



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**ANALOGOVÉ FUNKČNÍ PŘEVODNÍKY PRO
LABORATORNÍ VÝUKU**

ANALOG NONLINEAR FUNCTION STRUCTURES FOR EDUCATIONAL LABORATORY PURPOSES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Patrik Filko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Patrik Filko

ID: 164264

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Analogové funkční převodníky pro laboratorní výuku

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte laboratorní přípravek obsahující dvojbrany s nelineární převodní charakteristikou odpovídající kvadratické (x^2), kubické (x^3) a inverzní kvadratické funkci ($x^{1/2}$). Pro jednoduché obvody (do 10ti tranzistorů) použijte dostupné diskrétní bipolární a unipolární tranzistory. Navrhněte blok realizující složitější operace (polynomiální převodní charakteristiku: $f(x) = a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0$, kde konstanty a_0-3 budou nastavitelné v rozsahu -10 až +10) za pomoci operačních zesilovačů a napěťových násobiček. Zajistěte šířku pásma nejméně 100 kHz. Funkčnost ověřte simulacemi v PSpice a závislosti porovnejte s předpoklady (teoretickým návrhem). Pro přípravek navrhněte vlastní napájecí jednotku a dodejte zdroj testovacích signálů (laditelný generátor tvarových kmitů – sinus, trojúhelník, obdélník, s možností měnit střidu) připojitelný na vstupy převodníků (případně s přepínáním AC/DC vazby). Připravte návrhy desek plošných spojů.

Zařízení zhotovte ve formě přípravku ukázkové laboratorní úlohy. Sestavte a připravte demonstrační ukázky (jednotlivé úkoly a zadání: měření v DC, AC, časové a spektrální oblasti), podklady pro měření (návod k úloze) a vypracování (standardní formulář). Cvičení koncipujte tak, aby v rámci domácí přípravy student provedl teoretický úvahový/početní návrh (poskytněte nutné vztahy) a experimentálně ověřil reálné vlastnosti obvodů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] POPA, C. Synthesis of Computational Structures for Analog Signal Processing. Springer, 2012.

[2] POPA, C. Current-Mode Analog Nonlinear Function Synthesizer Structures. Springer, 2013.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 16.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá návrhom a realizáciou prípravku pre laboratórnu výučbu, zameraného na dvojbrány s nelineárnou prevodnou charakteristikou, odpovedajúcou kvadratickej, inverznej kvadratickej a kubickej funkcii. Jeho súčasťou je aj zložitejší prevodník polynomiálnej funkcie, ktorý ponúka študentom praktický pohľad na matematicky vytvárané funkcie pričom ich správnosť si bude možné v rámci laboratórnych cvičení overiť. Celý koncept je podporený návrhom obvodu napájacieho zdroja a generátora harmonických signálov. Jednotlivé funkcie prípravku sú realizovateľné z bežne dostupných súčiastok.

Kľúčové slová

prevodník, signál, analógová násobička, operačný zosilňovač, tranzistor, polynóm, funkcia

Abstract

This master's thesis deals with the design and the realization of a laboratory teaching device, which includes two-port parts with nonlinear transmission characteristics corresponding to quadratic, inverse quadratic and cubic functions. It also includes a more complicated design of a polynomial function converter that offers students a practical view of functions mathematically designed while verifying their accuracy in laboratory exercises. The whole concept is supported by the design of the power supply circuit and the harmonic signal generator. The individual features of this project are feasible from components commercially available.

Keywords

converter, signal, analog multiplier, operational amplifier, transistor, polynomial, function

Bibliografická citácia:

FILKO, Patrik. *Analogové funkční převodníky pro laboratorní výuku*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118441>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Roman Šotner.

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému Analogové funkční převodníky pro laboratorní výuku som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, ani som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/nebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúceho zákona č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 15. května 2019

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu mojej diplomovej práce doc. Ing. Romanovi Šotnerovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

V Brně dne: 15. května 2019

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	12
2	Úvod do problematiky	13
2.1	Tranzistory	13
2.1.1	MOSFET Tranzistory	14
2.2	Operačné zosilňovače	16
2.3	Analógové násobičky	17
3	Návrh analógových funkčných prevodníkov	18
3.1	Základné parametre použitých prvkov	18
3.1.1	Tranzistory BS170 a BS250	18
3.1.2	Dióda BAT42	19
3.1.3	Operačné zosilňovače LT1364 a LT1365	20
3.2	Prevodník kvadratickej funkcie (x^2)	21
3.3	Prevodník inverznej kvadratickej funkcie ($x^{1/2}$)	25
3.4	Prevodník kubickej funkcie (x^3)	29
4	Návrh prevodníka polynomiálnej prevodnej charakteristiky.	33
4.1	Popis a základné parametre obvodu AD835.	33
4.2	Prevodník polynomiálnej funkcie	34
5	Návrh napájacieho zdroja	40
5.1	Základné parametre obvodu LM317 a LM337	40
5.2	Návrh napájacej jednotky zdroja napätia	41
6	Návrh generátora signálov	43
7	Praktická realizácia meracieho prípravku	45
7.1	Blok vstupných signálov	46
7.2	Blok polynomiálnej funkcie	47
7.3	Blok individuálnych funkcií	48
7.3.1	Realizácia prevodníka kvadratickej funkcie	48
7.3.2	Realizácia prevodníka inverznej kvadratickej funkcie	49
7.4	Blok zdroja napätí	50
8	Meranie základných parametrov	51
8.1	Meranie bloku individuálnych funkcií	51
8.1.1	Meranie vlastností obvodu prevodníka kvadratickej funkcie	51

8.1.2	Meranie vlastností obvodu prevodníka inverznej kvadratickej funkcie ...	53
8.1.3	Meranie vlastností prevodníka kubickej funkcie.	55
8.2	Meranie bloku polynomiálnej funkcie	57
8.3	Zoznam meracích prístrojov	59
9	Laboratórna úloha – protokol	60
10	Fotodokumentácia	74
11	Záver.....	75
	Literatura	77
	Zoznam symbolov a skratiek.....	79
	Zoznam príloh	81

Zoznam obrázkov

Obr. 2.1 Princíp vytvorenia kanála v tranzistore typu FET [1].	14
Obr. 2.2 Princíp tranzistoru MOSFET s kanálom typu N [6].	15
Obr. 3.1 Prevodník kvadratickej funkcie.	21
Obr. 3.2 Prevodná charakteristika obvodu kvadratickej funkcie.	23
Obr. 3.3 Časová analýza prevodníka kvadratickej funkcie.	24
Obr. 3.4 Analýza obvodu vo frekvenčnej oblasti.	25
Obr. 3.5 Prevodník inverznej kvadratickej funkcie.	26
Obr. 3.6 Prevodná charakteristika obvodu inverznej kvadratickej funkcie.	27
Obr. 3.7 Časová analýza prevodníka inverznej kvadratickej funkcie.	28
Obr. 3.8 Priebeh výstupného signálu trojuholníka pri frekvencii vstupného signálu 1 MHz.	28
Obr. 3.9 Prevodník kubickej funkcie.	29
Obr. 3.10 Prevodná charakteristika obvodu kubickej funkcie.	31
Obr. 3.11 Časová analýza prevodníka kubickej funkcie.	31
Obr. 3.12 AC analýza prevodníka.	32
Obr. 4.1 Bloková schéma obvodu AD835 [14].	33
Obr. 4.2 Bloková schéma prevodníka polynomiálnej funkcie.	35
Obr. 4.3 Zapojenie obvodu $\sin^2$ a $\sin^3$.	36
Obr. 4.4 Analýza obvodu $\sin^2$ a $\sin^3$ v časovej oblasti.	36
Obr. 4.5 Sumačný operačný zosilňovač.	37
Obr. 4.6 Časová analýza obvodu polynomiálnej funkcie.	38
Obr. 4.7 AC analýza obvodu polynomiálnej funkcie.	39
Obr. 5.1 Regulácia výstupného napätia obvodu LM317 [17].	41
Obr. 6.1 Schéma zapojenia generátora harmonických signálov.	44
Obr. 7.1 Bloková schéma meracieho prípravku.	45
Obr. 7.2 Blok vstupných signálov.	46
Obr. 7.3 Nastavovanie veľkosti a výber záporného alebo kladného koeficientu.	47
Obr. 7.4 Kompletná schéma zapojenia kvadratickej funkcie.	48
Obr. 7.5 Kompletná schéma zapojenia inverznej kvadratickej funkcie.	49
Obr. 8.1 Časová analýza prevodníka kvadratickej funkcie.	51

Obr. 8.2 Časová analýza prevodníka kvadratickej funkcie pri zapnutom AC meraní.	52
Obr. 8.3 Prevodná charakteristika prevodníka kvadratickej funkcie.....	52
Obr. 8.4 Modulová kmitočtová charakteristika prevodníka kvadratickej funkcie. ..	53
Obr. 8.5 Časová analýza prevodníka inverznej kvadratickej funkcie.....	54
Obr. 8.6 Prevodná charakteristika prevodníka inverznej kvadratickej funkcie.....	54
Obr. 8.7 Modulová kmitočtová charakteristika prevodníka inverznej kvadratickej funkcie.	55
Obr. 8.8 Časová analýza prevodníka kubickej funkcie.	56
Obr. 8.9 Prevodná charakteristika prevodníka kubickej funkcie.....	56
Obr. 8.10 Modulová kmitočtová charakteristika prevodníka kubickej funkcie.....	57
Obr. 8.11 Časová analýza prevodníka polynomiálnej funkcie.	58
Obr. 8.12 Modulová kmitočtová charakteristika prevodníka polynomiálnej funkcie.	58
Obr. 8.13 Prevodná charakteristika prevodníka polynomiálnej funkcie.....	59
Obr. 10.1 Osadené DPS prevodníkov funkcií.....	74
Obr. 10.2 Finálna podoba laboratórneho prípravku.....	74

Zoznam tabuliek

Tabulka 3-1 Základné parametre tranzistora BS170 [10].....	18
Tabulka 3-2 Základné parametre tranzistora BS250 [11].....	19
Tabulka 3-3 Základné parametre diódy BAT42 [12].	19
Tabulka 3-4 Základné parametre operačných zosilňovačov LT1364 a LT1365. [13].	20
Tabulka 4-1 Základné parametre obvodu AD835 [14].....	34
Tabulka 5-1 Základné parametre obvodu LM317 [17].....	40
Tabulka 5-2 Základné parametre obvodu LM337 [18].....	41
Tabulka 6-1 Základné parametre obvodu XR-8038 [19].....	43

1 ÚVOD

Cieľom diplomovej práce je návrh laboratórneho prípravku ktorý obsahuje dvojbrány s nelineárnou prevodnou charakteristikou odpovedajúcou kvadratickej, kubickej a inverznej kvadratickej funkcii. Ďalším z cieľov je návrh bloku zaoberajúceho sa zložitejšou polynomiálnou funkciou, realizovaného z analógových násobičiek a operačných zosilňovačov. Rovnako je súčasťou práce aj vytvorenie konceptu samotného merania laboratórnej úlohy, v ktorej bude pre študentov laboratórny prípravok vhodnou demonštráciou možných návrhov obvodov, ktoré svojim zapojením vedú k dosiahnutiu požadovaných tvarov a rozmerov výstupných matematických funkcií.

