prvkem je lišta o dvou pinech, tzv. jumper. Dalším klíčovým prvkem jsou zdírky pro vodiče typu banánku, které slouží pro připojení různých měřících přístrojů, nebo k využití externích součástek jako jsou rezistory s jinou nominální hodnotou, nebo kondenzátorů. Nedílnou součástí jsou 3 patice pro 3 běžné druhy operačních zesilovačů. Jediným omezením je označení a pořadí jednotlivých pinů.

Přípravek slouží jako pomůcka k měřícím úlohám ohledně parametrů operačního zesilovače v hodinách ELM, nebo hodin PRA – ELM. Jednotlivé měřící úlohy aplikované na přípravku jsou zadány v kapitole 4. (Měřící úlohy do výuky – zadání, postup, pravidla)

3.1 Postup realizace

Návrh desky plošných spojů byl uskutečněn ve volně dostupném programu CircuitMaker. Projekt je volně dostupný v komunitě CircuitMaker. Přikládám odkaz k nahlédnutí projektu: <https://workspace.circuitmaker.com/Projects/Details/imonFrmel/Module-for-measuring-parameters-of-op-amp>.

Projekt byl ukládán na osobním online úložišti Altium 365. Toto úložiště mi dovoľovalo v případě přístupu k internetu interakci, nahlédnutí a stažení souborů, v případě nainstalovaného programu i samotnou editaci bez limitu.

Při návrhu jsem využíval komunitní knihovnu součástek, ze které jsem převzal některé součástky, které byly navrženy a publikovány komunitou. Ovšem veškeré převzaté stopy jsem musel upravit na základě svých požadavků. V rámci sdíleného projektu jsou ukládány společně s návrhem i použité součástky.

Jednotlivé DPS byly objednány pro potřeby tvorby skrze online službu JLCPCB. Jednotlivé komponenty, které byly následně osazeny na desku, byly dodány školou. Seznam součástek a jejich detailní rozpis je v kapitole 3.3. (Seznam komponentů použitých na přípravku)

Model krabice jsem vytvořil ve webovém programu Onshape. Krabice se skládá ze dvou částí. Spojení obou dílů bude pomocí čtyř šroubů v rohových částech krabice. DPS je připevněna uvnitř horní části krabice pomocí 22 zdírek. Zdíčky mi umožnily nastavení požadovaného rozestupu mezi krabíčkou a DPS.

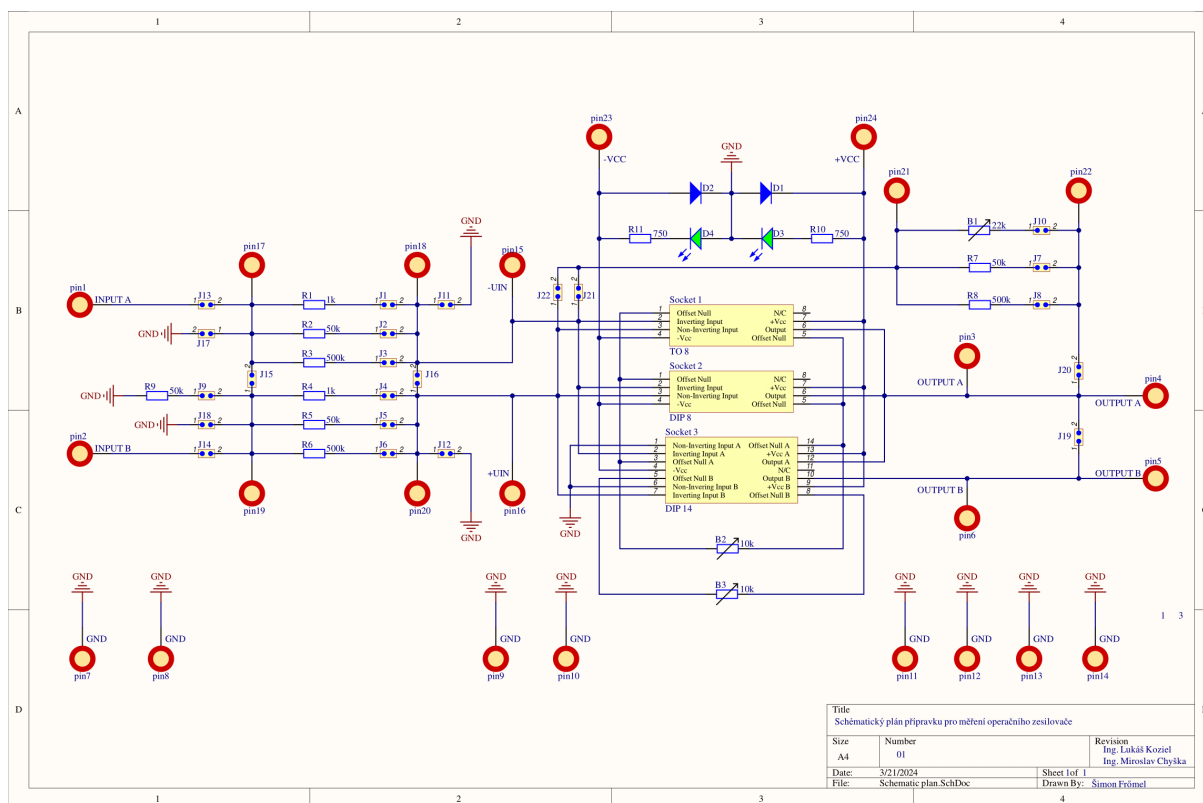
Stejně zdírky „drží“ na povrchu krabice i navigační plánec, který jsem vytvořil ve volně dostupném programu Inkscape a vychází z osazovacího plánu návrhu. Navigační plánec doplňuje vizuální rozložení součástek na DPS.

3.2 Popis přípravku

Celý přípravek se skládá z jedné DPS desky uložené ve dvoudílné krabici. Na povrchu krabice je připevněn navigační plánek a celkový rozměr navrhovaného přípravku bez osazených součástek je 216 x 166 x 50 mm. Díky pomoci Ing. Petra Hronka byla uskutečněna výroba a doprava DPS službou JLCPCB. Model krabice byl vytisknut na 3D tiskárně z filamentu PLA za dohledu pana Ing. Petra Hronka.

3.2.1 Hlavní deska plošných spojů

Deska byla navržena v programu CircuitMaker a vyrobena společností JLCPCB. Rozměry desky jsou 200 x 150 mm.



Obrázek 2: Schématický plán DPS, z CircuitMaker. Foto autor

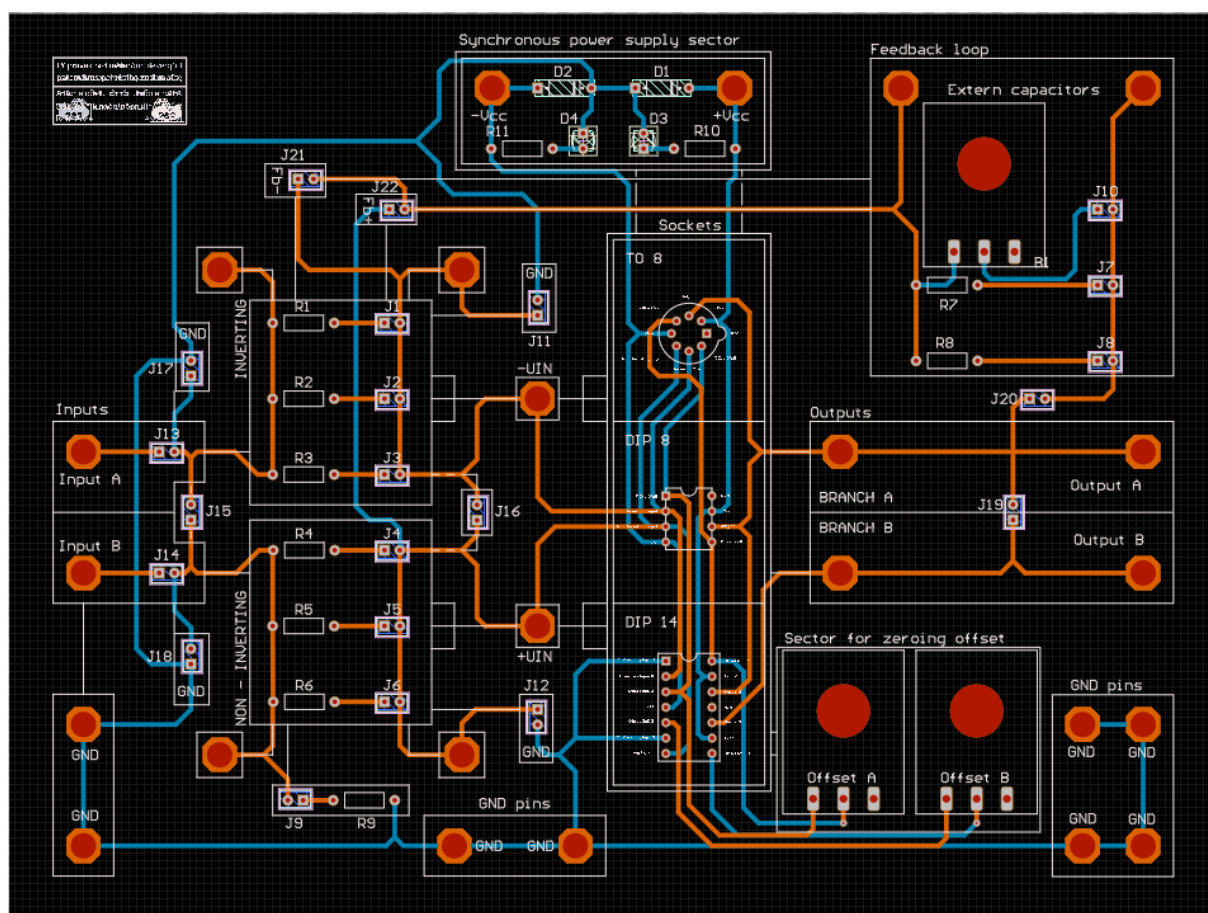
Důležitou částí návrhu bylo zakomponování ochrany proti nevhodnému zapojení polarity napájecího napětí. Toto ošetření chrání před nenávratným zničením měřeného operačního zesilovače. Problém je vyřešen využitím dvou diod a společnou zemí, které jsou v zapojení proti prepólování. Při nesprávném připojení jsou obě diody v propustném směru a veškerý proud se tedy uzemní, při správném zapojení jsou obě diody v závěrném směru a proud prochází v pořádku dál. Deska disponuje navíc funkcí signalizací správné polarity, kdy se rozsvítí dvě zelené LED diody při správném připojení napájecího napětí. Tuto ochranu lze vidět na schématickém plánu přímo nad 3 patcemi včetně zdírek pro napájení viz (Obrázek 2).

Na přípravku jsou osazeny 3 různé typy patic, které umožňují dosazení různých operačních zesilovačů. Podmínkou je identičnost s piny patice. V případě odlišnosti nelze tento konkrétní o. z. použít na přípravku.

Všechny patice disponují možností kompenzace offsetu, která je řešena otočnými potenciometry, ty dovolují jednoduché nastavení odporu. Kvůli zapojení dvou o. z. v jednom pouzdře IO, u patic typu DIP 14 jsou potenciometry dva. Značeny [B2] a [B3].

Přípravek disponuje možností externího připojení měřících přístrojů pomocí zdírek pro banánky. Do označených zdírek na pinech pro neinvertující, invertující a zpětnou vazbu je možnost připojení dalších externích součástek. Rozteč mezi těmito zdírkami je přesně 4 cm, což je stejná rozteč jako u stávajících používaných modulů obsahujících konkrétní součástku.

Přípravek je univerzální, protože dovoluje připojení měřících přístrojů, vyzkratování větve, ale zejména připojení externích součástek, včetně vyrobených modulů za pomoci zdírek pro kabely zakončenými banánky.



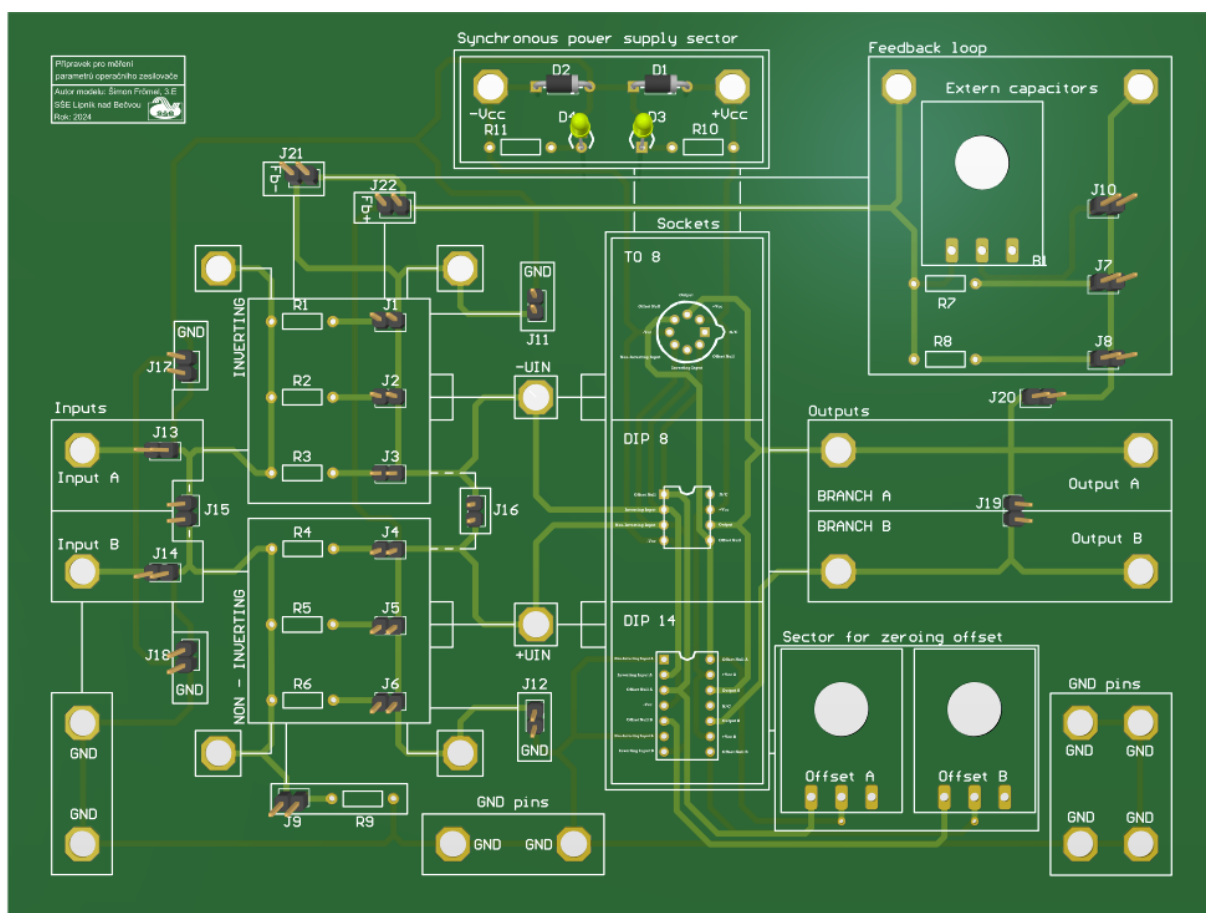
Obrázek 3: Pohled na návrh DPS, z CircuitMaker. Foto autor

Celý přípravek umožňuje jakékoliv zapojení s libovolným výběrem poměru odporů mezi vstupem a zpětnou vazbou. Toto je zajištěno použitím otočného potenciometru ve zpětné vazbě, označeno jako [B1].