Rozbor problematiky začína druhou kapitolou, kde sú v krátkosti objasnené základné pojmy a funkčné princípy z oblasti elektronických prvkov využívaných v návrhu práce.

Tretia a štvrtá kapitola sa primárne zameriava na návrh jednotlivých prevodníkov funkcií. Štruktúra kapitol je členená na základný popis a parametre súčiastok využitých vo funkčných obvodoch po ktorých nasleduje kompletný návrh prevodníkov. Kapitoly uzatvárajú výsledky simulácií pojednávajúce o správnych propozíciách obvodov.

Súčasťou piatej a šiestej kapitoly je návrh elektronických obvodov generátora harmonických signálov a zdroja napätí využívaných ako podporné obvody zabezpečujúce správnu činnosť prevodníkov.

Siedma kapitola sa venuje doplneniu teórie navrhovaných obvodov a ich praktickej realizácii. Zároveň zobrazuje myšlienku rozčlenenia navrhnutého laboratórneho prípravku.

V ôsmej kapitole sú zhrnuté výsledky meraní obvodov laboratórneho prípravku preukazujúce funkčnosť navrhovaných zapojení.

Predposledná, deviata kapitola obsahuje návrh meracieho formulára pre laboratórnu úlohu, a po nej nasleduje posledná desiatka kapitola s krátkou fotodokumentáciou navrhnutého meracieho prípravku.

2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Diplomová práca sa zaoberá návrhom dvojbránov s nelineárnou prevodnou charakteristikou a blokom realizujúcim polynomiálnu prevodnú charakteristiku. K vyriešeniu danej problematiky sú využívané komerčne dostupné unipolárne tranzistory, operačné zosilňovače a analógové násobičky. Z tohto dôvodu budú v nasledujúcom bloku uvedené základné pojmy a funkčné princípy zmienených analógových súčiastok.

2.1 Tranzistory

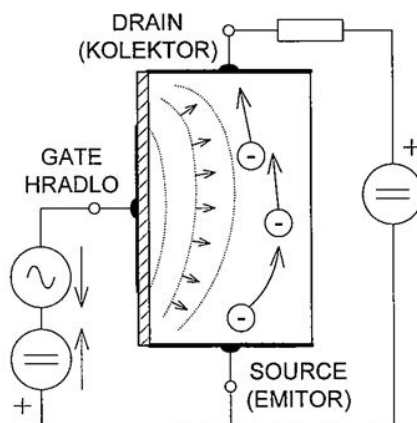
Tranzistory sa radia medzi elektronické aktívne súčiastky ktoré sa najčastejšie objavujú s tromi elektródami. Ich vlastnosťou je schopnosť meniť odpor riadeného obvodu medzi kolektorom a emitorom malým prúdom, tečúcim do riadiace elektródy báze. Táto činnosť je založená na vzájomnej interakcii medzi dvoma prechodmi PN, ktorú bližšie popisuje tranzistorový jav. Tranzistory sa vo všeobecnosti delia na bipolárne a unipolárne tranzistory [1].

Unipolárny tranzistor je známy ako tranzistor riadený elektrickým poľom (FET – Field Effect Transistor). Podľa technologického prevedenia riadiacej elektródy sú rozdelené do dvoch kategórií na tranzistory MOSFET a JFET. MOSFET tranzistory (Metal-Oxide-Semiconductor) majú riadiace hradlo izolované malou vrstvou izolantu, ktorú najčastejšie tvorí v elektronickom priemysle často využívaný Oxid Kremičitý SiO_2 . Na rozdiel od nich tranzistory JFET (Junction-FET) majú hradlo izolované záverne polarizovaným prechodom [1].

Tranzistor riadený elektrickým poľom je nazvaný aj preto, lebo k riadeniu veľkosti prúdu medzi kolektorom a emitorom dochádza zmenou vodivosti tzv. kanálu medzi kolektorom a emitorom pomocou elektrostatického poľa vytváraného privedením napätia na hradlo (gate) (Obr. 2.1.) [1].

Princíp je veľmi jednoduchý. Hradlo (gate), ktoré je tvorené kovovou doštičkou pomocou vrstvy oxidu je odizolované od polovodičovej doštičky typu N (prípadne P). Pripojením napätia medzi hradlo a emitor (gate a source) vznikne elektrické pole ovplyvňujúce pohyb elektrických nábojov v polovodiči [2].

Privedené záporné napätie na hradlo zužuje vodivý kanál v polovodiči a tým reguluje veľkosť výstupného prúdu. Ale svoju úlohu hrá aj kladné napätie priložené ku kolektoru. To deformuje tvar riadiaceho elektrického poľa a pri výrobcom udávanom saturačnom napätí môže dôjsť k uzavretiu vodivého kanála. Vtedy už aj pri ďalšom zvyšovaní napätia medzi kolektorom a emitorom k zvyšovaniu kolektorového prúdu I_D nedôjde, teda tranzistor prechádza z odporového režimu do režimu saturácie [1].



Obr. 2.1 Princíp vytvorenia kanála v tranzistore typu FET [1].

2.1.1 MOSFET Tranzistory

MOSFET tranzistory sú najrozšírenejším a najviac využívaným typom tranzistorov s izolovaným hradlom. Hradlo je od ostatných častí tranzistoru odizolované izolačnou vrstvou (najčastejšie SiO_2) ktorá tvorí kapacitnú väzbu. Práve z toho dôvodu majú univerzálnejšie využitie, keďže neexistuje jednosmerná väzba medzi hradlom a zbytkom tranzistoru. Často sú vo veľkej integrácii využívané v integrovaných obvodoch. Ich výhodou je veľká vstupná impedancia čo im umožňuje dosiahnuť malú výkonovú spotrebu [4].

Existujú štyri základné druhy. Delia sa podľa vodivosti kanálu na [4]:

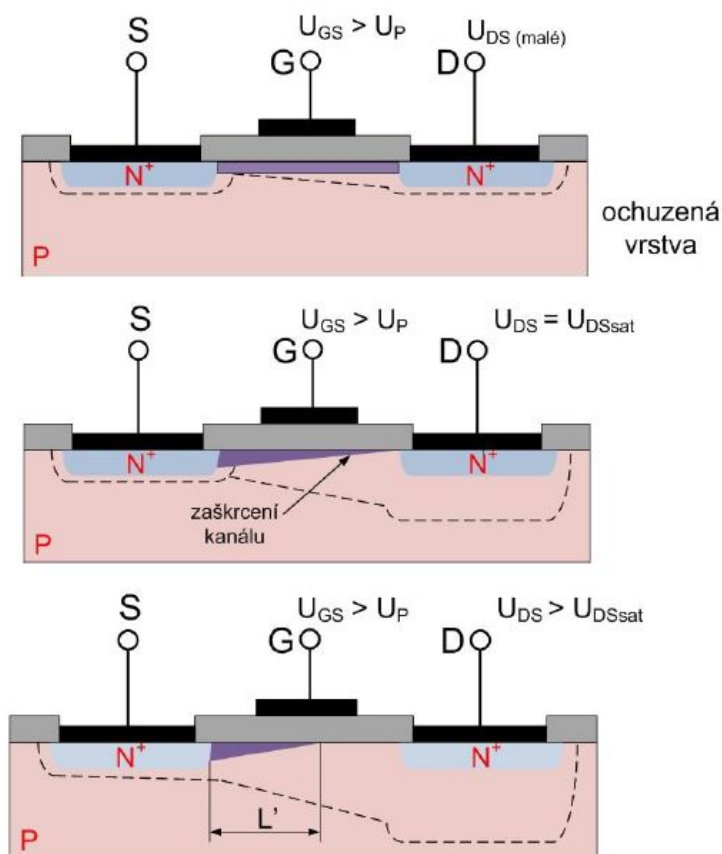
- S vodivosťou kanálu typu N
- S vodivosťou kanálu typu P

a podľa spôsobu vytvorenia kanálu na:

- S indukovaným kanálom
- S vodivým kanálom (vopred zabudovaným)

V tranzistoroch s indukovaným kanálom je kanál o typickej dĺžke $L = 1$ až $10\ \mu\text{m}$ (v dnešnej dobe až v rádoch desiatín μm) a šírka $W = 2$ až $500\ \mu\text{m}$ vytváraný dostatočne veľkým elektrickým poľom pod elektródou hradla [5].

Pri napätí U_{GS} väčšom ako je prahové napätie tranzistora U_T dôjde k vytlačeniu majoritných nosičov a priťahovaniu minoritných nosičov zo substrátu. Tenká vrstva pod hradlom vytvorí vodivý kanál ktorý prepojí elektródy S a D. Následne zvyšovaním napätia nad hodnotu U_T kvadraticky rastie vodivosť kanálu. Pri malých napätiach U_{DS} sa tranzistor chová ako lineárny rezistor riadený napätím U_{GS} . Zvyšovaním napätia U_{DS} dôjde k zníženiu potenciálu medzi kanálom a hradlom na strane elektródy D, až dôjde k zníženiu tohto potenciálu pod úroveň prahového napätia a kanál sa uzavrie. Prúd tranzistorom od tejto hodnoty napätia U_{DS} nerastie a tranzistor sa chová ako prúdový zdroj. Pri opačnej polarite U_{DS} sa na strane elektródy D kanál naopak otvára, čo je využívané najmä v spínacom režime tranzistora [6].



Obr. 2.2 Princíp tranzistoru MOSFET s kanálom typu N [6].

Tranzistory s vopred zabudovaným kanálom fungujú na obdobnom princípe avšak ich vodivý kanál bol vytvorený už pri výrobnom procese [6].

2.2 Operačné zosilňovače

Názov operačný zosilňovač vychádza s pôvodného určenia tejto súčiastky ktorým bolo vytváranie matematických operácií. Prvý prototyp bol skonštruovaný za použitia elektrónok v roku 1938. Dnes sú vyrábané ako integrované obvody na jednej polovodičovej doštičke [7].

Ideálny operačný zosilňovač by mal dosahovať parametre[7]:

- Nekonečne veľké zosilnenie A_U
- Nekonečne veľký vstupný odpor R_{VST}
- Nekonečne veľký výstupný odpor R_{VYST}

Reálny operačný zosilňovač sa však svojím zosilnením pohybuje rádovo v hodnotách $A_U = 10^5$. Rovnako ani jeho ostatné parametre nie sú celkom ideálne. Taktiež má konečnú hodnotu R_{VST} a nenulovú hodnotu R_{VYST} . Obsahuje aj celú ďalšiu radu parazitných javov ako vstupné zvyškové napätie U_{IO} , prúdová nesymetria, frekvenčná závislosť zosilnenia A , vstupné zvyškové prúdy, atď [7].

V režime napäťového zosilnenia sa používajú zapojenia operačného zosilňovača ako neinvertujúce alebo invertujúce napäťové zosilňovače. U neinvertujúceho zapojenia reálneho operačného zosilňovača sa veľkosť prenosu napätia vypočíta podľa vzťahu:

$$K_U = \frac{A(R_1 + R_2)}{R_1(A + 1) + R_2}, [-] \quad (2.1)$$

kde K_U predstavuje prenos napätia, hodnoty odporov R_1 a R_2 určujú veľkosť zosilnenia a parameter A predstavuje navyše konečnú hodnotu zosilnenia OZ. Invertujúci operačný zosilňovač má napäťový prenos s reálnymi parametrami vypočítaný podľa vzťahu:

$$K_U = \frac{-AR_2}{R_1 \times (A + 1) + R_2}, [-] \quad (2.2)$$

kde K_U opäť predstavuje prenos napätia, hodnoty odporov R_1 a R_2 určujú veľkosť zosilnenia a parameter A predstavuje konečnú hodnotu zosilnenia OZ. Viac informácií je možné nájsť v [7].