Na invertující větvi se pomocí jumperů [J1, J2, J3] vybírá mezi paralelně zapojenými rezistory [R1, R2, R3]. Jumperem [J11] lze uzemnit invertující větev bez zátěže. Jumperem [J17] lze uzemnit invertující větev s vybranou zátěží.

Na neinvertující větvi se pomocí jumperů [J4, J5, J6] vybírá mezi paralelně zapojenými rezistory [R4, R5, R6]. Jumperem [J12] lze uzemnit neinvertující větev bez zátěže. Jumperem [J18] lze uzemnit neinvertující větev se zátěží.

Jumperem [J15] lze spojit neinvertující a invertující větev před výběrem zátěží. Tímto spojením lze měřit parametr CMRR. Jumper [J16] je vhodný pro měření napěťové nesymetrie.



Obrázek 4: 3D pohled na návrh DPS,
z CircuitMaker. Foto autor

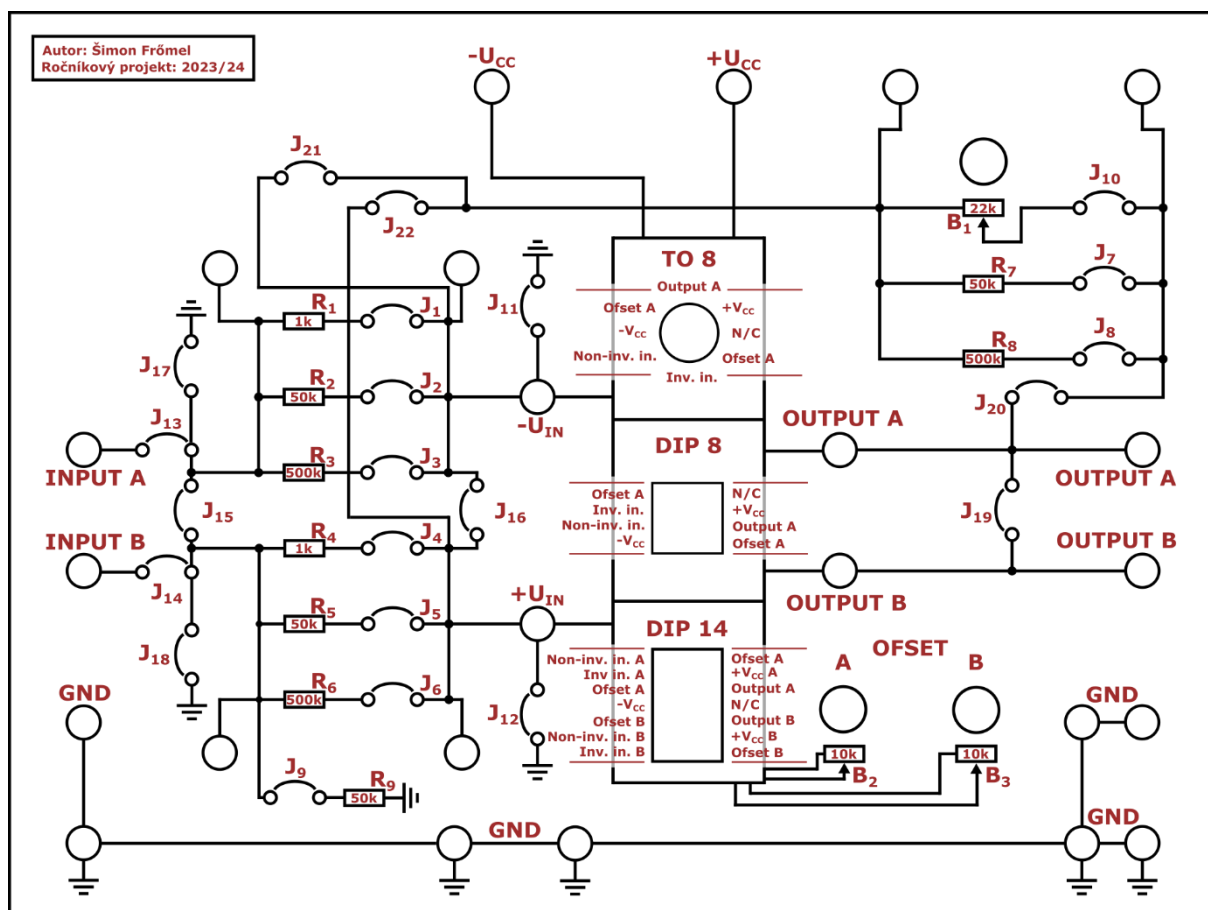
Zpětnou vazbu lze připojit do obvodu spojením jumperu [J20], následně lze připojit pomocí [J21] na invertující větev, nebo pomocí jumperu [J22] na neinvertující větev. Ve zpětné vazbě lze pomocí jumperů [J7] a [J8] vybrat mezi dvěma rezistory [R7 a R8] s konstantním odporem. [J10] dovoluje připojení nastavitelného potenciometru [B1]. Pomocí vyvedených zdířek ve zpětné vazbě lze vytvořit zkratovanou zpětnou vazbu. Tímto zkratem lze zapojit o. z. jako sledovač, například pro měření šířky frekvenčního pásma při otevřené smyčce.

3.2.2 Celkový navigační plánek

Ve finálním řešení jsou žákům přístupné pouze jednotlivé jumpery, zdířky a patice. Proto je na horní části krabičky umístěn celkový navigační plánek skutečného zapojení, který jednotlivé interaktivní prvky vizuálně propojuje, protože zbytek zapojení je uvnitř krabičky.

Tento plánek je zalaminován a připevněn na horní části krabičky pomocí jednotlivých přišroubovaných zdířek.

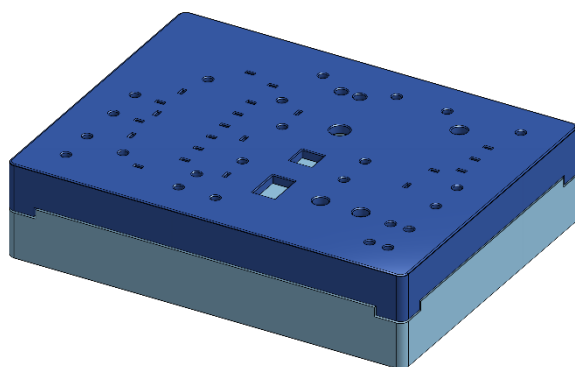
Schéma je navrženo tak, aby situaci nekomplikovalo, ale spíše zjednodušovalo práci s přípravkem napříč několika možnostmi zapojení návrhu.



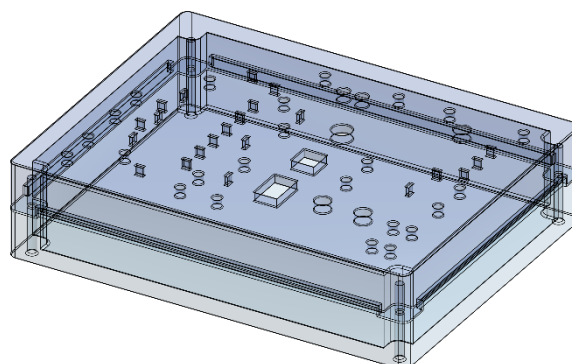
Obrázek 5: Celkový navigační plánek,
z Inkscape. Foto autor

3.2.3 Ochranná krabička

Krabička byla navržena ve webovém programu Onshape a vytisknuta na 3D tiskárně ve škole z filamentu PLA. Rozměry: 216 x 166 x 50 mm, je zhotovena ze dvou částí.



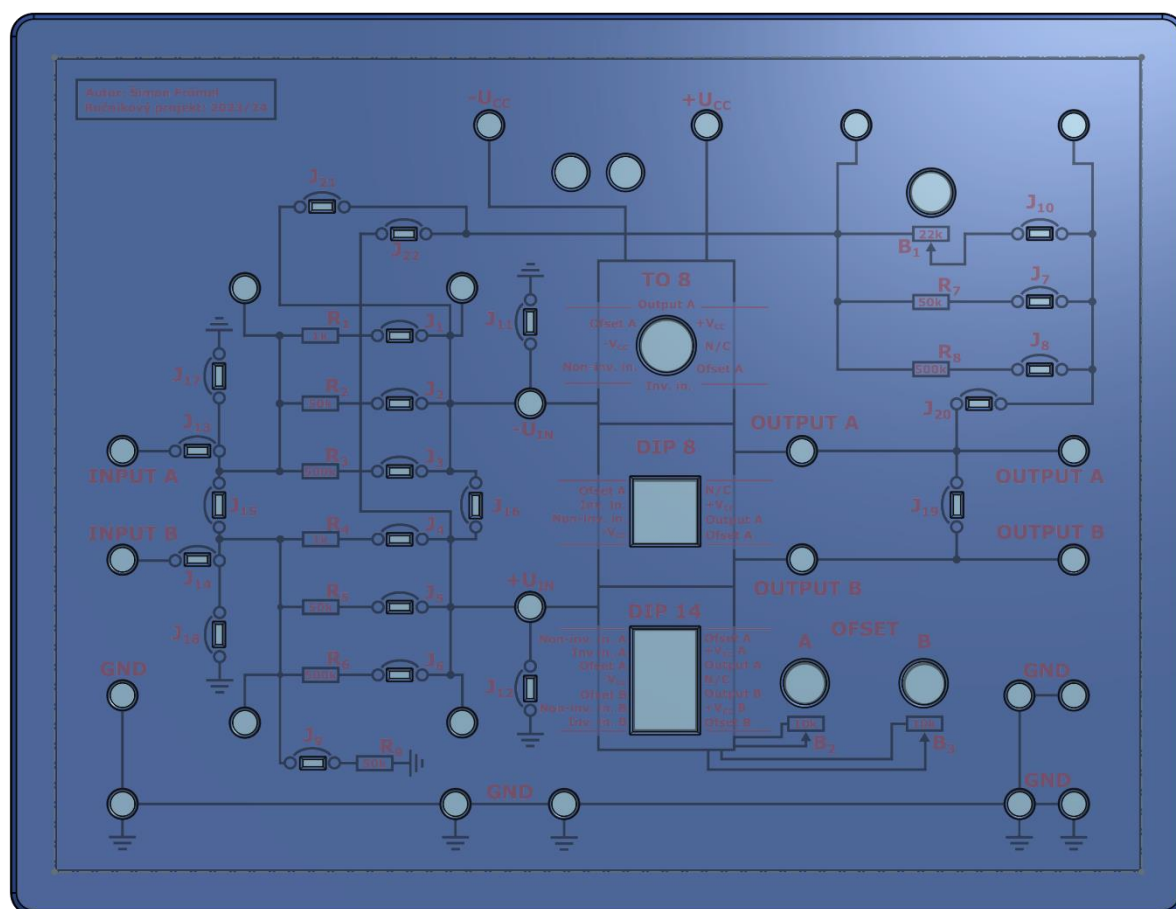
Obrázek 7: Celkový pohled na krabičku, z Onshape. Foto autor



Obrázek 6: Transparentní pohled dovnitř krabičky, z Onshape. Foto autor

Na levém obrázku, viz (Obrázek 7), je pohled na krabičku s připravenými otvory pro prvky, se kterými žák může manipulovat. Na pravém obrázku viz (Obrázek 6) je tentýž pohled, ale s transparentní vizí vnitřní struktury modelu.