Jedným z špecifických zapojení operačného zosilňovača je aj súčtový operačný zosilňovač, ktorý môže mať v ideálnom prípade ľubovoľný počet vstupov. Invertujúci vstup v tomto prípade predstavuje virtuálnu zem. Pre ideálny OZ platí, že všetky prúdy sa sčítajú a pretekajú spätnoväzbovým odporom [7].

V reálnom zapojení pre tri napätia u_1 , u_2 a u_3 vstupujúce do OZ cez rezistory R_1 , R_2 a R_3 spojené do uzla invertujúceho vstupu a s rezistorom R pripojeným v spätnej väzbe sa veľkosť výstupného napätia vypočíta podľa vzťahu:

$$u_0 = -\left(\frac{u_1 \times R}{R_1} + \frac{u_2 \times R}{R_2} + \frac{u_3 \times R}{R_3}\right). [\text{V}] \quad (2.3)$$

V prípade rovnakých hodnôt všetkých použitých odporov v obvode sa bude záporné výstupné napätie rovnať súčtu všetkých hodnôt napätí na vstupe obvodu [7].

2.3 Analógové násobičky

Analógová násobička je už podľa názvu obvod, ktorého výstupným produktom je signál dvoch vzájomne, v každom časovom okamihu násobených vstupných signálov. Vstupným signálom môže byť napätie, vtedy sa jedná o napäťovú násobičku, prípadne prúd z čoho logicky vychádza prúdová násobička. Vo všeobecnosti násobenie dvoch napätí spojených v čase vo vnútornom obvode násobičky prebieha podľa vzťahu:

$$u_{OUT}(t) = k \times u_1(t) \times u_2(t) [\text{V}] \quad (2.4)$$

kde u_{OUT} je výstupné napätie, k je násobiaca konštanta pridaná násobičkou, u_1 a u_2 sú vstupné napätia [8].

Analógové násobičky majú hlavné rozdelenie podľa polaritu vstupného signálu, s ktorým dokážu pracovať [8]. Preto sa delia na:

- Jednokvadrantové – oba vstupné signály majú len jednu polaritu
- Dvojkvadrantové – jeden vstupný signál môže mať obe polaritu
- Štvorkvadrantové – oba vstupné signály môžu mať obe polaritu

Najjednoduchšia analógová násobička vznikne spojením diferenciálneho zosilňovača na ktorého báze je privádzané napätie U_1 s tranzistorom, ktorý v obvode plní úlohu zdroja prúdu ovládaného napätím U_2 . V elektronickej podobe je násobička založená na logaritmických a antilogaritmických zosilňovačoch. Najlepší a najpresnejší spôsob realizácie je však pomocou spojenia dvoch mostíkových stupňov, tzv. Gilbertovej bunky, kedy vznikne štvorkvadrantová násobička schopná násobiť kladné aj záporné polaritu vstupných signálov [8].

Vo všeobecnosti sú analógové násobičky využívané ako riadené zosilňovače, zmiešavače, modulátory, fázové komparátory atď [8].

3 NÁVRH ANALÓGOVÝCH FUNKČNÝCH PREVODNÍKOV

Kapitola návrhu analógových funkčných prevodníkov je venovaná návrhu dvojbránov s nelineárnou prevodnou charakteristikou odpovedajúcej kvadratickej (x^2), kubickej (x^3) a inverznej kvadratickej funkcii ($x^{1/2}$). Podobné nelineárne prevodníky sa v dnešnej dobe využívajú najmä v komunikačných a meracích systémoch.

3.1 Základné parametre použitých prvkov.

Na stavbu analógových funkčných prevodníkov boli použité diskkrétne tranzistory, diódy a operačné zosilňovače, ktorých základné parametre sú zhrnuté v nasledujúcich kapitolách.

3.1.1 Tranzistory BS170 a BS250

Tranzistor BS170 je malý signálový MOSFET tranzistor s kanálom vodivosti typu N. Tranzistor je vyrábaný v puzdre TO-92. Jeho základné parametre sú zhrnuté v Tabulke 3-1:

Tabulka 3-1 Základné parametre tranzistora BS170 [10].

Označenie	Popis	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
U_{DS}	Napätie medzi Drain a Source		60		V
U_{GS}	Napätie medzi Gate a Source		± 20		V
I_D	Drainový prúd		0,5		A
P_D	Maximálny výkon		350		mW
I_{GSS}	Zvodový prúd hradla (pri $U_{GS} = 15\text{ V}$, $U_{DS} = 0\text{ V}$)		0,01	10	nA
$U_{BR(DSS)}$	Prierné napätie medzi drain a source ($U_{GS} = 0\text{ V}$, $I_D = 100\text{ }\mu\text{A}$)	60	90		V
$U_{GS(Th)}$	Prahové napätie hradla ($U_{DS} = U_{GS}$, $I_D = 1\text{ mA}$)	0,8	2,0	3,0	V
$r_{DS(on)}$	Odpor kanálu vo vzopnutom stave ($U_{GS} = 10\text{ V}$, $I_D = 200\text{ mA}$)		1,8	5,0	Ω
g_{fs}	Transkonduktančný parameter ($U_{DS} = 10\text{ V}$, $I_D = 200\text{ mA}$)		200		mmhos
C_{iss}	Vstupná kapacita ($U_{DS} = 10\text{ V}$, $U_{GS} = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ Mhz}$)			60	pF

Tranzistor BS250 je signálový MOSFET tranzistor s kanálom vodivosti typu P. Tranzistor je vyrábaný v puzdre TO-92 [11]. Jeho základné parametre sú zhrnuté v Tabulke 3-2:

Tabulka 3-2 Základné parametre tranzistora BS250 [11].

Označenie	Popis	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
U_{DS}	Napätie medzi Drain a Source			- 45	V
U_{GS}	Napätie medzi Gate a Source			± 20	V
I_D	Drainový prúd			- 0,25	A
P_D	Maximálny výkon			830	mW
I_{GSS}	Zvodový prúd hradla (pri $U_{GS} = -15$ V, $U_{DS} = 0$ V)			- 20	nA
$U_{BR(DSS)}$	Prierné napätie medzi drain a source ($U_{GS} = 0$ V, $I_D = -100$ μ A)	- 45			V
$U_{GS(Th)}$	Prahové napätie hradla ($U_{DS} = U_{GS}$, $I_D = -1$ mA)	- 1		- 3,5	V
$r_{DS(on)}$	Odpor kanálu vo vzopnutom stave ($U_{GS} = -10$ V, $I_D = -200$ mA)		9	14	Ω
Y_{fs}	Transadmitančný parameter ($U_{DS} = -15$ V, $I_D = -200$ mA)		125		mS
C_{iss}	Vstupná kapacita ($U_{DS} = -10$ V, $U_{GS} = 0$ V, $f = 1$ Mhz)		30	45	pF

Tranzistory popisované vyššie boli pre návrh jednotlivých zapojení zvolené primárne z dôvodu vlastností a parametrov, ktoré ponúkajú v pomere s ich cenou a dostupnosťou na trhu.

3.1.2 Dióda BAT42

Dióda BAT42 je dióda s ultrarýchlou dobou zotavenia PN prechodu. Preto je použiteľná do vyšších frekvencií a ideálna pre rýchle logické aplikácie [12]. Jej základné parametre sú popísané v Tabulke 3-3.

Tabulka 3-3 Základné parametre diódy BAT42 [12].

Označenie	Popis	Typ.	Jednotka
U_{RM}	Maximálne záverné napätie	30	V
I_F	Pracovný prúd diódy	200	mA
P_V	Maximálny výkon	200	mW
I_{FSM}	Špičkový pracovný prúd diódy	4	A
U_F	Prahové napätie diódy	230	mV
t_{rr}	Čas zotavenia diódy	5	ns

Dióda BAT42 bola zvolená pre zapojenie prevodníka kubickej funkcie hlavne z dôvodu jej nízkeho prahového napätia U_F a samozrejme v neposlednom rade aj kvôli použiteľnosti v oblasti vyšších frekvencií.

3.1.3 Operačné zosilňovače LT1364 a LT1365.

Obvod LT1364 a LT1365 sú nízkošumové operačné zosilňovače obsahujúce JFET a bipolárne tranzistory umiestnené v monolitickom integrovanom obvode zosilňovača. Ich prednosťou je nízky offset na vstupe obvodu a vysoká rýchlosť prebehu. V jednom puzdre sú obsiahnuté dva alebo štyri operačné zosilňovače [13]. Ich základné parametre popisuje Tabuľka 3-4.

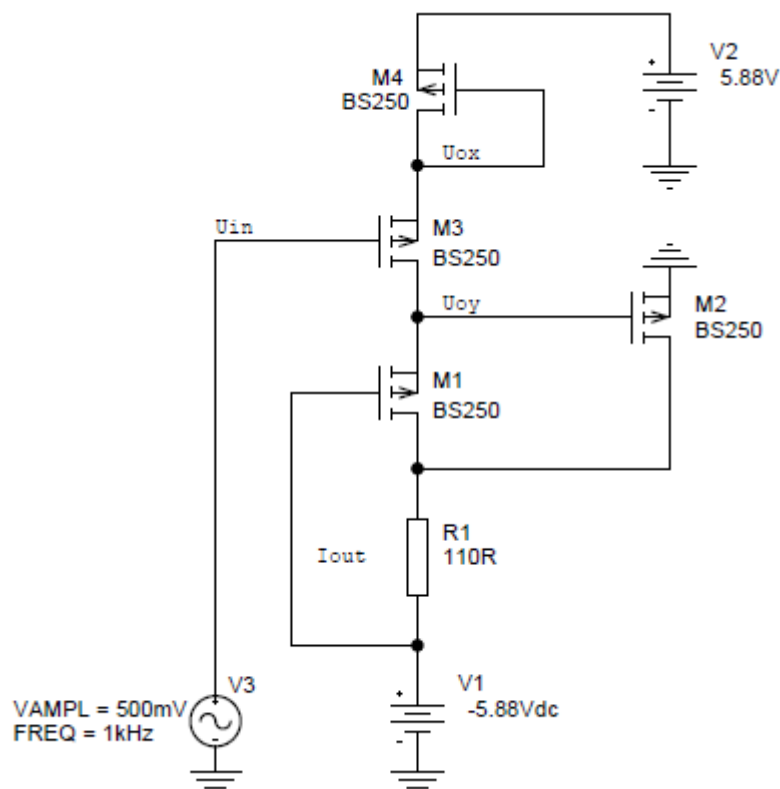
Tabuľka 3-4 Základné parametre operačných zosilňovačov LT1364 a LT1365. [13].