Na dalším obrázku je znázorněno rozmístění otvorů a celkového navigačního plánu. (Obrázek 8)



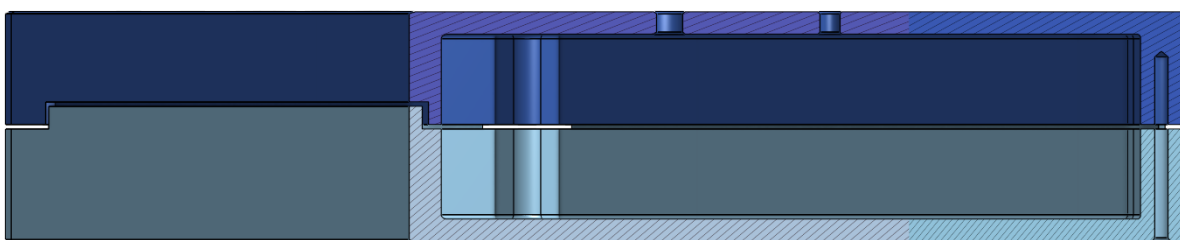
Obrázek 8: Pohled – půdorys s navigačním plánkem, z Onshape. Foto autor

Na obrázku je barva horní části krabičky tmavě modrá, dolní část je světle modrá. Spojení těchto částí bude provedeno 4 kusy šroubů se zápusťnou hlavou. Dále budou použity závitové vložky, které se umístí do příslušných otvorů spodní části krabičky. Otvory: celková hloubka otvorů je 40 mm, ve spodní části krabičky je provedeno zahlobení. (Obrázek 9)



Obrázek 9: Pohled – bokorys v řezu
z Onshape. Foto autor

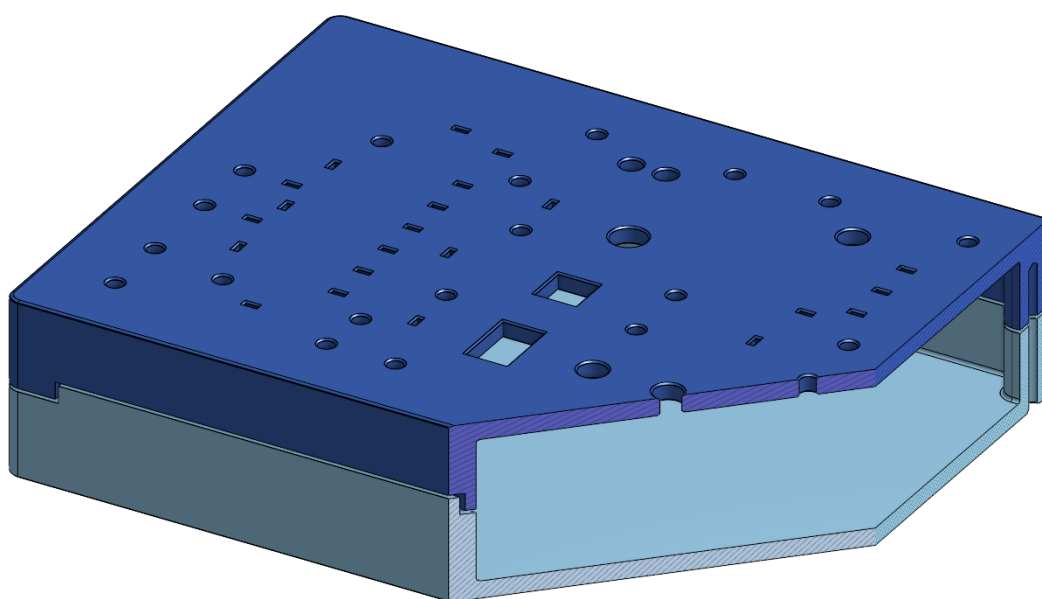
Pohled s detailem provedení hran částí krabičky s otvory pro šrouby (Obrázek 10):



Obrázek 10: Pohled na krabičku s detailem provedení hran,
z Onshape. Foto autor

Velikost zapuštění obou částí krabičky, které do sebe zapadají, je 1 mm.

Názorné zobrazení celého modelu krabičky v řezu je na Obrázku 11.



Obrázek 11: Pohled – vnitřní část – zapuštění obou částí krabičky,
z Onshape. Foto autor

3.3 Seznam komponentů použitých na přípravku

Na přípravku jsou použity komponenty, které zajistila škola. Rozpis komponentů:

- Počet zdírek pro kabel typu banánek: 24 ks
- Počet jumperů: 22 ks
- Počet usměrňovacích diod: 2 ks
- Počet LED diod: 2 ks
- Počet rezistorů: 11 ks
- Počet otočných potenciometrů: 3 ks

Detailní charakteristika jednotlivých rezistorů a potenciometrů:

Ozn.	R[Ω]	Tolerance	P _{max} [W]	Typ pouzdra	Umístění
R ₁	1k	± 5 %	0,25	TR191	invertující větev
R ₂	50k	± 5 %	0,25	TR191	invertující větev
R ₃	500k	± 5 %	0,25	TR191	invertující větev
R ₄	1k	± 5 %	0,25	TR191	neinvertující větev
R ₅	50k	± 5 %	0,25	TR191	neinvertující větev
R ₆	500k	± 5 %	0,25	TR191	neinvertující větev
R ₇	50k	± 5 %	0,25	TR191	zpětná vazba
R ₈	500k	± 5 %	0,25	TR191	zpětná vazba
R ₉	50k	± 5 %	0,25	TR191	uzemnění
R ₁₀	750	± 5 %	0,25	TR191	napájení
R ₁₁	750	± 5 %	0,25	TR191	napájení
B ₁	0 až 22k	± 20 %	0,125	otočný potenciometr	zpětná vazba
B ₂	0 až 10k	± 20 %	0,125	otočný potenciometr	kompence offsetu
B ₃	0 až 10k	± 20 %	0,125	otočný potenciometr	kompence offsetu

Tabulka 1: Detailní parametry rezistorů.

Zdroj dat: autor

Charakteristika jednotlivých patic:

Ozn.	Typ pouzdra	Počet pinů
Socket 1	TO – 8, kruhová patice pro OZ typu TO-99	8 pinů
Socket 2	DIP – 8, standardní patice s roztečí 2,54 mm	8 pinů
Socket 3	DIP – 14, standardní patice s roztečí 2,54 mm	14 pinů

Tabulka 2: Charakteristika jednotlivých patic.

Zdroj dat: autor

Charakteristika diod, LED diod, zkratovacích propojek a zdírek:

Ozn.	U _{max} [V]	I _{max} [A]	Svítivost	Osazení	Popis
D1	1000	1		THT	chrání operační zesilovače před přepólováním
D2	1000	1		THT	
LED1	2,5	0,02 A	70 mcd	THT	signalizují správnost napájení operačního zesilovače
LED2	2,5	0,02 A	70 mcd	THT	
J1 – J22		2		2,54 mm	zkratovací propojka (jumper)
pin1 – pin24		5			

Tabulka 3: Charakteristika diod, LED diod, jumperů a zdírek.

Zdroj dat: autor

4 Měřicí úlohy do výuky – zadání, postup, pravidla

Měřicí úlohy slouží jako pomůcka pro žáky i vyučujícího v hodinách praktické výuky předmětu Elektrická měření.

Častým problémem při výuce podobných témat bývá skutečnost, že je učitel často zaneprázdněn některými žáky a nestíhá tak pomáhat všem. Nyní každý žák obdrží před novým měřením návod, ten mu následně napomáhá při měření a dle něho může pracovat samostatně. To umožňuje vyučujícímu důkladně se věnovat všem žákům. Těmito návody se řeší problém zaostávání slabších žáků, kterým se jeví problematika složitá, což nadále může vést ke ztrátě zájmu o jejich studium. Na základě potvrzené praxe vede tato metoda k efektivnější a kvalitnější výuce a zároveň umožňuje vznik nových kreativních řešení dané problematiky.

Text je napsaný tak, aby odpovídal již požadovaným znalostem z minulých ročníků z předmětů Elektronika, Základy elektrotechniky a Elektrická měření. Tato problematika je nejdříve probírána v hodinách teorie pro následná praktická měření. Teoretické rozborů a konkrétní úlohy zadání jsou žákům předem přístupné na příslušné online platformě v podobě PDF. Žáci by tedy, dle předpokladů, neměli v hodinách zaostávat. Vzniká tak prostor pro vyučujícího, aby měl možnost zopakovat základy a opětovně vysvětlit zadanou úlohu.

Zadání měřicí úlohy tvoří tyto části:

- Popsané zadání a požadavky v protokolu
- Seznam potřebných součástek a přístrojů pro danou úlohu
- Instrukce a postup pro měření problematiky
- Požadavky ke zpracování protokolu
- Základní otázky a jejich odpovědi

Povinností žáka bude po každém měření odevzdat ve stanoveného termínu protokol z měření. Náležitosti protokolu z měření: hlavička protokolu, zadání úlohy měření, tabulka použitých komponentů, tabulka použitých přístrojů, příprava před měřením, postup měření, schématické zapojení, základní teoretický rozbor problematiky, tabulka změřených údajů, vzorový výpočet, případné grafy, zhodnocení naměřených výsledků, zhodnocení měření a závěr.

Jednotlivé body jsou stručněji popsány a vysvětleny ve vzorovém protokolu, který je žákům poskytnut. Tento protokol bude také sloužit jako vzorový manuál pro tvorbu protokolů.

Seznam konkrétních měřicích úloh řazený dle náročnosti:

- A. Měření zesilovacího činitele a zisku + úvod
- B. Měření vstupních klidových proudů a proudové nesymetrie
- C. Měření poměru potlačení souhlasného režimu a napěťové nesymetrie
- D. Měření rychlosti přeběhu
- E. Měření frekvenční charakteristiky

4.1 Měření zesilovacího činitele a zisku + úvod

Cílem měření je porozumět základnímu principu a využití operačních zesilovačů v elektronice. Dalším klíčovým bodem měření je zvládnout postup práce při měření zesilovacího činitele na přípravku a následný výpočet zisku zesílení.

Podklady pro teoretický rozbor základních informací ohledně operačních zesilovačů jsou v kapitole 1 (Operační zesilovač – struktura, princip, vlastnosti). Detailní rozbor statického parametru zesilovacího činitele je v kapitole 2, v části statických parametrů (Zesilovací činitel a zisk, A , a).

Zadání měřicí úlohy:

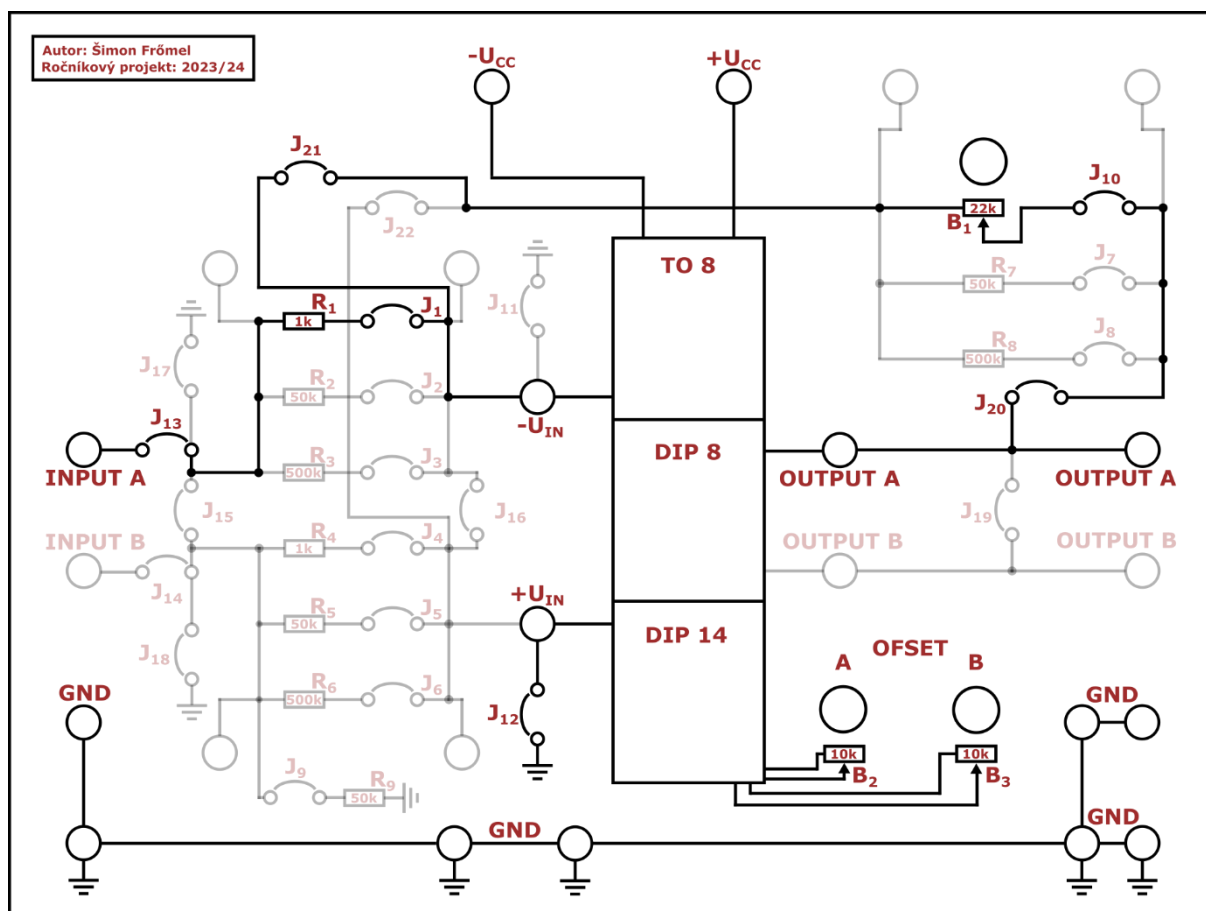
- Proved'te teoretický rozbor na téma: princip operačního zesilovače, zesilovacího činitele a zisku.
- Sestavte na přípravku zapojení pro měření zesilovacího činitele na přiděleném operačním zesilovači.
 - Využijte potenciometr ve zpětné vazbě ke změně poměru odporů k získání většího počtu výsledků.
 - Měřte takové poměry odporů, abyste dosáhli jak kladného, tak i záporného zesílení.
 - Proved'te a запиšte alespoň 8 měření.
 - Jednotlivé výsledky přepočítejte do zisku v jednotkách decibelů.
- Z naměřených údajů sestrojte graf zisku s nastaveným poměrem odporů.
 - Osa x představuje daný poměr mezi odporem ve zpětné vazbě a zvoleným odporem vstupu o. z. Osa y představuje výši zisku v decibelech.
 - Jednotlivé výsledky seřaďte od nejnižších po nejvyšší hodnoty zisku v decibelech.
 - V grafu znázorněte tečkovaně tzv. spojnicí trendu. Tato spojnice představuje průměrný zisk decibelů.
- Vyhodnoťte výši jednotlivých odchylek od spojnice trendu a určete průměrnou odchylku měření.
 - Určete příčinu vzniku této chyby.
- Stejně měření proved'te na dalším jiném operačním zesilovači a porovnejte.

Požadavky ve vypracovaném protokolu měřící úlohy:

- Teoretický rozbor základního principu operačního zesilovače, parametru zesilovacího činitele a zisku.
- Tabulka naměřených údajů obou operačních zesilovačů.
 - Alespoň 8 měření u každého operačního zesilovače. Každé měření bude obsahovat tyto údaje: zvolený poměr mezi odpory, zesilovací činitel, vypočítaný zisk, odchylka od průměru.
- Vzorový příklad, použité vztahy a vzorce.
- Graf popisující vliv poměru odporu na výši zisku zesílení signálu.
 - Pojmenování os, hodnoty a spojnice trendu.
- Porovnání operačních zesilovačů.
- Závěr popisující výsledky z měření a nové získané znalosti a celkový přínos.

Postup zapojení a měření dané úlohy:

Operační zesilovač musí být řádně napájen příslušným napětím. Oproti invertujícímu vstupu [INPUT A] a zemi připojíme sinusové střídavé napětí [U_{IN}^+] ze zdroje [J13], které následně na výstupu [OUTPUT A] oproti zemi budeme měřit osciloskopem.



Schématické zapojení 12: Doporučení cest pro měření A.

Foto autor

Budeme zjišťovat hodnotu zesílení na osciloskopu. Abychom zapojili o. z. pro zesílení, musíme zapojit zpětnou vazbu na invertující větví [J21]. Zpětnou vazbu připojíme skrz [J20], následně vybereme jeden, nebo více rezistorů z výběru [R7] [J7], [R8] [J8], nebo připojíme otočný potenciometr [B1] [J10]. Na invertující větví zvolíme z odporů [R1] [J1], [R2] [J2], [R3] [J3] buď jejich paralelní kombinaci, nebo jenom jeden. Na obou větvích existuje paralelní připojení dalších prvků přes konektory banánků.

Po zvolení odporů, tím i poměru, bude zesílení patřičným způsobem změněno. Vypočítáme tudíž nastavený poměr a vypočítáme očekávanou hodnotu zesilovacího činitele. Z osciloskopu vyčteme hodnotu zesílení a porovnáme výpočet s měřením.

Abychom naměřili více hodnot zesilovacího činitele, budeme měnit poměr odporů. Potenciometr bude k tomuto účelu vhodný kvůli nastavení libovolné hodnoty ve zpětné vazbě, a to teoreticky od $0\ \Omega$ až do $20\ k\Omega$. Abychom zjistili, jak se bude zesílení chovat i v záporném zesílení, využijeme rezistor [R3] s největší hodnotou odporu na invertující větví se zapojením do poměru rezistoru ve zpětné vazbě s nižší hodnotu odporu [B1 nebo R7].

Takto naměříme více hodnot při různých poměrech odporů.

Tento postup měření využijeme i na dalším jiném o. z., kdy po doměření porovnáme a stanovíme odlišnosti chování zesílení při různých poměrech.

4.2 Měření vstupních klidových proudů a proudové nesymetrie

Cílem měření je objasnit nepřesnosti nastaveného zesílení, tím se myslí měření chybových parametrů, které negativně ovlivňují výsledný signál a je třeba proto s nimi počítat. Cílem měření je tedy zjištění vzniku nepřesností na výstupním signálu.

Teoretický rozbor těchto chybových parametrů je obsažen v kapitole 2 v části chybových parametrů (Vstupní klidové proudy I_B^+ , I_B^- a I_B), (Vstupní proudová nesymetrie I_{os}).

Zadání měřicí úlohy:

- Proveďte teoretický rozbor na téma: vstupní klidové proudy a proudová nesymetrie.
- Na přípravku sestavte zapojení nejprve pro měření vstupního klidového proudu na invertující [I_B^-] a dále na neinvertující větvi [I_B^+]. Dopočítejte průměrnou hodnotu klidového proudu [I_B]. Poté vypočítejte nebo zapojte a změřte vstupní proudovou nesymetrii [I_{os}].
 - Sestavte tabulky z naměřených hodnot.
 - Zkontrolujte pravdivost změřených hodnot výpočtem, nebo volbou jiné měřicí metody.
 - Z klidového proudu vypočítejte průměrný klidový proud I_B .
- Porovnejte naměřené hodnoty s hodnotami udávanými v datasheetu alespoň na třech různých operačních zesilovačích.
- Vložte vlastní komentář ohledně vzniku a vlivu těchto nesymetrií na výsledný signál.

Požadavky ve vypracovaném protokolu dané měřicí úlohy:

- Teoretický rozbor všech tří typů klidových proudů a proudové nesymetrie.
- Jednotlivé tabulky všech měřených chybových parametrů pro každý operační zesilovač.
 - Alespoň jedna tabulka pro každý operační zesilovač (min. 3).
 - Tabulka bude obsahovat tyto informace: vstupní klidový proud na invertující a neinvertující větvi, průměrná hodnota proudu a proudová nesymetrie a porovnání s hodnotami z datasheetu zkoumaných operačních zesilovačů.
 - Tabulka bude popisovat porovnání naměřených hodnot s hodnotami v datasheetu.
- Vzorový příklad, použité vztahy a vzorce.
- Porovnání operačních zesilovačů.
- Závěr popisující výsledky z měření a nové získané znalosti a celkový přínos.

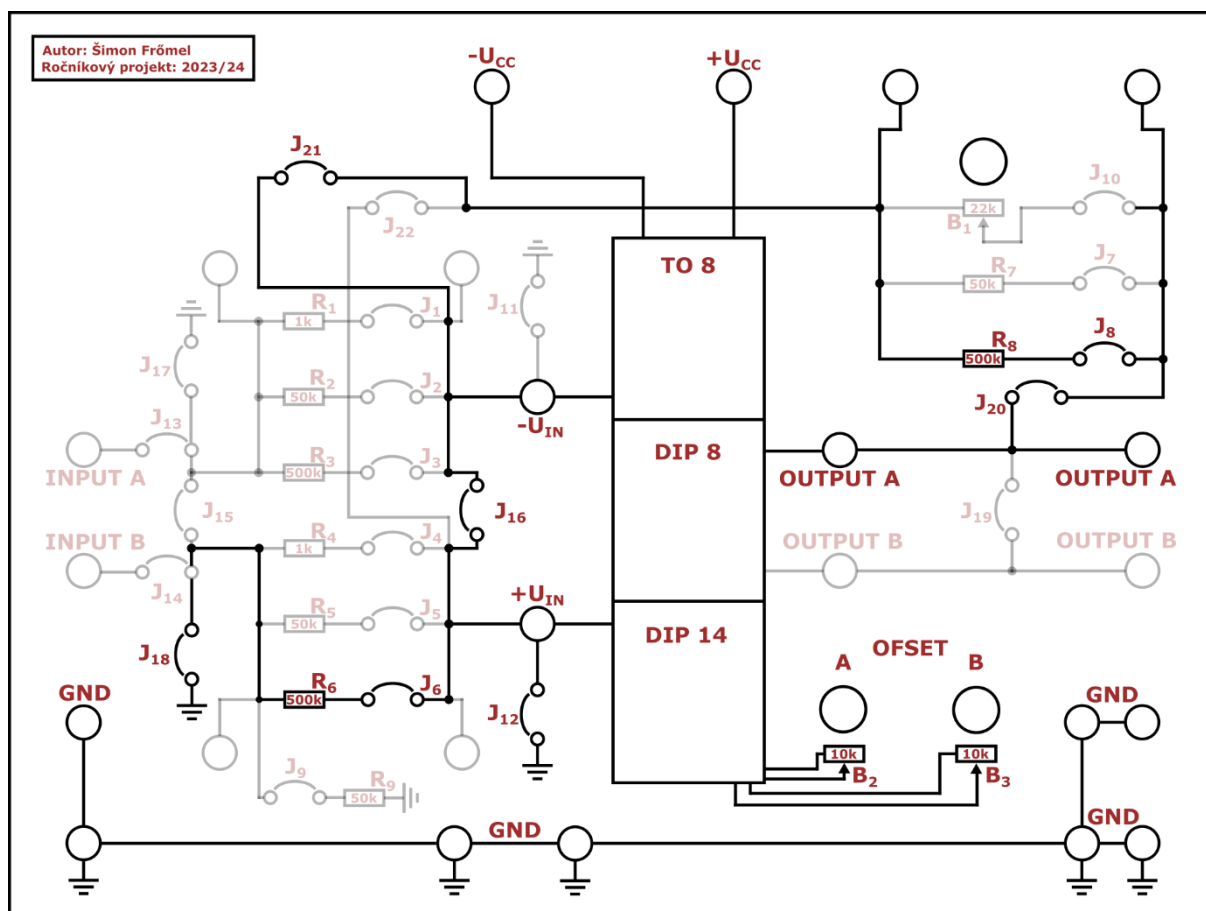
Postup zapojení a měření dané úlohy:

Operační zesilovač musí být řádně napájen symetrickým napětím.

Pro měření klidového proudu na neinvertující větvi [I_B^+] uzemníme tento vstup [J12]. Opačný vstup, tudíž invertující uzemníme taktéž, ale skrz zpětnou vazbu [J21] přes rezistor s co nejvyšší hodnotou odporu [R8] [J8] a zpětnou vazbu připojíme na výstup [J20]. Výstup [OUTPUT A] musíme propojit banánkem se zemí [GND]. (Důvodem zvolení největšího odporu je eliminace

vlivu proudu na této větvi pro proud měřený.) Miliampérmetrem poté přímo měříme vstupní klidový proud na neinvertující větvi na zdírkách [$+U_{IN}$ a GND].

Pro měření klidového proudu na invertující větvi [I_B^-] uzemníme tento vstup [J11]. Opačný vstup, tudíž neinvertující, uzemníme taktéž, ale skrz zpětnou vazbu [J22] a rezistor [R8], s co nejvyšší hodnotou odporu [J8]. Zpětnou vazbu připojíme na výstup [J20]. Výstup [OUTPUT A] musíme propojit banánkem se zemí [GND]. Miliampérmetrem poté rovnou měříme vstupní klidový proud na invertující větvi na zdírkách [$-U_{IN}$ a GND].



Schématické zapojení 13: Doporučení cest pro měření I_B a I_{OS} .
Foto autor

Oba klidové proudy také můžeme měřit milivoltmetrem na výstupu [OUTPUT A] oproti zemi [GND]. Po zjištění vypočítáme dle patřičného vztahu: (Rovnice 1: Výpočet vstupních klidových proudů I_{B+} a I_{B-}). Tímto krokem můžeme provést kontrolu správnosti.

Průměrný klidový proud vypočítáme ze vztahu: (Rovnice 2: Výpočet průměrné hodnoty klidového proudu I_B).

Pro změření proudové nesymetrie musíme obě větve uzemnit na společnou zem skrze rezistor s co největší hodnotu. K invertující větvi připojíme zpětnou vazbu [J21 a J20] s rezistorem [R8]. Neinvertující větev připojíme k zemi [J18] skrz rezistor [R6] [J6]. Následně měříme milivoltmetrem na výstupu zdírek [OUTPUT A] a zemí [GND]. Výslednou proudovou nesymetrii vypočítáme ze vztahu: (Rovnice 4: Výpočet proudové nesymetrie I_{OS}).

4.3 Měření poměru potlačení souhlasného režimu a napět'ové nesymetrie

Cílem měření je pochopení rozdílu mezi vstupy operačního zesilovače a jejich výsledné chování při nastavení signálů na oba vstupy. Zároveň se snažíme pochopit princip, vznik a dopad poměru potlačení souhlasného režimu a vliv napět'ové nesymetrie na výstupním napětí.

Teoretický rozbor těchto chybových parametrů je obsažen v kapitole 2 v části chybových parametrů (Vstupní napět'ová nesymetrie U_{OS}) a (Poměr potlačení souhlasného režimu CMRR).

Zadání měřicí úlohy:

- Proveďte teoretický rozbor na téma: poměr potlačení souhlasného režimu a napět'ové nesymetrie.
- Na přípravku sestavte zapojení pro změření poměru potlačení souhlasného režimu.
 - Zvolte takové napětí, které je vhodné pro daný operační zesilovač.
- Na přípravku sestavte zapojení pro změření napět'ové nesymetrie.
 - Na oba vstupy operačního zesilovače zvolte takové rezistory, které budou stejné.
- Tato měření proveďte alespoň na třech různých operačních zesilovačích.
- Porovnejte naměřené hodnoty s udávanými hodnotami v datasheetu jednotlivých operačních zesilovačů.
 - Z naměřených a vypočítaných hodnot vypracujte tabulky.
 - Dospějte k výsledkům různými metodami, nebo výpočty k přesnějším výsledkům.
- Vložte vlastní komentář ohledně vzniku a vlivu těchto nesymetrií na výsledném signálu.

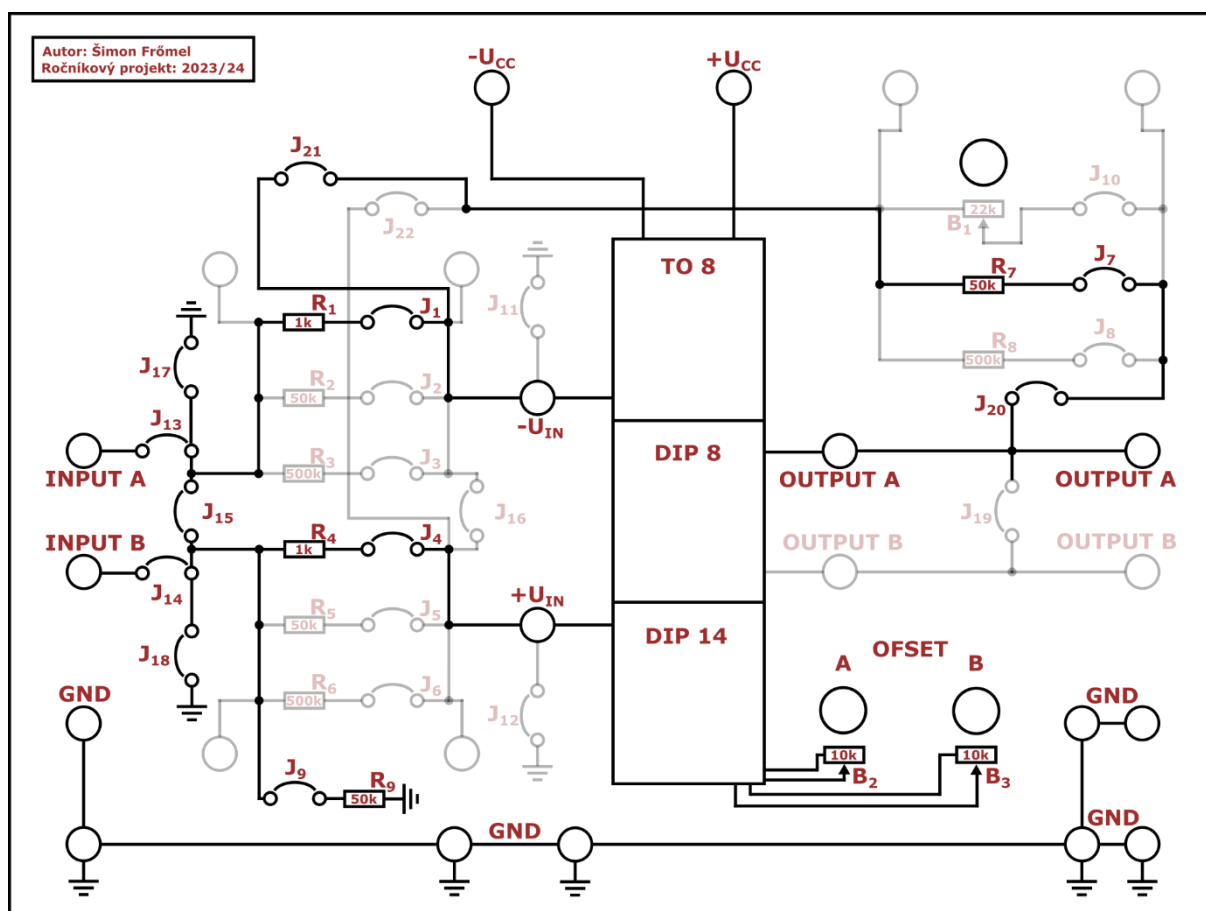
Požadavky ve vypracovaném protokolu dané měřicí úlohy:

- Teoretický rozbor pro parametry: poměr potlačení souhlasného režimu a napět'ová nesymetrie.
- Jednotlivé tabulky všech měřených chybových parametrů pro každý operační zesilovač.
 - Tabulka bude obsahovat tyto informace: činitele CMRR, hodnotu napět'ové nesymetrie a porovnání s hodnotami z datasheetu zkoumaných operačních zesilovačů.
 - Tabulka bude popisovat porovnání naměřených hodnot s hodnotami v datasheetu.
- Vzorový příklad, použité vztahy a vzorce.
- Porovnání operačních zesilovačů.
- Závěr popisující výsledky z měření a nové získané znalosti a celkový přínos.