Označenie	Popis	Min.	Max.	Jednotka
U_{CC+}	Kladné napájacie napätie		36	V
U_{CC-}	Záporné napájacie napätie		-36	V
U_{IO}	Offsetové napätie vstupu	0,5	1,5	mV
I_{IO}	Vstupný offsetový prúd	120	350	nA
U_{OM}	Maximálne výstupné napätie		$\pm 13,5$	V
U_{ICR}	Vstupné napätie		-12 to 12	V
I_{OUT}	Výstupný prúd	23	60	mA
SR	Rýchlosť prebehu na jednotku zosilnenia	225	600	V/ μ s

Dané operačné zosilňovače boli pre samotný návrh použité z dôvodu zabezpečenia kmitočtovej charakteristiky obvodu pred jej ovplyvňovaním v prípade požiadavky na väčší zisk operačného zosilňovača (napr. 10-násobný).

3.2 Prevodník kvadratickej funkcie (x^2)

Základným princípom obvodu kvadratickej funkcie sú tranzistory, ktoré pracujú v saturačných režimoch. Zmena napätia vstupného signálu vyvoláva druhú mocninu prúdu na výstupe obvodu. Ten je tvorený z reálnych P-MOS tranzistorov BS250. Zapojenie je zobrazené na Obr. 3.1. Pôvodnú schému zapojenia a informácie dopĺňa literatúra [16].



Obr. 3.1 Prevodník kvadratickej funkcie.

Popis návrhu obvodu je možné nájsť v [16]. Vstupné striedavé napätie zo zdroja V_3 je privádzané na tranzistor M_3 . Medzi prúdmi drainov tranzistorov M_3 a M_4 platí vzťah:

$$I_{D3} = I_{D4}, [A] \quad (3.1)$$

kde I_D predstavuje prúd drainov jednotlivých tranzistorov.

Zároveň je medzi tranzistormi M_3 a M_4 prítomné napätie U_{ox} ktoré je privádzané na hradlo G tranzistora M_4 a tak nastavuje parametre jeho vodivého kanála. Veľkosť tohto napätia určuje rovnica:

$$U_{ox} = \frac{U_{V2}}{2} + \frac{U_{IN}}{2}, [V] \quad (3.2)$$

kde U_{V2} predstavuje kladné napájacie napätie a U_{IN} napätie vstupného signálu [16].

Podobne riadi prúd tranzistorom M_2 napätie U_{0Y} privádzané na jeho hradlo. Rovnako je na drain elektródu tranzistora privádzané napätie U_{D2} , ktorého veľkosť určuje rozdiel napätí zdroja U_{V1} a úbytku napätia na odpore R_1 . Znova medzi prúdmi drainov tranzistorov M_1 a M_3 platí vzťah:

$$I_{D1} = I_{D3} \cdot [A] \quad (3.3)$$

Z danej rovnosti je jednoduché vypočítať veľkosť napätia U_{0Y} :

$$U_{0Y} = -\frac{U_{V2}}{2} - \frac{U_{IN}}{2}, [V] \quad (3.4)$$

z čoho vyplýva, že pokiaľ platí podmienka rovnosti medzi prúdmi tranzistorov M_1 a M_3 , výstupný prúd bude rovný:

$$I_{OUT} = I_{D2} + I_{D3}, [A] \quad (3.5)$$

kde I_{OUT} predstavuje výstupný prúd obvodu [16].

Vyjadrením zo základnej rovnice MOSFET tranzistora pracujúceho v saturácii sa výstupný prúd vypočíta podľa vzťahu:

$$I_{OUT} = K(U_{IN} - U_{0X} - U_{TH})^2 + K(U_{0Y} - U_{TH})^2, [A] \quad (3.6)$$

kde K predstavuje transkonduktančný parameter a U_{TH} predstavuje prahové napätie. Doplnením známych napätí U_{0Y} a U_{0X} je možné napísať finálny vzťah výstupného prúdu zapojenia I_{OUT} [16]:

$$I_{OUT} = K \left\{ \left[\frac{U_{IN}}{2} - \left(\frac{U_{V2}}{2} + U_{TH} \right) \right]^2 + \left[-\frac{U_{IN}}{2} - \left(\frac{U_{V2}}{2} + U_{TH} \right) \right]^2 \right\}, [A] \quad (3.7)$$

za podmienky, že platí:

$$\frac{U_{V2}}{2} = -U_{TH} \cdot [V] \quad (3.8)$$

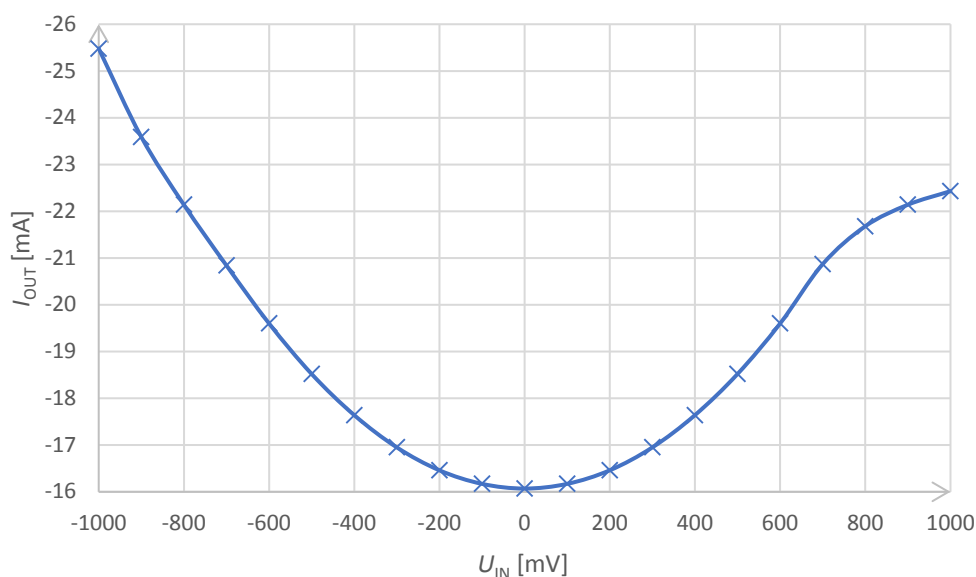
Parametre pre funkčnosť obvodu boli nastavené podľa parametrov P-MOS tranzistorov pracujúcich v saturačnom režime [16]:

$$U_{TH} - \frac{U_{V2}}{2} < -\frac{U_{IN}}{2} < -U_{TH} + \frac{U_{V2}}{2}, [V] \quad (3.9)$$

Z daného vzťahu boli pre simuláciu odvodené hodnoty napätí, konkrétne $U_{TH} = -2,94$ V, $U_{V2} = 5,88$ V a $U_{V1} = -5,88$ V. Simulácie boli overované s použitím modelu reálneho tranzistora BS250, voľne dostupného na trhu. Zvolené parametre napätí

použité v simuláciách korešpondujú s napätiami uvedenými v katalógovom liste vybraného tranzistora.

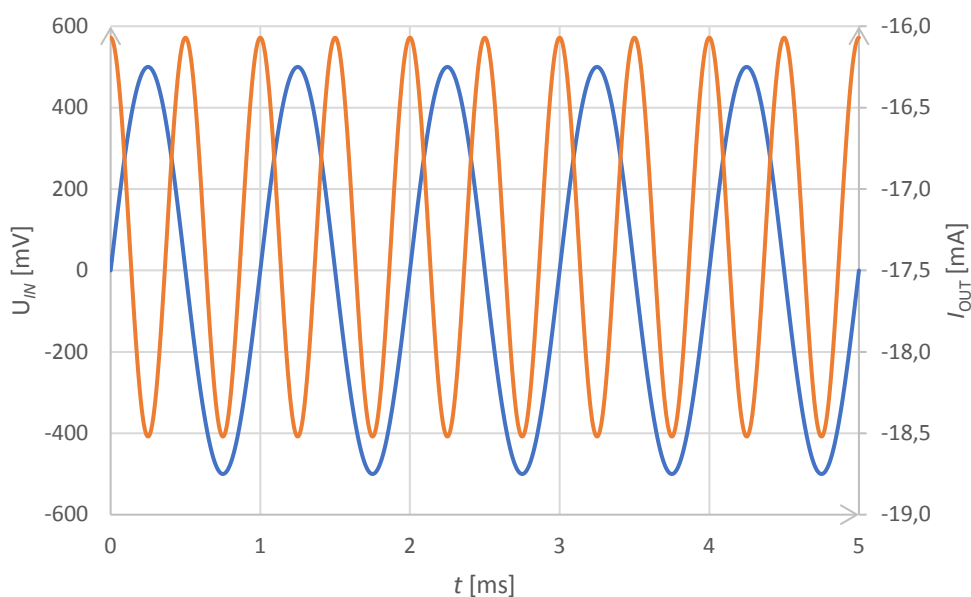
Ako prvé overenie funkčnosti bola zrealizovaná prevodná charakteristika medzi vstupným napätím U_{IN} a výstupným prúdom I_{OUT} (Obr. 3.2). Navrhovaný obvod bol podrobený postupnému nastavovaniu hodnôt vstupného napätia, pričom boli odčítavané a následne vynesené hodnoty výstupného prúdu do grafu.



Obr. 3.2 Prevodná charakteristika obvodu kvadratickej funkcie.

Z prevodnej charakteristiky je zreteľne viditeľné, že obvod s použitými tranzistormi je schopný perfektne pracovať v rozmedzí vstupného napätia $U_{IN} = \pm 700$ mV. Vyššie vstupné napätie začne limitovať tranzistor M_2 , ktorý v takomto zapojení nedokáže zvyšovať svoj drainový prúd na väčšiu hodnotu než $I_{D2} = -22,43$ mA, čo zobrazuje aj samotná prevodná charakteristika.

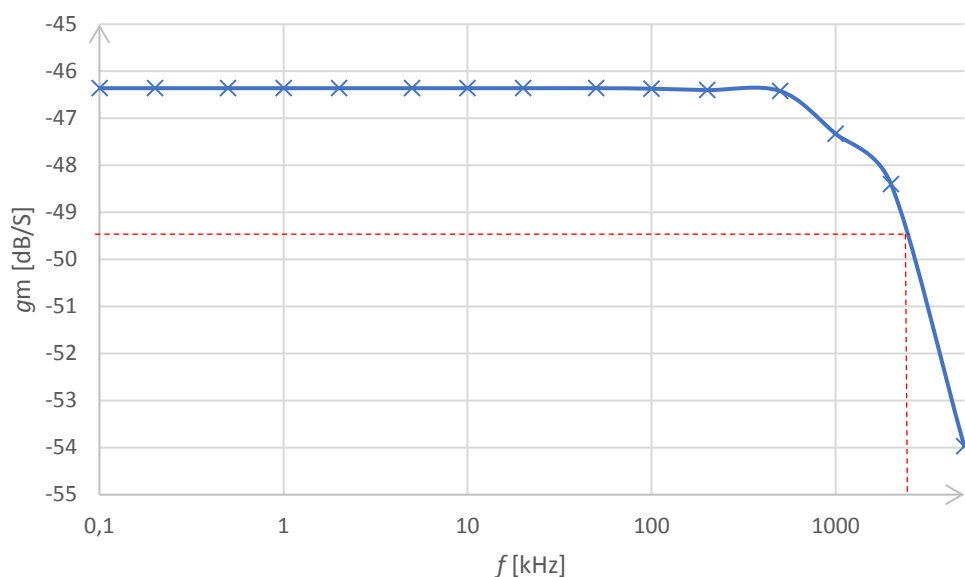
Ďalšia simulácia vykonaná v rámci overovania vlastností obvodu bola nastavená do časovej oblasti. K vstupným svorkám obvodu bol pripojený zdroj sínusového signálu s frekvenciou $f = 1$ kHz a amplitúdou $U_{IN} = \pm 500$ mV. Dáta analýzy zo simulačného programu OrCAD boli exportované a spracované pomocou programu Microsoft Excel. Výsledný priebeh simulácie je na Obr. 3.3.