Postup zapojení a měření dané úlohy:

Operační zesilovač musí být řádně napájen příslušným napětím. Na vstup A [INPUT A] připojte oproti zemi stejnosměrnou hodnotu napětí +9 V. Na vstup B [INPUT B] připojte oproti zemi stejnosměrnou hodnotu napětí -9 V. Vždy měřte pouze s jedním typem napětí.

Na invertující větvi připojíme rezistor [R1] [J1], dále připojíme k invertující větvi zpětnou vazbu [J21 a J20] s rezistorem [R7] [J7]. Na neinvertující větvi připojíme rezistor se stejnou hodnotu jak na invertující, tudíž [R4] [J4], dále neinvertující větev také připojíme k výstupu, ale skrz společnou zem se stejným rezistorem jako je na druhé větvi ve zpětné vazbě. Invertující a neinvertující vstup spojíme před rezistory jumperem [J15]. Toto zapojení je pro diagnostiku CMRR.



Schématické zapojení 14: Doporučení cest pro měření CMRR a U_{OS} .

Foto autor

Abychom CMRR správně vypočítali, budeme potřebovat napětí mezi vstupy [ΔU_{IN}^+], které změříme milivoltmetrem a také napětí mezi výstupem a zemí [U_{OUT}^+]. Prohodíme vstupní signál z +9 V na -9 V a znovu změříme napětí mezi vstupy [ΔU_{IN}^-] a napětí mezi výstupem proti zemi [U_{OUT}^-]. Tyto čtyři údaje dosadíme do vzorce (Rovnice 7: Výpočet ΔU_{IN}) a máme činitel potlačení v dB.

Pro změření napěťové nesymetrie se musí obě větve uzemnit přes stejné rezistory s co nejmenší hodnotou odporu. Pro invertující větev to bude rezistor [R1] [J1] s uzemňovací propojkou [J17]. K této větvi ale ještě připojíme zpětnou vazbu [J21 a J20] s rezistorem [R7] [J7]. Neinvertující větev připojíme k zemi [J18] přes rezistor se stejnou hodnotou [R4] [J4]. Výstupní napětí [U_{OUT}] měříme milivoltmetrem na výstupu [OUTPUT A] proti zemi [GND].

Pro následné dopočítání napěťové nesymetrie musíme využít rovnice: (Rovnice 6: Výpočet napěťového offsetu UOS). Rychlejším postupem pro stanovení napěťové nesymetrie je výpočet rozdílu jednotlivých napětí milivoltmetrem na vstupech oproti zemi [$+U_{IN}$ a $-U_{IN}$]. Pro tuto metodu platí vztah: (Rovnice 5: Výpočet napěťového offsetu UOS pomocí rozdílu).

Opět můžeme porovnat metody a určit přesnější metodu.

4.4 Měření rychlosti přeběhu

Cílem měření je diagnostikování vhodnosti použití vybraného operačního zesilovače ve vysokofrekvenčních aplikacích, kde rychlost přeběhu je klíčová. Součástí měření je i práce s osciloskopem a funkčním generátorem.

Teoretický rozbor tohoto dynamického parametru je obsažen v kapitole 3 v části dynamických parametrů (Rychlost přeběhu SR).

Zadání měřicí úlohy:

- Proved'te teoretický rozbor na téma: dynamické parametry a rychlost přeběhu.
- Na přípravku proved'te zapojení pro měření rychlosti přeběhu metodou frekvenčního pročešání.
 - Pro měření použijte funkční generátor schopný obdélníkového signálu při vysokých frekvencích a osciloskop s vysokou rozlišovací schopností.
 - Proved'te alespoň 8 měření, při každém zapište nebo dopočítejte alespoň tyto údaje: doba reakce, napěťová reakce, rychlost přeběhu a měřená frekvence.
 - Každé měření bude při jiné dekádě frekvence (10 Hz, 100 Hz... 1 GHz).
- Ve volně dostupném simulačním programu sestrojte simulaci frekvenčního „pročešání“ pro změření rychlosti přeběhu.
 - Porovnejte naměřené a nasimulované výsledky.

Požadavky ve vypracovaném protokolu dané měřicí úlohy:

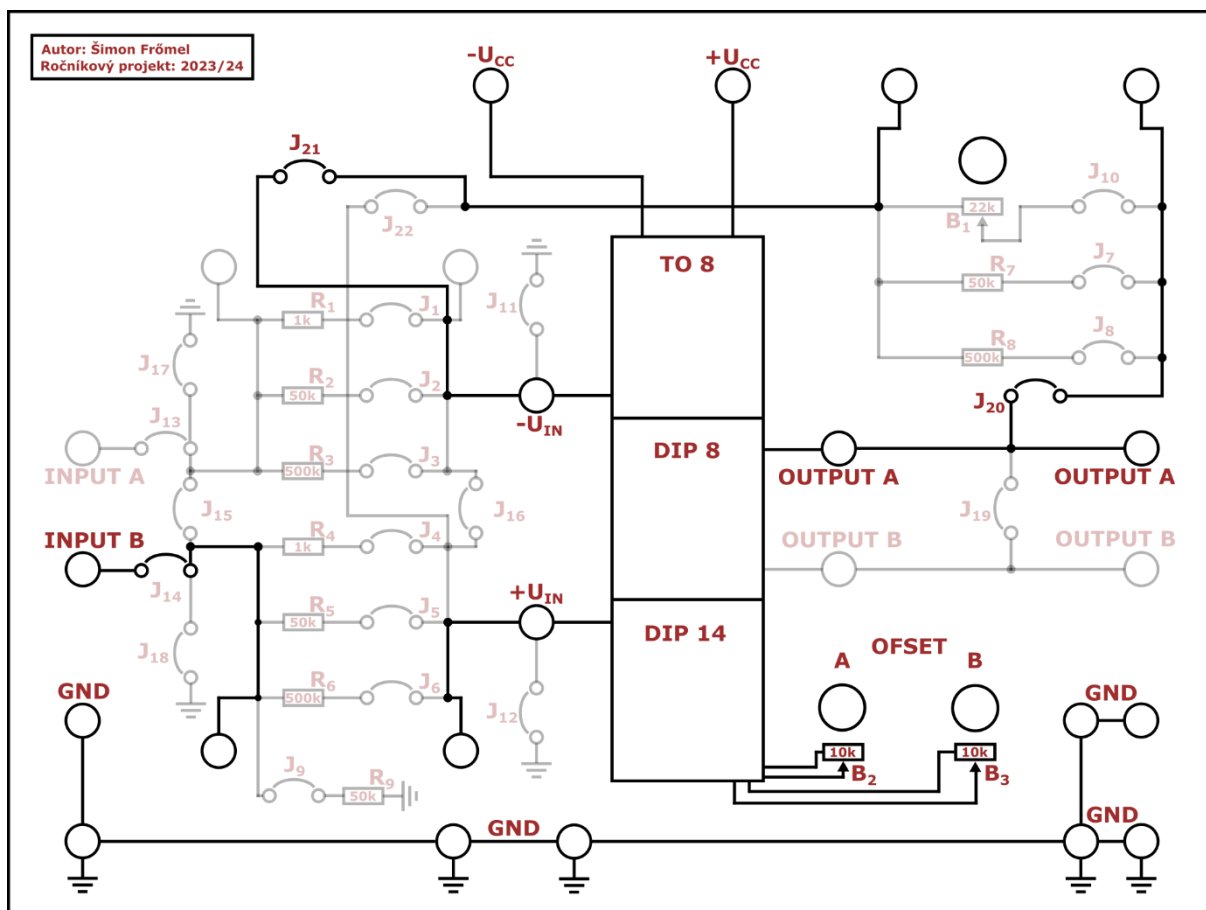
- Teoretický rozbor na téma: dynamické parametry a rychlost přeběhu.
- Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot frekvenčním „pročešáním“.
 - Tabulka bude obsahovat tyto informace: doba reakce, napěťová reakce, rychlost přeběhu a měřená frekvence.
 - Tabulka také bude popisovat patřičným způsobem rozdíly oproti nasimulované verzi.
- Graf libovolného měřeného průběhu s viditelnou rychlostí přeběhu.
 - Budou znázorněny jednotlivé parametry tohoto přeběhu.
- Závěr popisující výsledky z měření a nové získané znalosti a celkový přínos.

Postup zapojení a měření dané úlohy:

Operační zesilovač bude napájen příslušným napájecím napětím. Dle schématu zapojíme operační zesilovač jako sledovač na přípravku následovně: invertující větev připojíme na zpětnou vazbu jumpery [J20 a J21]. Obsah zpětné vazby vyzkratujeme banánkem propojením externích zdírek ve zpětné vazbě.

Na vstupu neinvertující větvi [U_{IN}^+] oproti společné zemi připojíme funkční generátor s nastaveným obdélníkovým signálem a výstupní signál měříme na výstupních zdírkách [OUTPUT A] proti zemi.

Zesilovač by měl fungovat pouze jako přenašeč signálu, bez jediné úpravy, to ale nebude pravda, při vyšších kmitočtech operační zesilovač nebude spolehlivě stíhat přenášet tento signál dál. Proto připojíme signál obdélníkového průběhu na jeho vstupu při nízké frekvenci a postupně zvyšujeme frekvenci. To probíhá do okamžiku, kdy se na osciloskopu začne zobrazovat zkreslený obdélníkový průběh (zkosený na pravou stranu). V tento moment již operační zesilovač nespolehlivě přenáší signál, a tudíž je rychlost přeběhu nedostatečná pro stávající aplikaci.



Schématické zapojení 15: Doporučení cest pro měření SR.

Foto autor

Pro zjištění hodnoty rychlosti přeběhu potřebujeme osciloskopem zobrazit výstupní signál z operačního zesilovače, kdy změříme rozdíl napětí v časovém intervalu $1\mu s$. Tento moment nastane při prvním viditelném zkosení.

Pro zjištění napěťové reakce změříme počet dílků na ose y od nejnižší úrovně signálu po nejvyšší úroveň signálu v celém jeho sklonu, zapíšeme si také konstantu. Údaje vynásobíme mezi sebou a dostaneme hodnotu napěťové reakce $[\Delta U]$.

Pro zjištění doby reakce změříme počet dílků na ose x od začátku stoupání po konec v části jeho sklonu, zapíšeme si také konstantu. Vynásobíme mezi sebou a dostaneme hodnotu doby reakce $[\Delta t]$.

Oba parametry $[\Delta U]$ a $[\Delta t]$ teď vynásobíme dle vzorce: (Rovnice 13: Výpočet rychlosti přeběhu SR) a máme změřenou hodnotu rychlosti přeběhu $[SR]$

4.5 Měření frekvenční charakteristiky

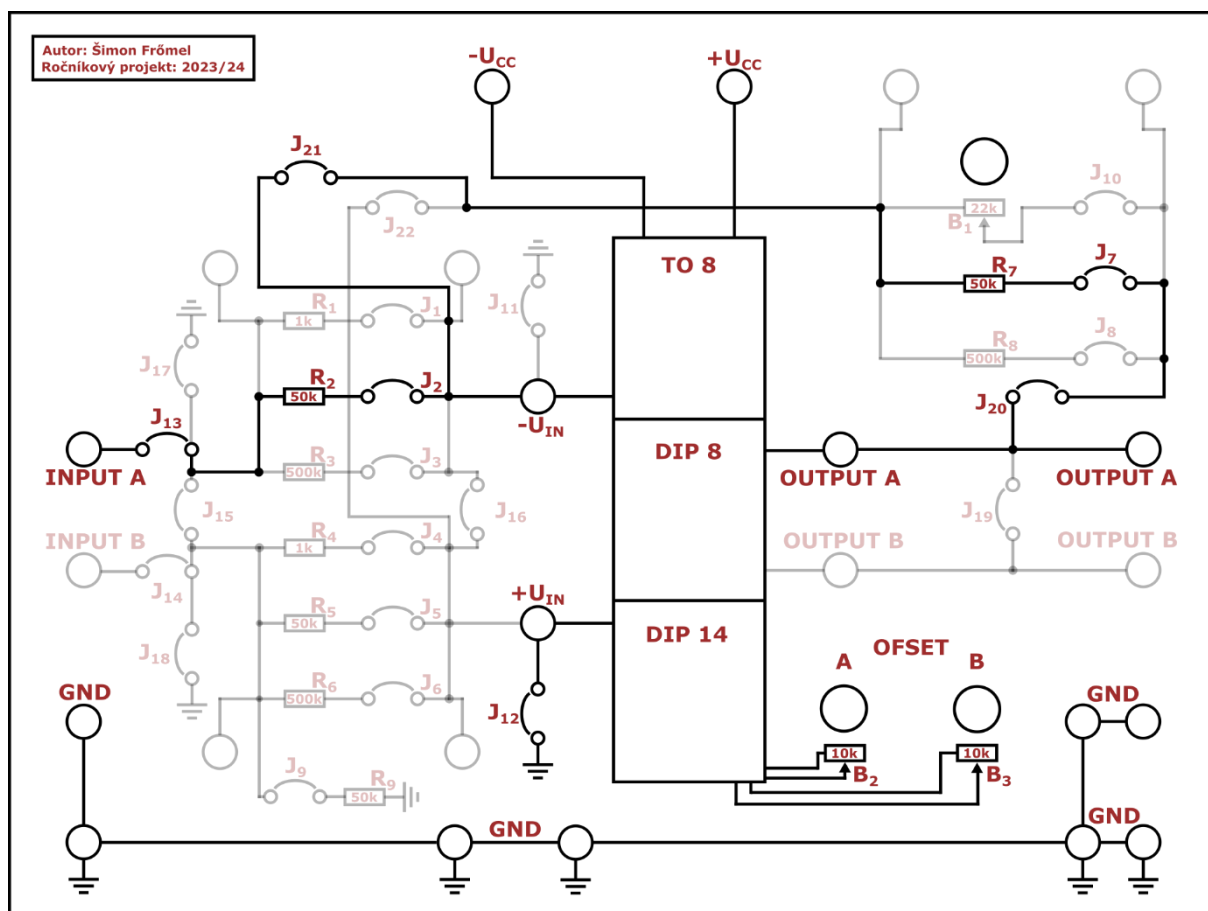
Cílem měření je sestrojení grafu frekvenční charakteristiky pro stanovení vhodné šířky pásma s vyhovujícím zesílením. Součástí měření bude práce s funkčním generátorem a osciloskopem.

Zadání měřicí úlohy:

- Proveďte teoretický rozbor na téma: frekvenční charakteristiky operačních zesilovačů a parametrů šířky pásma [B], produktu zesílení a šířky pásma [GBP] a frekvence jednotkového zesílení [UGB].
- Na přípravku sestrojte zapojení pro diagnostiku metodou frekvenčního pročištění.
 - Měřte pouze s nastaveným poměrem odporů, zvolte si poměr a při tomto nastavení jej měřte. Nastavení již neměňte.
 - Zaznamenejte několik bodů v obou oblastech [B] a [GBP].
 - Měřte tak, abyste zaznamenali co nejvíce údajů kolem hranice horní meze f_c .
 - Zkuste zjistit pomocí osciloskopu a funkčního generátoru bod [UGB].
- Sestrojte graf frekvenční charakteristiky.
 - V grafu vyznačte oblast šířky pásma [B] a oblast produktu zesílení a šířky pásma [GBP].
 - Z grafu stanovte frekvenci při jednotkovém zesílení [UGB].
 - Graf řádně popište.

Požadavky ve vypracovaném protokolu dané měřicí úlohy:

- Teoretický rozbor na téma: frekvenční charakteristiky operačních zesilovačů a parametrů šířky pásma [B], produktu zesílení a šířky pásma [GBP] a frekvence jednotkového zesílení [UGB].
- Tabulka změřených bodů.
 - Tabulka bude obsahovat tyto informace: nastavená frekvence, zisk, bod.
 - Vypočtené f_c a [UGB] zaznamenejte také jako body.
 - Tabulka bude popisovat body na frekvenční charakteristice.
- Sestrojení frekvenční charakteristiky.
 - Bude obsahovat všechny naměřené body včetně vypočítaných bodů f_c a [UGB]. Také bude mít vyznačené oblasti [B] a [GBP].
 - Osa horizontální (x) bude v logaritmickém měřítku a bude představovat frekvenci. Osa vertikální (y) bude představovat úroveň zisku [a] v decibelech.
 - Frekvenční charakteristika bude řádně popsána.
- Rozeberte postup výpočtu pro frekvenci horní meze f_c a frekvenci při jednotkovém zesílení.



Schématické zapojení 16: Doporučení cest pro měření frek. char.

Foto autor

Postup zapojení a měření dané úlohy:

Operační zesilovač musí být řádně napájen. Na vstup A [INPUT A] připojíme funkční generátor se sinusovým průběhem. Na výstup A [OUTPUT A] připojíme k zemi osciloskop. Invertující vstup připojíme na vstup A propojkou [J13], vybereme rezistor [R2] [J2] a také připojíme zpětnou vazbu jumperem [J21 a J20]. Rezistor ve zpětné vazbě zvolíme [R7] [J7]. Neinvertující vstup připojíme rovnou na společnou zem jumperem [J12].

Než začneme měřit, potřebujeme znát maximální možný zisk v tomto zapojení. Toto zapojení je se zpětnou uzavřenou vazbou, takže maximální zisk je již limitován. Vzorec pro výpočet zisku [a] je zde: (Rovnice 9: Výpočet zisku a). Ze zisku můžeme rovnou vypočítat maximální možný zesilovací činitel $[A_v]$, který následně použijeme pro výpočet [UGB]. Vzorec pro převod ze zisku na činitel je zde: (Rovnice 15: Převod z logaritmického čísla).

Na generátoru budeme nastavovat frekvence po dekádách. Nastavíme si frekvenci 10 Hz na osciloskopu a zapíšeme výšku amplitudy, kterou porovnáme se vstupní amplitudou. Následně zvýšíme frekvenci o dekádu, tedy 100 Hz a zapíšeme opět porovnání, takto pokračujeme do doby, než se porovnání začne lišit o víc jak 3 dB.

V bodě, kde začne klesat zisk s rostoucí frekvencí, změříme další hodnoty. Tato hranice je při frekvenci horní meze $[f_c]$. I po této hranici se může hodnota frekvence neustále zvedat, avšak na úkor zisku. Ted' hledáme moment, při kterém zesílení bude nulové, zisk bude $[A = 0 \text{ dB}]$ a zesilovací činitel $[A = 1]$. V tomto bodě najdeme frekvenci jednotkového zesílení [UGB]. Tuto frekvenci těžko vypočítáme, takže ji co nejpřesněji změříme. Za tímto bodem dál neměříme.

Šířku pásma [B] tedy vypočítáme jako: viz (Rovnice 14: Výpočet šířky pásma B). [GBP] vypočítáme jako: viz (Rovnice 17: Výpočet produktu zesílení a šířky pásma GBP).

Závěr

V teoretické části práce objasňuji základní principy měření na operačních zesilovačích a uvádím popis operačního zesilovače, včetně detailní analýzy jeho parametrů. Tuto část jsem zpracoval v textové formě, aby ji bylo možné prakticky využívat jako vzdělávací materiály vhodné pro výukové účely.

V praktické části jsem navázal na část teoretickou a vypracoval dle vybraných parametrů pět intuitivních měřících úloh. Konkrétní měřící úlohy na sebe logicky navazují dle náročnosti a požadavků. V programu CircuitMaker jsem po několika pokusech a přemodelování dovedl návrh desky plošných spojů do závěrečné podoby. V aplikaci Onshape jsem vytvořil model krabičky. Otvory na horní části krabičky jsem přizpůsobil finálnímu návrhu DPS. Zároveň dle osazovacího plánu jsem sestavil i celkový navigační plánec, který slouží k vizualizaci skrytých komponentů a vodičů. Ten jsem připevnil na horní povrch krabičky.

Výsledkem mé práce je v současné době zhotovený funkční prototyp přípravku pro měření parametrů operačních zesilovačů.

Celkové náklady na zhotovení prototypu přípravku byly následující:

- a) Výroba DPS včetně dopravy, přibližně 300,- Kč
- b) Výroba ochranné krabičky z filamentu PLA, množství 345 g, přibližně 130,- Kč
- c) Osazované součástky, přibližně 400,- Kč

Celková pořizovací částka činí 830,- Kč včetně dopravy. Obdobný přípravek v příznivé cenové relaci není, bohužel, na našem trhu dostupný. Jelikož účelem přípravku je jeho využití jako učební pomůcka, je možná oblast potenciálních zájemců omezena na odborné školy se zaměřením na elektroniku.

Následovat bude postupně výroba dalších 9 kusů přípravků, tak aby mohly být k dispozici všem studentům jedné měřící skupiny. Přípravky se budou používat v hodinách praktického měření v předmětu Elektrická měření. Studenti budou mít k dispozici také doprovodné studijní materiály a zadání konkrétních měřících úloh.

5 Seznam zkratek

o. z.	operační zesilovač
IO	integrovaný obvod
tzv.	takzvaně
ELM	Elektrická měření
PRA	praxe
DPS	deska plošných spojů
PLA	kyselina polymléčná – „polylactic acid“
DIP	pouzdro se dvěma řadami vývodů – „dual inline package“
TO	pouzdro pro tranzistory – „transistor outline“
THT	technologie prokovových děr – „through-hole technology“
R	rezistor
B	potenciometr
D	dioda
LED	elektroluminiscenční dioda – „light emitting diode“
J	zkratovací propojka – „jumper“
pin	zdířka pro kabel banánku
socket	patice
frek. char.	frekvenční charakteristiky

Fyzikální veličiny, popis a jednotka:

U	napětí	[V] volt
I	proud	[A] ampér
A	zesilovací činitel	bezrozměrná veličina
a	zisk	[dB] decibel
R	odpor	[Ω] ohm
f	frekvence	[Hz] hertz
T	perioda	[s] sekunda
t	čas	[s] sekunda
SR	rychlost přeběhu	[V/s] volt za sekundu
B	šířka pásma	[Hz] hertz
GBP	produkt zesílení a šířky pásma	[Hz] hertz
UGB	frekvence při jednotkovém zesílení	[Hz] hertz
CMRR	poměr potlačení souhlasného režimu	[dB] decibel

6 Seznam schématických zapojení, obrázků, rovnic a tabulek

6.1 Seznam schématických zapojení

Schématické zapojení 1: Základní označení operačního zesilovače. Foto autor.....	10
Schématické zapojení 2: Základní zapojení o. z. Foto autor	11
Schématické zapojení 3: Měření vstupního klidového proudu I_B^+ . Foto autor	16
Schématické zapojení 4: Měření vstupního klidového proudu I_B^- . Foto autor.....	16
Schématické zapojení 5: Měření průměrné hodnoty klidového proudu I_B . Foto autor	16
Schématické zapojení 6: Měření proudové nesymetrie I_{OS} . Foto autor.....	17
Schématické zapojení 7: Měření napětíové nesymetrie U_{OS} . Foto autor	18
Schématické zapojení 8: Měření zesilovacího činitele A. Foto autor	20
Schématické zapojení 9: Měření CMRR. Foto autor	21
Schématické zapojení 10: Měření rychlosti přeběhu SR. Foto autor	22
Schématické zapojení 11: Měření metodou frekvenční odezvy. Foto autor	24
Schématické zapojení 12: Doporučení cest pro měření A. Foto autor	35
Schématické zapojení 13: Doporučení cest pro měření I_B a I_{OS} . Foto autor	38
Schématické zapojení 14: Doporučení cest pro měření CMRR a U_{OS} . Foto autor	40
Schématické zapojení 15: Doporučení cest pro měření SR. Foto autor	43
Schématické zapojení 16: Doporučení cest pro měření frek. char. Foto autor.....	45

6.2 Seznam rovnic

Rovnice 1: Výpočet vstupních klidových proudů I_B^+ a I_B^-	15
Rovnice 2: Výpočet průměrné hodnoty klidového proudu I_B	16
Rovnice 3: Výpočet proudového offsetu I_{OS} pomocí rozdílu	17
Rovnice 4: Výpočet proudové nesymetrie I_{OS}	17
Rovnice 5: Výpočet napětíového offsetu U_{OS} pomocí rozdílu.....	19
Rovnice 6: Výpočet napětíového offsetu U_{OS}	19
Rovnice 7: Výpočet ΔU_{IN}	20
Rovnice 8: Výpočet zesilovacího činitele A.....	20
Rovnice 9: Výpočet zisku a	20
Rovnice 10: Výpočet činitele poměru potlačení souhlasného napětí CMRR	21
Rovnice 11: Výpočet doby reakce Δt	23
Rovnice 12: Výpočet napětíové reakce ΔU	23
Rovnice 13: Výpočet rychlosti přeběhu SR	23
Rovnice 14: Výpočet šířky pásma B	24
Rovnice 15: Převod z logaritmického čísla	24
Rovnice 16: Převod do logaritmického čísla.....	24
Rovnice 17: Výpočet produktu zesílení a šířky pásma GBP.....	24

6.3 Seznam obrázků

Obrázek 1: Frekvenční charakteristika. Foto autor	14
Obrázek 2: Schématický plán DPS, z CircuitMaker. Foto autor	26
Obrázek 3: Pohled na návrh DPS, z CircuitMaker. Foto autor	27
Obrázek 4: 3D pohled na návrh DPS, z CircuitMaker. Foto autor	28
Obrázek 5: Celkový navigační plánek, z Inkscape. Foto autor	29
Obrázek 6: Transparentní pohled dovnitř krabičky, z Onshape. Foto autor	30
Obrázek 7: Celkový pohled na krabičku, z Onshape. Foto autor	30
Obrázek 8: Pohled – půdorys s navigačním plánkem, z Onshape. Foto autor	30
Obrázek 9: Pohled – bokorys v řezu z Onshape. Foto autor	31
Obrázek 10: Pohled na krabičku s detailem provedení hran, z Onshape. Foto autor	31
Obrázek 11: Pohled – vnitřní část – zapuštění obou částí krabičky, z Onshape. Foto autor	31

6.4 Seznam tabulek

Tabulka 1: Detailní parametry rezistorů. Zdroj dat: autor	32
Tabulka 2: Charakteristika jednotlivých patic. Zdroj dat: autor	32
Tabulka 3: Charakteristika diod, LED diod, jumperů a zdířek. Zdroj dat: autor	32

7 Bibliografický záznam

TKOTZ, Klaus; BASTIAN, Peter; BUMILLER, Horst; BURGMAIER, Monika; EICHLER, Walter et al. *Příručka pro elektrotechniku*. 2. doplněné vydání, dotisk. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2017. ISBN 978-38-0853-034-4.