Obr. 3.3 Časová analýza prevodníka kvadratickej funkcie.

Z obrázku je viditeľné, že obvod naozaj vykonáva druhú mocninu vstupného signálu, teda konkrétne pri sínusovom signáli (modrý priebeh) zdvojnásobuje jeho frekvenciu (oranžový priebeh). Avšak výstupný prúd je posunutý s offsetom 16 mA do zápornej oblasti. To je spôsobené prirodzenou vlastnosťou P-MOS tranzistorov pracujúcich so záporným drainovým prúdom $-I_D$.

Obvod bol pre overenie zadaných podmienok podrobený aj AC analýze, teda logaritmicke sa zvyšujúcej vstupnej frekvencii z počiatočnej hodnoty $f = 10$ Hz až do $f = 3$ MHz. Nasledujúci graf (Obr. 3.4) symbolizuje závislosť medzi transkonduktanciou g_m v jednotkách dB a frekvenciou f . Hodnota transkonduktancie g_m bola získaná logaritmovaním podielu výstupného prúdu I_{OUT} k vstupnému napätiu U_{IN} .



Obr. 3.4 Analýza obvodu vo frekvenčnej oblasti.

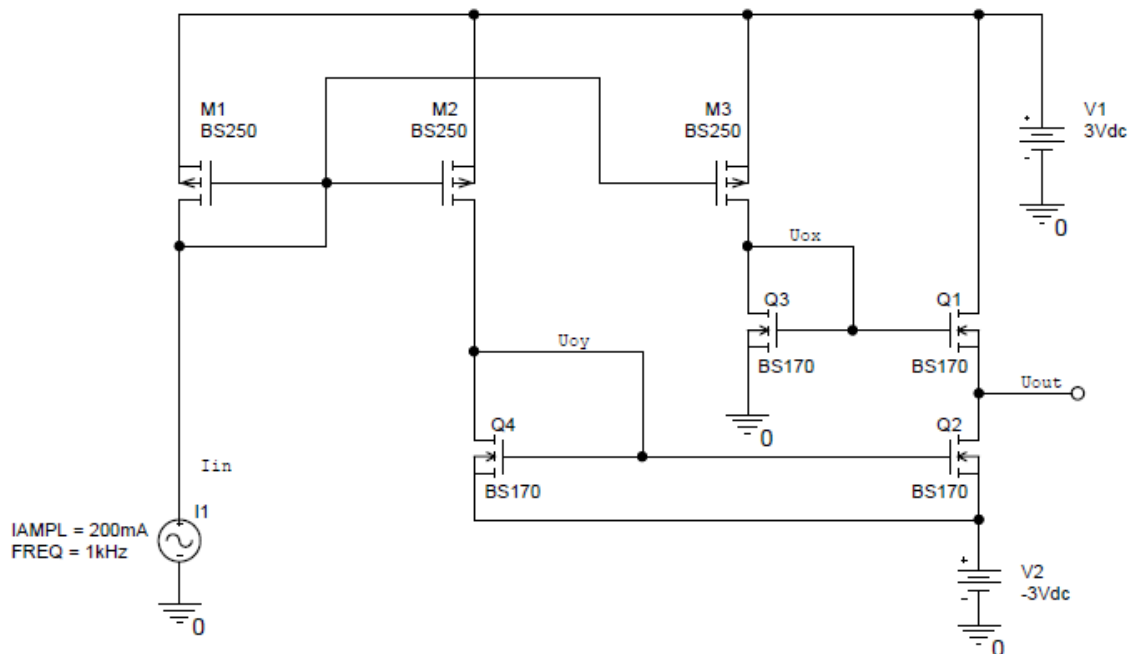
Z grafu je viditeľné, že pokles transkonduktancie o 3dB/S, teda pokles schopnosti reprodukovateľnosti druhej mocniny vstupného signálu nastáva až pri vyšších hodnotách vstupnej frekvencie než $f = 1$ MHz.

3.3 Prevodník inverznej kvadratickej funkcie ($x^{1/2}$)

Prevodník inverznej kvadratickej funkcie je založený na princípe simulácie druhej odmocniny vstupného signálu. Celý obvod je tvorený spojením tranzistorov so štruktúrou P-MOS a N-MOS, ktoré pracujú v saturačných režimoch s napájacím napätím ± 3 V, ako naznačuje literatúra [15].

V tomto obvode je výstupný signál U_{OUT} získavaný medzi tranzistormi Q_1 a Q_2 . Tranzistor Q_3 spolu s tranzistorom Q_1 sú typu N-MOS a spoločne tvoria jedno prúdové zrkadlo obvodu. Veľkosť ich pracovných bodov je nastavovaná tranzistorom M_3 , ktorý sa v obvode správa ako napätím ovládaný rezistor a jeho pracovný bod je ovplyvňovaný vstupným prúdom I_{IN} . Ten rovnako ovplyvňuje pracovný bod aj prúdového zrkadla, zloženému z tranzistorov M_1 a M_2 typu P-MOS. Odtiaľ je nastavovaný pracovný bod tranzistorov Q_2 a Q_4 , zapojených znova ako prúdové zrkadlo [15].

V konečnom dôsledku je výstupný signál priamo riadený dvoma prúdovými zrkadlami, respektíve tranzistormi Q₃ a Q₄, ktoré určujú napätia na gate tranzistorov Q₁ a Q₂ (Obr. 3.5) [15].



Obr. 3.5 Prevodník inverznej kvadratickej funkcie.

Celý obvod inverznej kvadratickej funkcie je založený na funkčnosti tranzistorov v saturačnom režime, pričom vychádza zo základnej rovnice tranzistorov MOSFET pre prúd I_D . Základnou podmienkou pre výstupný signál je rovnosť prúdov tranzistorov Q₁ a Q₂:

$$I_{DQ1} = I_{DQ2}, [A] \quad (3.10)$$

kde I_D predstavuje prúd drainu. Prúdy tranzistorov Q₁ a Q₂ je možné vyjadriť pomocou napätí a parametru K pre jednotlivé tranzistory:

$$I_{DQ1} = K_{Q1} \cdot (U_{OX} - U_{OUT} - U_{TH})^2 = K_{Q2} \cdot (U_{OY} - U_{V2} - U_{TH})^2 = I_{DQ2} \quad (3.11)$$

kde K_Q predstavuje transkonduktančný parameter konkrétneho tranzistora, U_T predstavuje prahové napätie tranzistora, U_{OX} , U_{OY} sú napätia v označených vetvách v Obr. 3.5 a U_{V2} je záporné napätie zdroja V₂ [15].

Napätia U_{OX} a U_{OY} priamo ovplyvňujú pracovné body P-MOS prúdových zrkadiel, preto veľkosť týchto napätí závisí aj na parametroch tranzistorov M₁ a M₂, pričom ich hodnoty sú rovné:

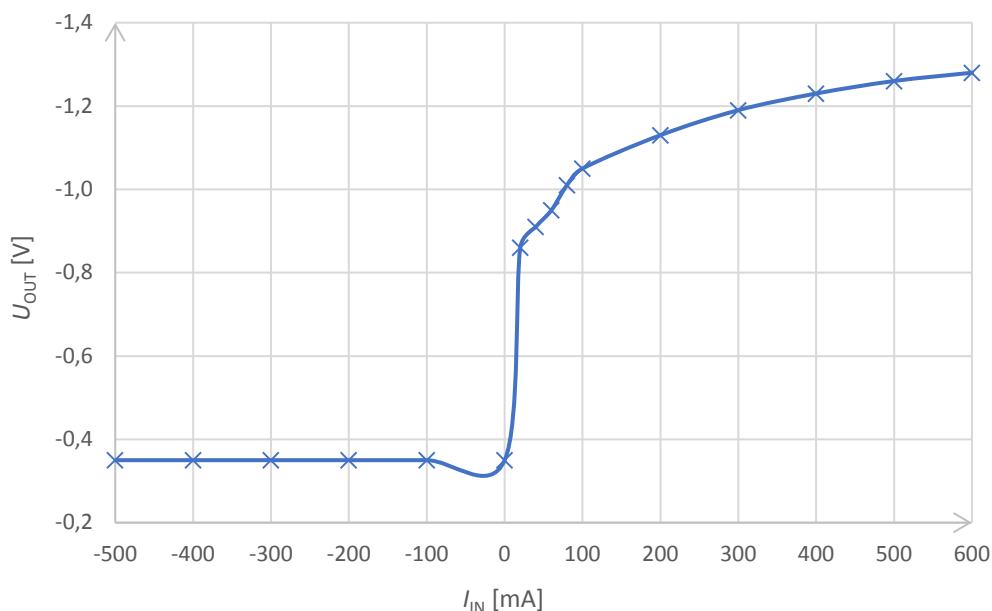
$$U_{OX} = \sqrt{\frac{I_{IN}}{K_{Q3}}} + U_{TH}, [V] \quad (3.12)$$

$$U_{OY} = \sqrt{\frac{I_{IN}}{KQ_4}} + U_{TH} + U_{V2}, [\text{V}] \quad (3.13)$$

kde I_{IN} predstavuje vstupný prúd obvodu. V prípade, ak budú parametre K použitých tranzistorov rovnaké, výsledný vzťah pre výstupné napätie bude [15]:

$$U_{OUT} = -\sqrt{\frac{I_{IN}}{K}}, [\text{V}] \quad (3.14)$$

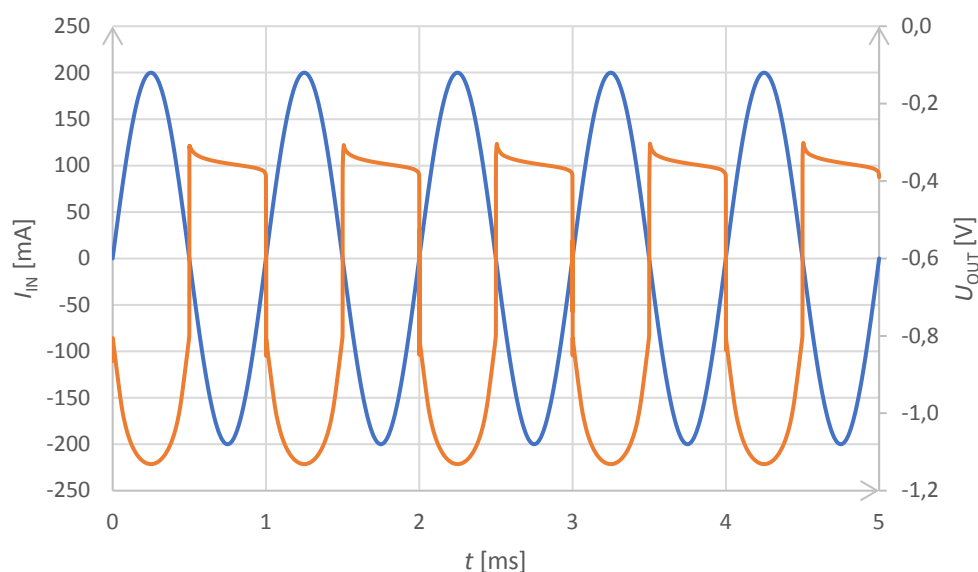
Pre overenie funkčnosti obvodu bola ako prvá simuláciou zrealizovaná prevodná charakteristika výstupného napätia U_{OUT} voči vstupnému prúdu I_{IN} . Na vstupe obvodu boli postupne nastavované prúdy v rozsahu -500 mA až 600 mA pri napájacom napätí $\pm 3 \text{ V}$ (Obr.3.6).



Obr. 3.6 Prevodná charakteristika obvodu inverznej kvadratickej funkcie.

Do prevodnej charakteristiky boli zámerne zahrnuté aj záporne prúdy, aby bolo jednoznačne potvrdené, že obvod nedokáže prevádzať odmocninu zo záporného čísla, čo je samozrejme aj matematicky nemožné. V kladných hodnotách má obvod veľkú vstupnú dynamiku, teda podľa simulácie dokáže spracovávať aj vyššie prúdy.

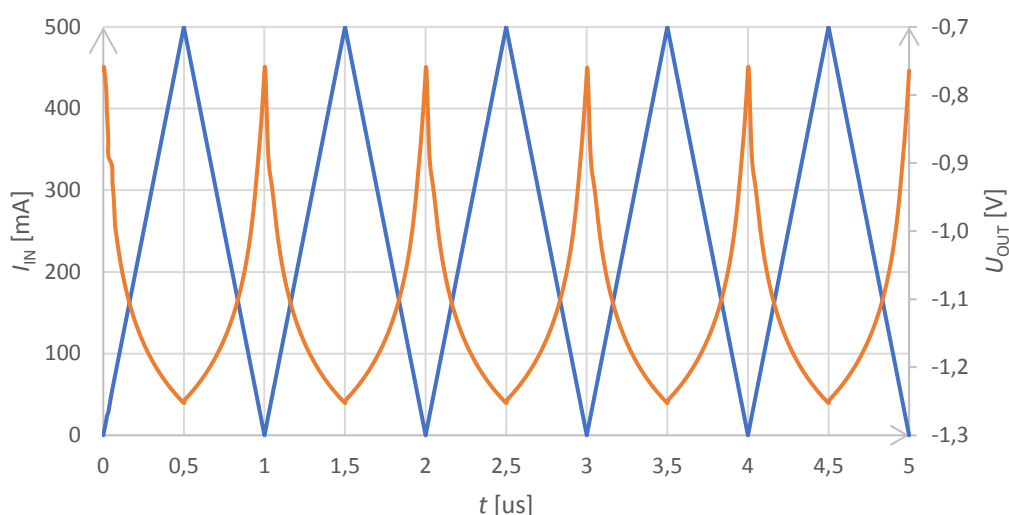
Následne bolo zapojenie simulované v časovej oblasti. Simulácia prebehla s nastaveným vstupným sínusovým signálom, s amplitúdou vstupného prúdu $I_{IN} = 200 \text{ mA}$ a frekvenciou $f = 1 \text{ kHz}$ (Obr. 3.7).



Obr. 3.7 Časová analýza prevodníka inverznej kvadratickej funkcie.

Výstupom simulácie je sínusový signál, ktorého tvar odpovedá predpokladom odmocneného sínusového signálu, teda akýmsi rozšíreným polvlnám, vzniknutým len pre kladnú časť periódy vstupného signálu. Pri záporných hodnotách vstupného signálu je výstupné napätie nulové, čo súhlasí so základným matematickým princípom inverznej kubickej funkcie.

Ďalej bol obvod podrobený simulácií s rozdielnym priebehom vstupného signálu, s amplitúdou vstupného prúdu $I_{IN} = 500$ mA a frekvenciou $f = 1$ MHz (Obr.3.8).

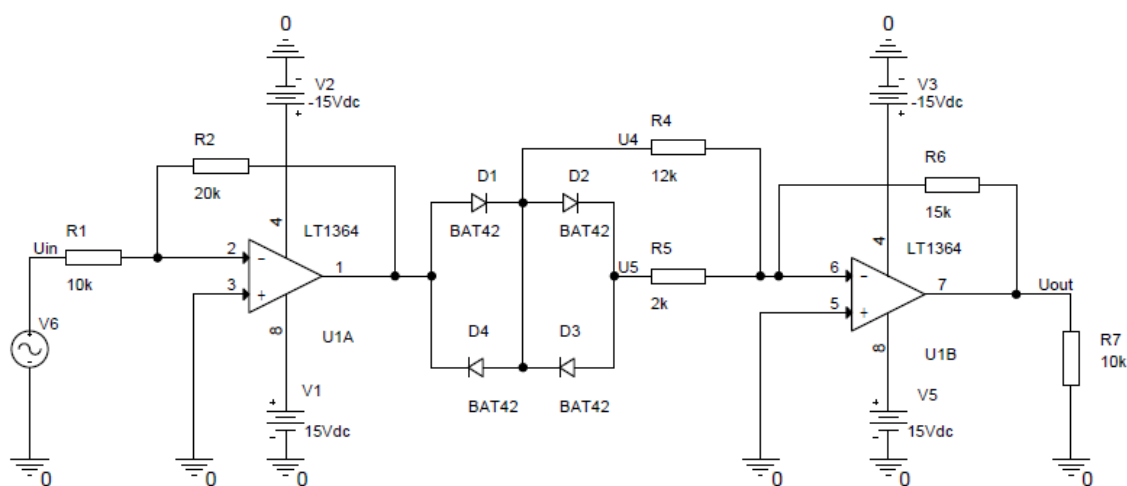


Obr. 3.8 Priebeh výstupného signálu trojuholníka pri frekvencii vstupného signálu 1 MHz.

Zo simulácie je dobre viditeľný priebeh výstupného napätia, ktorý má očakávaný tvar, čo potvrdzuje funkčnosť daného zapojenia. Naznačený výstupný priebeh v zápornej oblasti napätí je zásluhou prirodzených vlastností použitej štruktúry tranzistorov.

3.4 Prevodník kubickej funkcie (x^3)

Zapojenie prevodníka kubickej funkcie výlučne z tranzistorov by siahalo do rozsiahlych tranzistorových štruktúr. Preto bolo pre jednoduchosť pochopenia danej laboratórnej úlohy zvolené zapojenie pomocou operačných zosilňovačov (Obr. 3.9). Návrh bol inšpirovaný zdrojom [22].



Obr. 3.9 Prevodník kubickej funkcie.

Prevodník kubickej funkcie simuluje prevod vstupného signálu na jeho obraz v tvare tretej mocniny. Základným stavebným prvkom sú operačné zosilňovače typu LT1364. Vstupný signál s určitou frekvenciou a amplitúdou je na vstupe obvodu zosilnený pomocou pripojeného invertujúceho zosilňovača podľa pomeru odporu, ktorý má pripojený na vstupe a v jeho zápornej spätnej väzbe. Zosilnený a invertovaný signál je privádzaný na sériu diód s typovým označením BAT42, ktorých hlavným parametrom je rýchlosť zotavenia prechodu PN z dôvodu použiteľnosti do vyšších frekvencií a veľkosť úbytku napätia vznikajúceho na diódach. Pomer zosilnenia musí byť nadimenzovaný tak, aby aj pri nízkych hodnotách amplitúdy vstupného signálu diódy pracovali s vyšším napätím než je výrobcom udávaná hodnota ich prahového napätia.

Pre reálny operačný zosilňovač sa pre požadované zosilnenie vypočíta veľkosť odporov z nasledujúceho vzťahu:

$$A_{IN} = \frac{-(R_2/R_1)}{[1+(1+R_2/R_1)/A_U]} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1+\frac{1}{B \times A_U}} [-] \quad (3.15)$$

kde B symbolizuje prenos spätnoväzbového obvodu (do vstupu OZ) [7]:

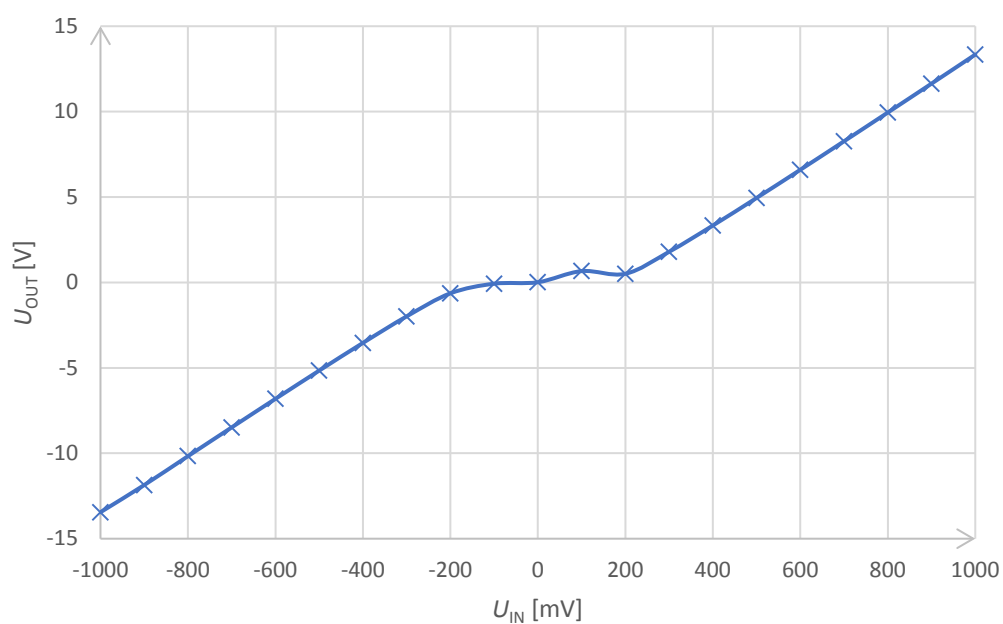
$$B = \frac{R_1}{R_1+R_2} [-] \quad (3.16)$$

Kladná, respektíve záporná polperióda zosilneného signálu je prevádzaná cez dvojicu diód, pričom na každej vznikne iný úbytok napätia. Prvá dióda v zapojení primárne určuje veľkosť amplitúdy signálu na výstupe a druhá zase jeho tvar. Vzniknuté signály, respektíve napätia, sú privádzané cez dvojicu odporov na vstup súčtového operačného zosilňovača U_{IB} . Pomer sčítavania vstupných signálov v OZ zabezpečujú už spomínané odpory R_4 a R_5 na jeho vstupe spolu s odporom R_6 v jeho spätnej väzbe v pomere [7]:

$$U_{OUT} = -\left(\frac{U_4 \times R_6}{R_4} + \frac{U_5 \times R_6}{R_5}\right). [V] \quad (3.17)$$