KUČERA, Tomáš. *Vytváření SPICE modelů OZ s ověřením jejich přesnosti*. PDF, Bakalářská práce, vedoucí Ing. Zdeněk Roubal. Brno: Vysoké učení technické, fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií; ústav radioelektroniky, 2011. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/11012/6826>.

SUCHÝ, Zbyněk. *Ek3r - Suchý - Operační zesilovače 4, derivační a integrační*. Online. YouTube. 2020. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=koucbAZnPfw&list=PLHSvJBhPt0xIP2w9wVAxr-1GCfo37Pt8&index=4>. [cit. 2024-01-06].

SUCHÝ, Zbyněk. *Ek3r - Suchý - Operační zesilovače 2, základní zapojení*. Online. YouTube. 2020. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=r80CBbMTUso&list=PLHSvJBhPt0xIP2w9wVAxr-1GCfo37Pt8&index=2>. [cit. 2024-01-06].

SUCHÝ, Zbyněk. *Ek3r - Suchý - Operační zesilovače 3, součtový a rozdílový*. Online. YouTube. 2020. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=GCoP7lh5Iik&list=PLHSvJBhPt0xIP2w9wVAxr-1GCfo37Pt8&index=3>. [cit. 2024-01-06].

SUCHÝ, Zbyněk. *Ek3r - Suchý - Operační zesilovače 1, úvod a historie*. Online. YouTube. 2020. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=a4gKjlfJsQg&list=PLHSvJBhPt0xIP2w9wVAxr-1GCfo37Pt8&index=3>. [cit. 2024-01-06].

HOSPŮDKA, Jiří. *Elektronické obvody: Reálné vlastnosti operačního zesilovače*. PDF. Kapitola 12. Licence: CC. Praha, 2020. Dostupné z: https://hippo.feld.cvut.cz/vyuka/soubory/oz_re.pdf. [cit. 2024-01-06].

HOSPŮDKA, Jiří. *Oz lab*. Online. YouTube. 2020. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=W5FUXiiyvqU>. [cit. 2024-01-06].

TEJA, Ravi. *IC 741 Op Amp Basics, Characteristics, Pin Configuration, Applications*. Online. ElectronicsHub. © 2023. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/ic-741-op-amp-basics/>. [cit. 2024-01-06].

ZEMÁNEK, Miroslav. *Operační zesilovače*. PDF. Brno, 2015. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/sci/jaro2015/F6270/um/Operacni_zesilovace_navod.pdf. [cit. 2024-01-06].

BIOLEK, Dalibor. *Analogové elektronické obvody Hybridní studijní texty Nesetrvačné obvody s operačními zesilovači*. PDF. Rev. 2. Brno, 2019. Dostupné z: https://user.unob.cz/biolek/vyukaVUT/skripta/Sbirka_OZ3.pdf. [cit. 2024-01-06]. Studijní materiály.

WILLIAMS, David. *Op Amp Open Loop vs Closed Loop Gain Response*. Online. ELECTRONX LAB. YouTube. 2022. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=W67fa4n0RUU>. [cit. 2024-02-14].

AN AVNET. *Farnell: engineering glossary*. Online. AN AVNET. Farnell: engineering glossary. Dostupné z: <https://cz.farnell.com/en-CZ/engineering-glossary>. [cit. 2024-01-11].

Electrical4U. *Slew Rate: What is it? (Formula, Units & How To Measure It)*. Online. Electrical 4 U. C2024. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/slew-rate/>. [cit. 2024-02-14].

Anon. *Operační zesilovače, vlastnosti, napájení, zákl. zapojení*. Online. Mylms. C2006-2023. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/operacni-zesilovace-vlastnosti-napajeni-zakl-zapojeni/>. [cit. 2024-01-06].

Anon. *Návrh op-amp obvodů*. Online. DesignSoft Tina. DesignSoft, 2020. Dostupné z: <https://www.tina.com/cs/resources/home/ideal-operational-amplifiers-2/6-design-of-op-amp-circuits/>. [cit. 2024-01-06].

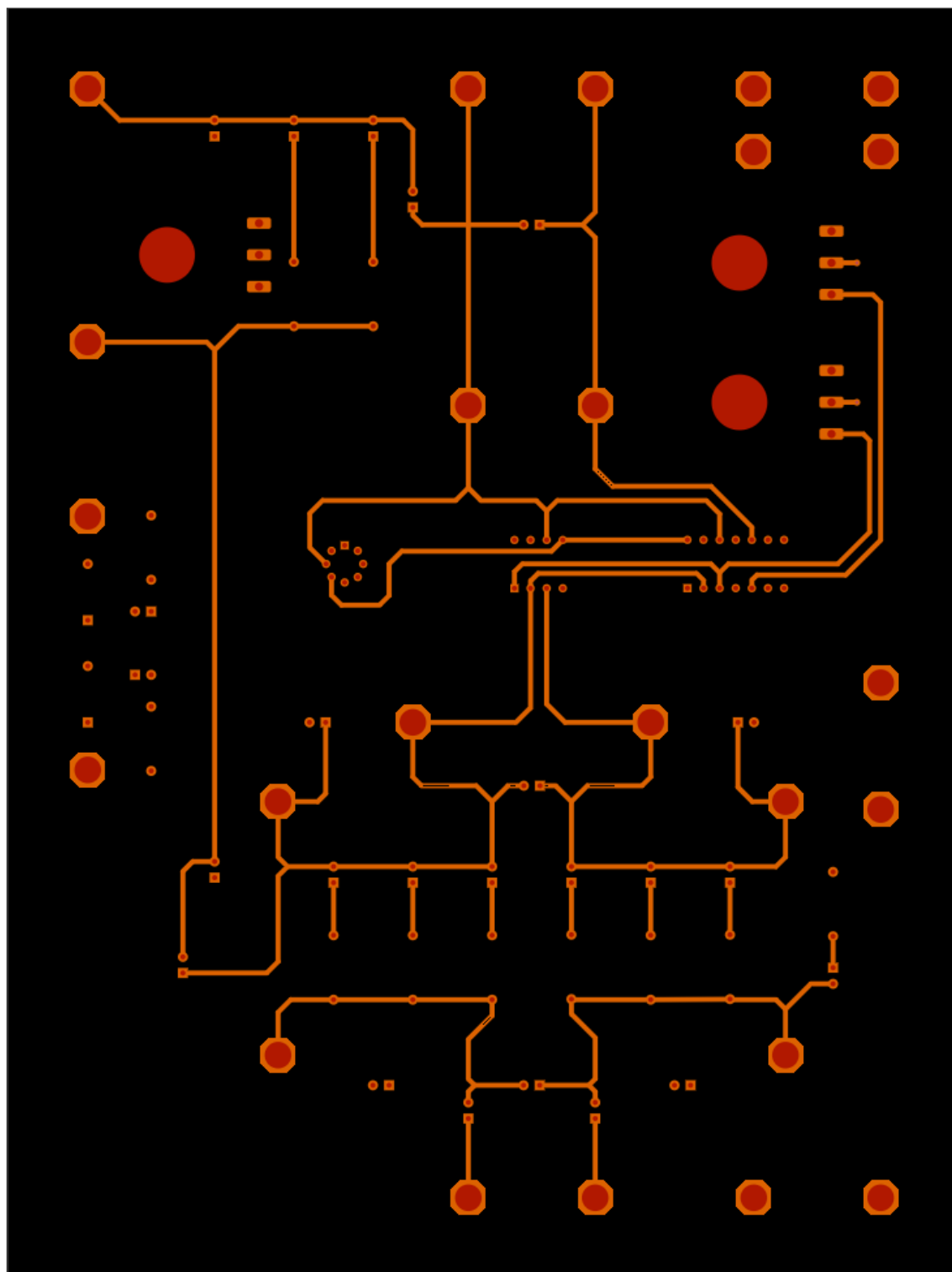
Anon. *Měření parametrů operačního zesilovače: Návod k přípravku pro laboratorní cvičení v předmětu LES*. PDF. 2012. Dostupné z: https://hippo.feld.cvut.cz/vyuka/soubory/navod_oz.pdf. [cit. 2024-01-06].

8 Seznam příloh

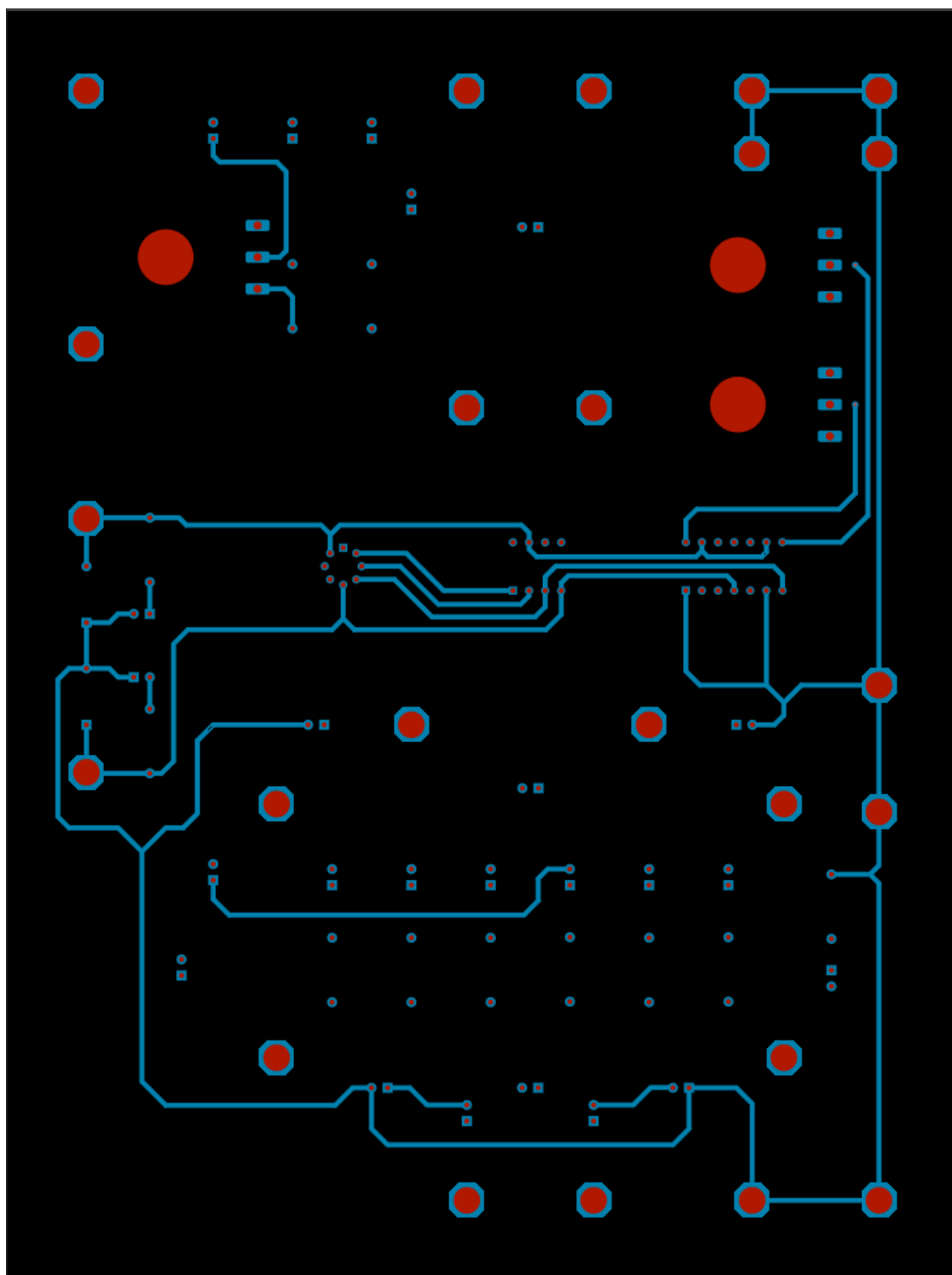
- I. Pohled na vrchní vrstvu vodivých cest návrhu DPS v reálné velikosti 200 x 150 mm
- II. Pohled na spodní vrstvu vodivých cest návrhu DPS v reálné velikosti 200 x 150 mm
- III. Schématický plán návrhu DPS
- IV. Osazovací plán návrhu DPS v reálné velikosti 200 x 150 mm
- V. Celkový navigační plán v reálné velikosti 200 x 150 mm
- VI. Skutečný model přípravku, pohled zprava – názorné zobrazení
- VII. Skutečný model přípravku, pohled shora – názorné zobrazení
- VIII. Skutečný model přípravku, pohled zdola – názorné zobrazení