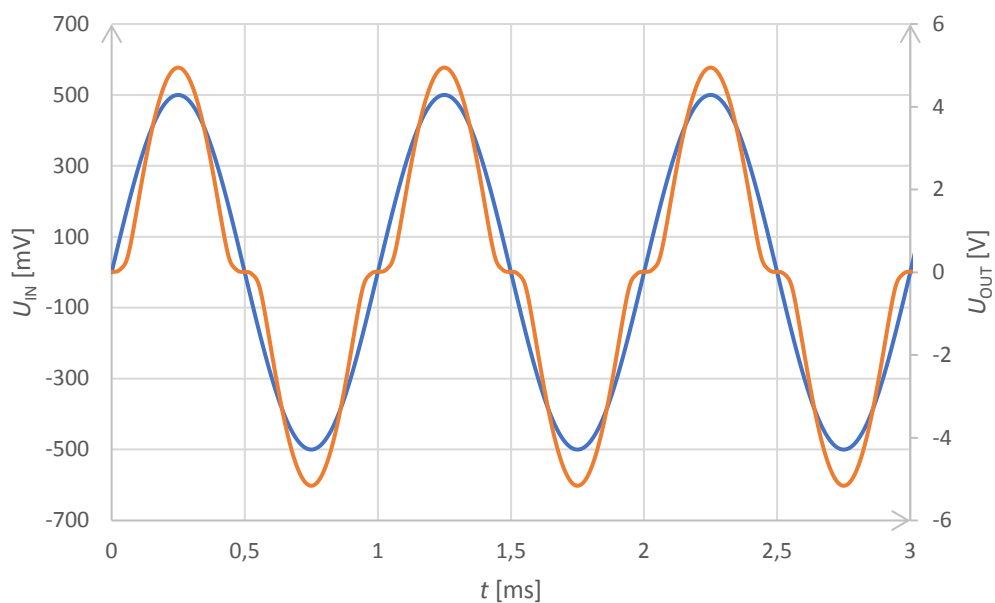
Ako ukazuje vzťah 3.16, výstupné napätie je invertované voči vstupným hodnotám, keďže súčtový OZ pracuje primárne s jeho invertujúcim vstupom. Z toho dôvodu bolo na vstupe prevodníka použité zapojenie invertujúceho zosilňovača, a tak je vstupný signál dvakrát invertovaný, čím sa zachová pôvodná fáza signálu. Hodnota výstupného napätia je získavaná na odpore R_7 , pripojenom voči zemi.

V prvom kroku bol obvod podrobený simulovaniu prevodnej charakteristiky (Obr 3.10). Na vstup prevodníka bolo privádzané napätie U_{IN} od -1 V do +1 V. Operačné zosilňovače boli napájané symetrickým napätím ± 15 V. Z prevodnej charakteristiky je veľmi dobre viditeľný jej nelineárny priebeh, potrebný k prevádzaniu vstupného signálu na obraz jeho tretej mocniny. Obvod sa vyznačuje aj veľkou vstupnou dynamikou, najspoláhlivejšie pracuje však v rozmedzí vstupného napätia $U_{IN} = \pm 1$ V.



Obr. 3.10 Prevodná charakteristika obvodu kubickej funkcie.

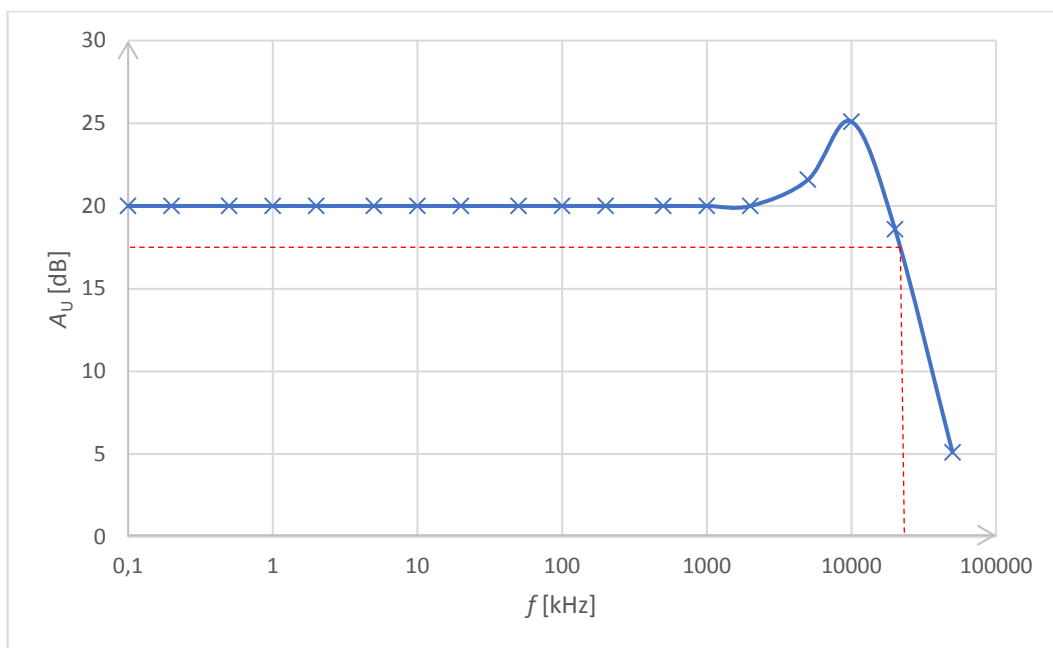
Po overení spoľahlivosti prevodníka bola na obvod aplikovaná časová analýza. Na vstup bol pripojený generátor sínusového signálu s amplitúdou $U_{IN} = \pm 500$ mV s frekvenciou $f = 1$ kHz (Obr. 3.11).



Obr. 3.11 Časová analýza prevodníka kubickej funkcie.

Z výsledku simulácie je jasne viditeľný priebeh výstupného signálu (oranžová krivka). Svojím tvarom, ktorý takmer dokonale reprodukuje požadovaný priebeh kubickej funkcie, obvod jasne deklaruje svoju funkčnosť a samozrejme použiteľnosť.

V poslednom rade bol obvod podrobený AC analýze na overenie jeho funkčnosti vo vyšších frekvenciách. Vstupný signál bol nastavovaný s frekvenciou v rozmedzí $f = 100 \text{ Hz}$ až 30 MHz pri amplitúde $U_{\text{IN}} = 500 \text{ mV}$ (Obr. 3.12).



Obr. 3.12 AC analýza prevodníka.

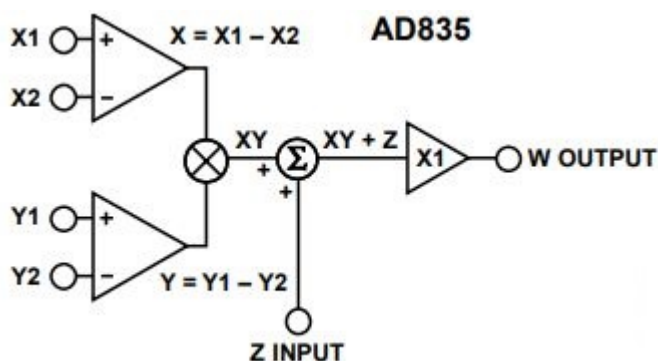
Vertikálnu os grafu tvorí napäťový prenos A_u , čo je logaritmická hodnota pomeru výstupného napätia ku vstupnému, vyjadrená v jednotkách dB. Z grafu je zrejmé, že pokles napäťového prenosu o 3 dB nastáva až pri frekvenciách vyšších než 10 MHz, teda takto navrhnutý obvod spĺňa podmienku jeho funkčnosti do frekvencie 100 kHz.

4 NÁVRH PREVODNÍKA POLYNOMIÁLNEJ PREVODNEJ CHARAKTERISTIKY.

V nasledujúcej kapitole bude podrobne preskúmaný návrh prevodníka polynomiálnej funkcie. Ako základné súčasti podieľajúce sa na správnej funkčnosti obvodu boli použité analógové násobičky a operačné zosilňovače, ktorých princípy a vlastnosti boli popísané v kapitole č. 1. Návrh je rozčlenený na základný popis použitých analógových násobičiek, samotnú realizáciu obvodu a analýzy, ktoré preukazujú jeho správnu funkčnosť. Pri realizácii prevládala snaha o čo najúspornejšie a samozrejme aj finančne najšetrnejšie riešenie danej problematiky.

4.1 Popis a základné parametre obvodu AD835.

Obvod AD835 je štvor-kvadrantová analógová násobička s napäťovým výstupom, vyrobená pokročilým dielektricky izolovaným komplementárnym bipolárnym procesom od firmy Analog Devices. Jej výstupom je lineárne násobený produkt vstupných napätí s poklesom výstupného napätia voči vstupnému o 3 dB v rozsahu frekvenčného pásma 250 MHz. Jej vnútorné blokové zapojenie je zobrazené na Obr. 4.1 [14].



Obr. 4.1 Bloková schéma obvodu AD835 [14].

Obvod obsahuje spolu 5 vstupov a jeden výstup. Vstupný signál môže byť privádzaný na neinvertujúce (X_1 , Y_1) alebo invertujúce (X_2 , Y_2) vstupy, ktoré sú vzájomne násobené. Vstup Z je privedený k sumátoru násobičky, teda hodnota napätia na jeho vstupe je pripočítavaná k produktu násobenia. Obvod si na všetkých svojich vstupoch zachováva vysokú vstupnú impedanciu (100 k Ω). Výstupná impedancia obvodu sa pohybuje okolo hodnoty 25 Ω . Obvod pracuje s nominálnym napätím ± 5 V [14]. Jeho základné parametre sú zhrnuté v Tabulke 4-1.

Tabulka 4-1 Základné parametre obvodu AD835 [14].

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Rozsah vstupného napätia		±1		V
Vstupná impedancia		100		kΩ
Vstupný offset		±3	±20	mV
Frekvenčné pásmo poklesu o -3 dB	150	250		MHz
Rozsah výstupného napätia	±2,2	±2,5		V
Výstupný offset			±10	mV
Napájacie napätie	±4,5	±5	±5,5	V

Výstupné napätie násobičky je vo všeobecnom tvare definované podľa nasledujúcej funkcie:

$$U_W = \frac{(U_{X1} - U_{X2})(U_{Y1} - U_{Y2})}{F} + U_Z, [\text{V}] \quad (4.1)$$

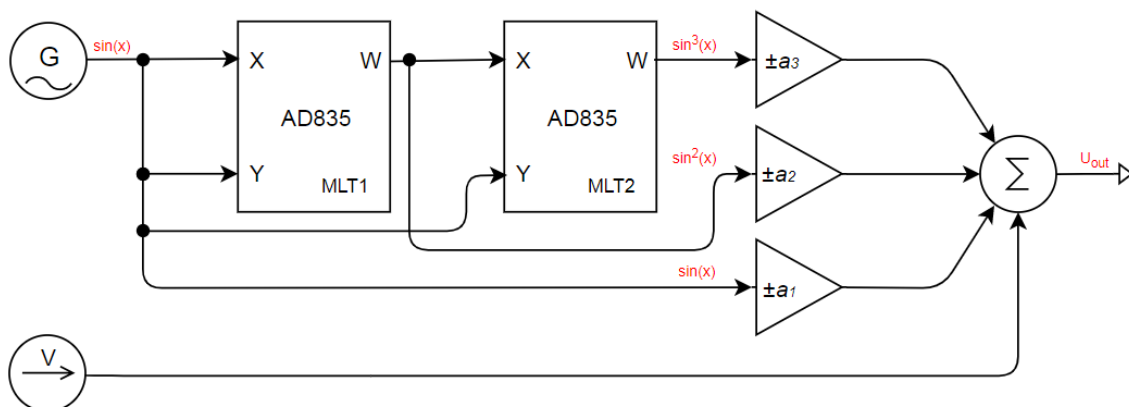
kde U_W je výstupné napätie analógovej násobičky a U_{X1} , U_{X2} , U_{Y1} , U_{Y2} , U_Z , predstavujú jej vstupy. Parameter F reprezentuje deliaci faktor. Násobené signály sú privádzané na neinvertujúce vstupy X_1 a Y_1 . Invertujúce vstupy X_2 a Y_2 musia byť pre správnu funkčnosť zapojenia uzemnené. Výstupný signál získavaný na výstupe W je pomocou odporového deliča, zloženého z odporu R_1 a potenciometra R_2 , privádzaný na vstup Z, kde dokáže v rozmedzí 0,95 V až 1,05 V kompenzovať stratu spôsobenú deliacim faktorom F [14].