9 Přílohy

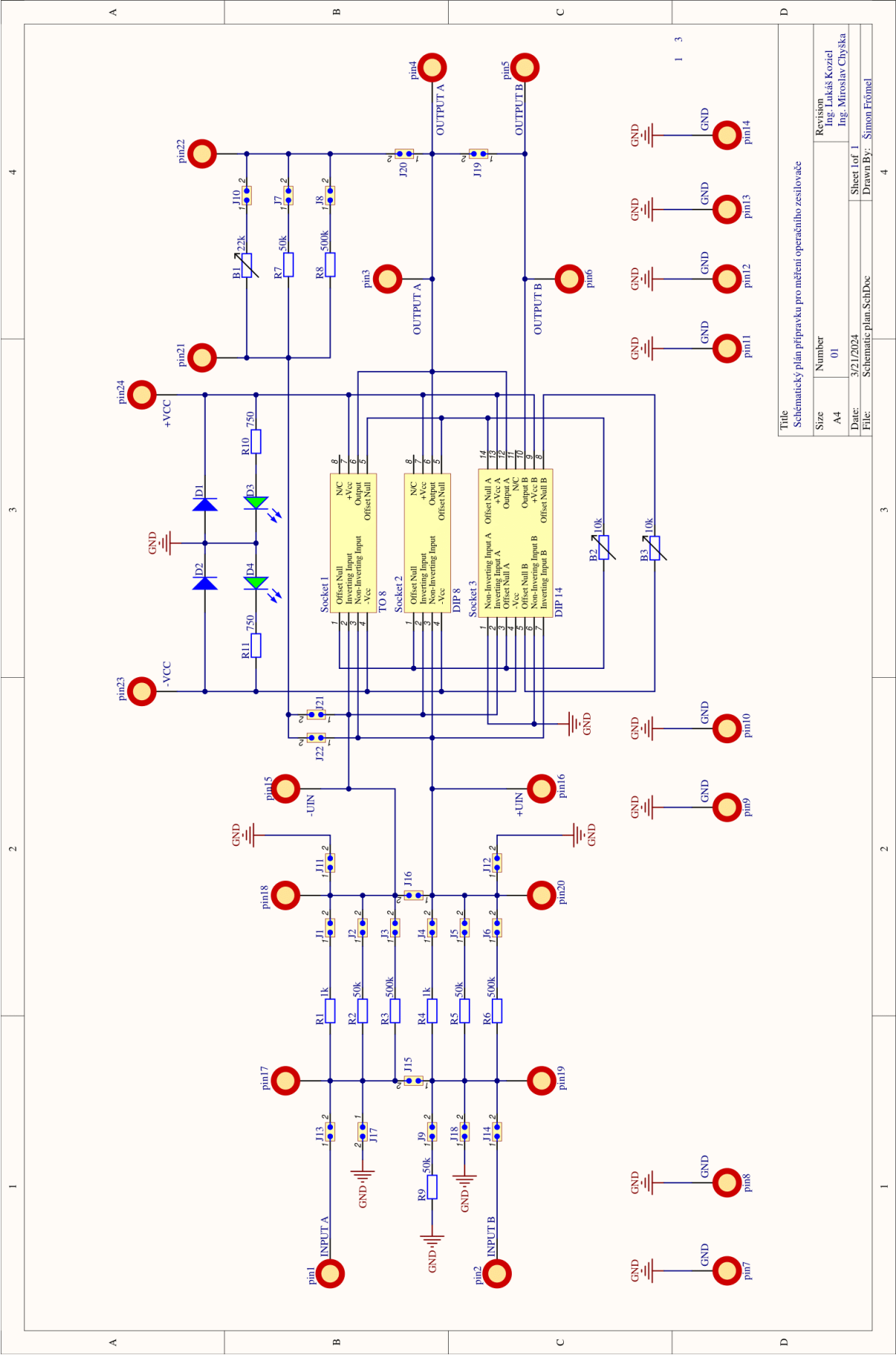
I. Pohled na vrchní vrstvu vodivých cest návrhu DPS v reálné velikosti 200 x 150 mm



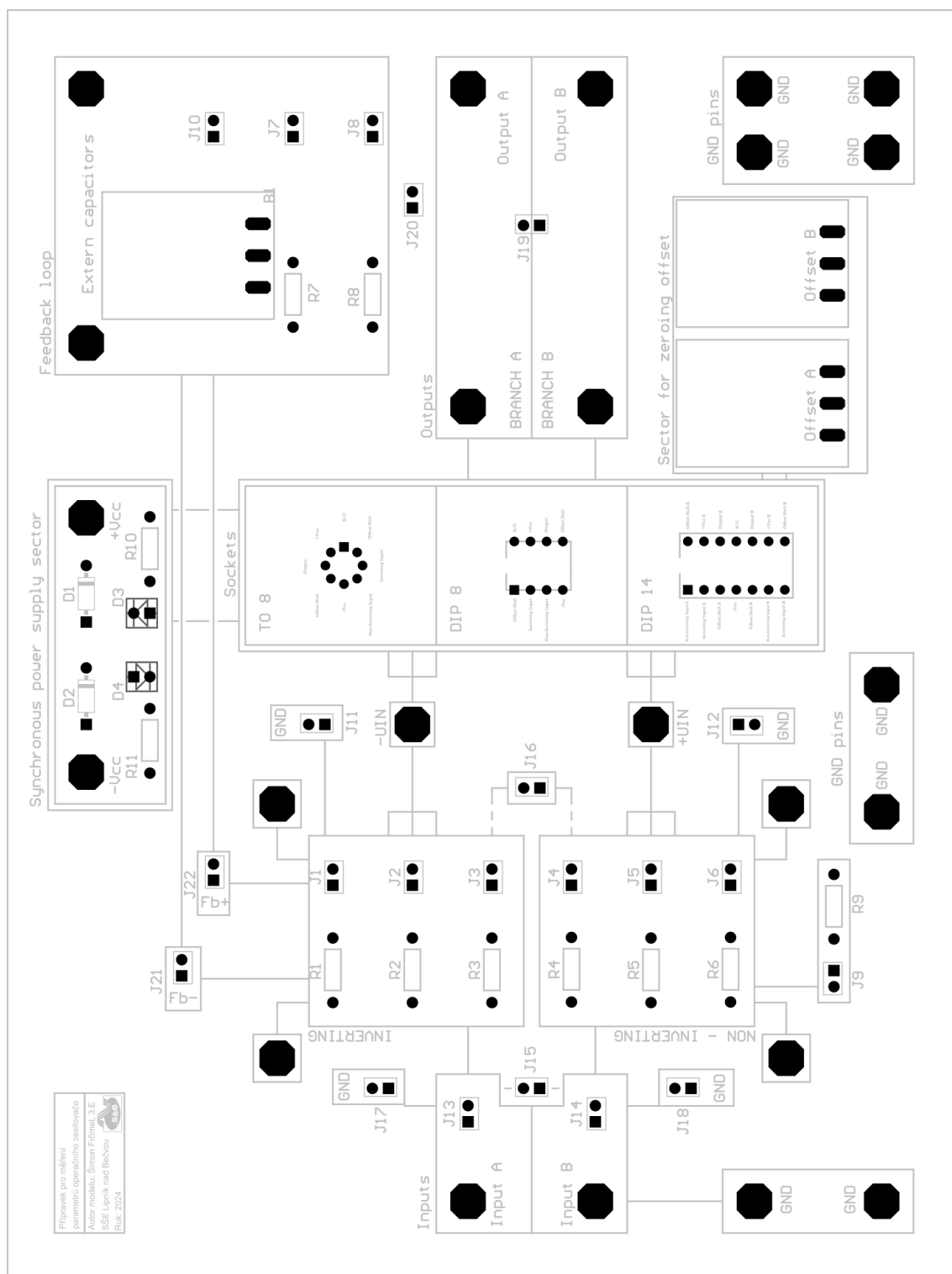
II. Pohled na spodní vrstvu vodivých cest návrhu DPS v reálné velikosti 200 x 150 mm



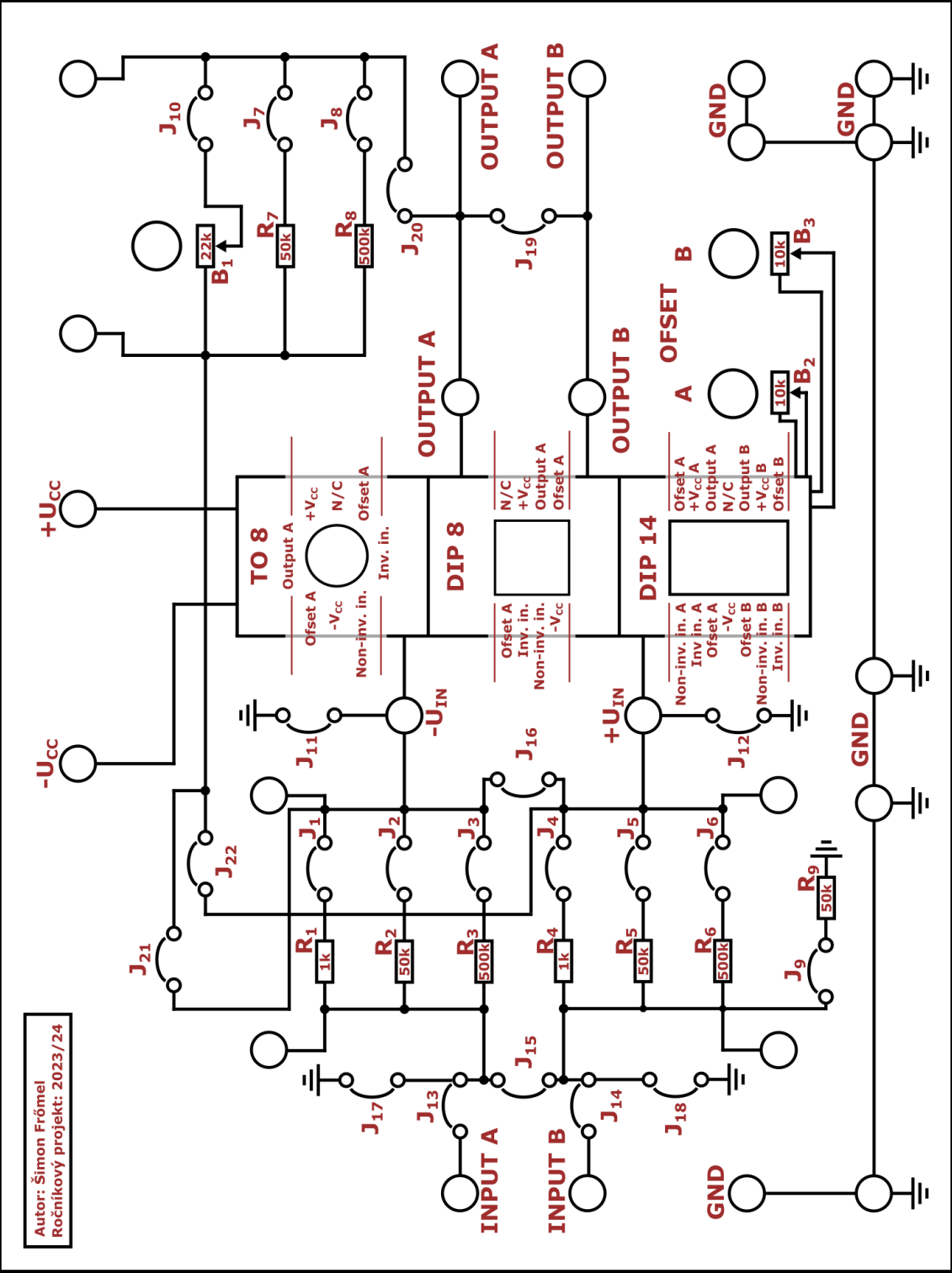
III. Schématický plán návrhu DPS



IV. Osazovací plán návrhu DPS v reálné velikosti 200 x 150 mm



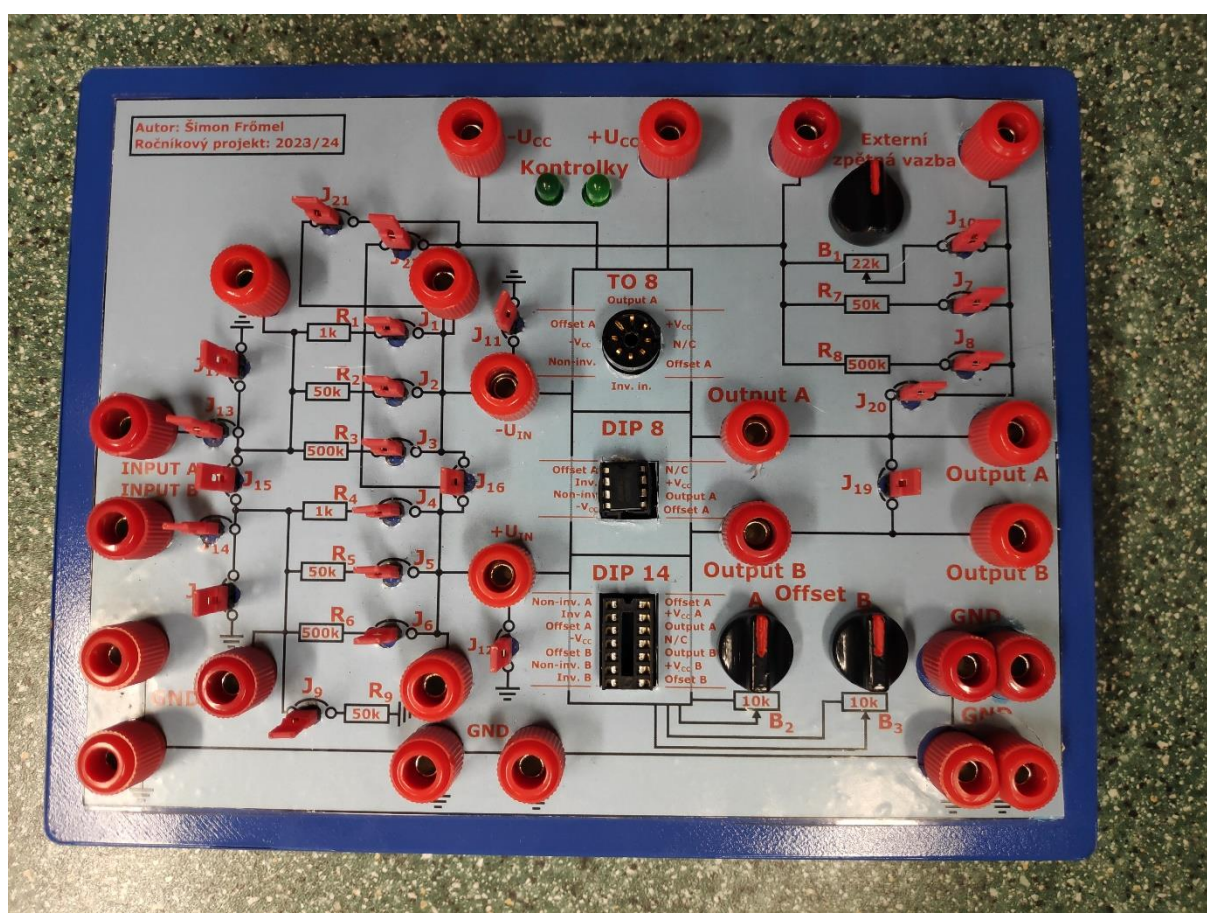
V. Celkový navigační plánek v reálné velikosti 200 x 150 mm



VI. Skutečný model přípravku, pohled zprava – názorné zobrazení



VII. Skutečný model přípravku, pohled shora – názorné zobrazení



VIII. Skutečný model přípravku, pohled zdola – názorné zobrazení