4.2 Prevodník polynomiálnej funkcie

Úlohou, ktorú má splňať prevodník polynomiálnej prevodnej charakteristiky je prevádzať vstupný signál spojitý v čase na výstupný signál podľa prevodnej charakteristiky:

$$f(x) = a_3 \times x^3 \pm a_2 \times x^2 \pm a_1 \times x \pm a_0 \quad (4.2)$$

Túto funkciu zabezpečujú dve analógové násobičky typu AD835 od firmy Analog Devices a operačné zosilňovače typu LT1364. Symbolické zapojenie je prezentované blokovou schémou na Obr. 4.2. Ako príklad je použitý obvod s generátorom sínusového signálu na vstupe zapojenia.



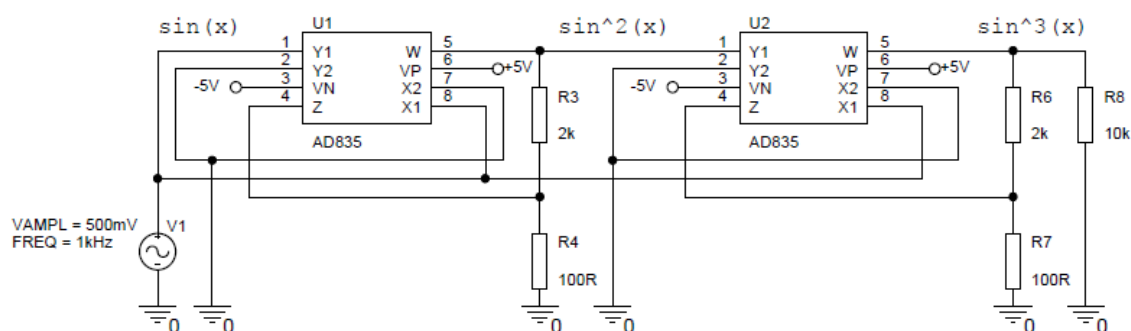
Obr. 4.2 Bloková schéma prevodníka polynomiálnej funkcie.

Pre jednoduchosť popisu blokovej schémy bol zvolený zjednodušený popis signálu bez úvahy jeho amplitúdy a fázy. Sínusový signál ($\sin(x)$) z generátora tvarových signálov je privádzaný na vstupy X a Y prvej analógovej násobičky MLT₁. Jeho okamžité hodnoty sú medzi sebou vzájomne násobené a na výstupe W je získavaný signál $\sin^2(x)$. Ten je privádzaný na vstup X ďalšej analógovej násobičky MLT₂ a zároveň aj na zosilňovací (prípadne zoslabovací) stupeň $\pm a_2$. Ten pridáva k signálu $\sin^2(x)$ konštantu a_2 a vzniknutý výsledok $\pm a_2 \sin^2(x)$ je privádzaný do sumačného člena. Druhá analógová násobička vstupný signál $\sin^2(x)$ privedený na vstup X násobí spolu s pôvodným signálom $\sin(x)$ z generátora, pričom na výstupe W je získavaný signál $\sin^3(x)$.

Rovnakým postupom cez zosilňovací stupeň $\pm a_3$ je k signálu pridávaná konštanta a_3 a na jeho výstupe získavaný výsledok $\pm a_3 \sin^3(x)$. K pôvodnému signálu $\sin(x)$ je konštanta a_1 pridávaná rovnakým spôsobom v zosilňovacom stupni $\pm a_1$ s výsledkom $\pm a_1 \sin(x)$. Posledná konštanta a_0 je získavaná zo zdroja jednosmerného signálu. Takto vzniknuté štyri signály sú spolu sčítané pomocou sumačného člena, ktorý tvorí operačný zosilňovač zapojený ako súčtový.

Kompletná schéma zapojenia je zobrazená v prílohe 2. Avšak pre úplnosť návrhu sú v ďalšom texte podrobnejšie rozobrané jej jednotlivé bloky.

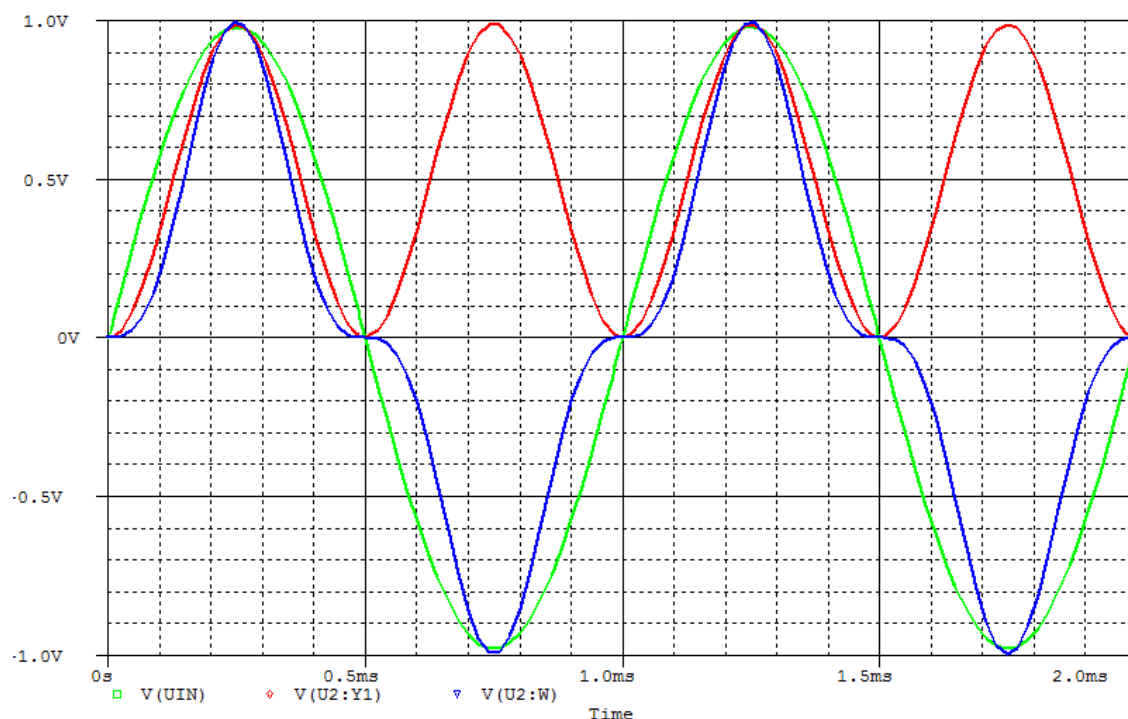
Prvým a technologicky najnáročnejším blokom polynomiálneho prevodníka je časť obvodu vytvárajúca druhú a tretiu mocninu vstupného signálu (Obr. 4.3).



Obr. 4.3 Zapojenie obvodu $\sin^2$ a $\sin^3$.

Vstupný signál je privádzaný na neinvertujúce vstupy X_1 a Y_1 prvej analógovej násobičky, zároveň aj na rovnaký vstup druhej násobičky X_1 . Signály na výstupe násobičiek vznikajú na princípoch popísaných vyššie. Pre správnu funkčnosť musia byť invertujúce vstupy X_2 a Y_2 oboch násobičiek pripojené na zem. Veľkosť potenciálu pripojeného na vstupe Z je pripočítavaná k súčinu vstupných signálov násobičky. Napätie vznikajúce na odporovom deliči pripojenom k vstupu Z slúži na pripočítanie napäťovej straty, vzniknutej prechodom signálu cez vnútorný obvod napäťovej násobičky. Hodnotu odporov pre ideálny stav zapojenia udáva výrobca v datasheet katalógu súčiastky.

Správnu funkčnosť takto zapojeného obvodu deklaruje jeho analýza v časovej oblasti (Obr. 4.4).



Obr. 4.4 Analýza obvodu $\sin^2$ a $\sin^3$ v časovej oblasti.

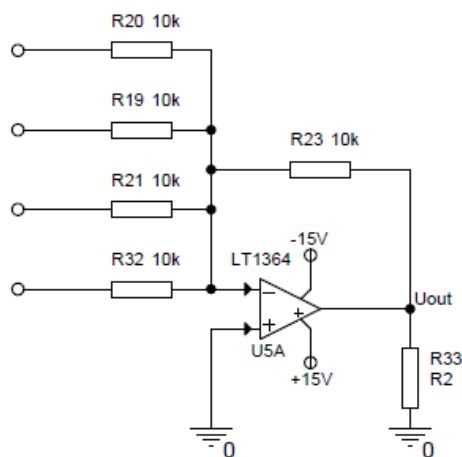
Analýza bola vykonaná s nastavením amplitúdy vstupného obvodu $U_{IN} = 1 \text{ V}$, frekvencie $f = 1 \text{ kHz}$ a nastavenom napájacom napätí oboch analógových násobičiek $U_{CC} = \pm 5 \text{ V}$. Z jej výstupu je viditeľný zelený priebeh symbolizujúci vstupný signál, červený priebeh v tvare druhej mocniny vstupného signálu a modrý priebeh, ktorého tvar a nelinearita v oblasti polperiódy vstupného signálu jasne poukazujú na priebeh tretej mocniny vstupného signálu.

Takto vzniknuté signály je ešte potrebné vynásobiť konštantou prezentovanou v zadaní polynomiálnej funkcie ako konštanta a . Jednoduchým riešením je vzniknuté výstupné signály obvodu zosilniť (prípadne zoslabiť) pomocou pripojených invertujúcich operačných zosilňovačov. Hodnota výsledného zosilnenia takéhoto zapojenia sa vypočíta podľa vzťahu:

$$A = \frac{-(R_2/R_1)}{[1+(1+R_2/R_1)/A_U]}, [-] \quad (4.2)$$

kde A_U predstavuje zosilnenie OZ bez spätnej väzby, R_1 je hodnota odporu pripojeného k invertovanému vstupu a R_2 je hodnota odporu v spätnej väzbe. Pomocou premenlivého odporu R_2 je možné nastavovať veľkosť zosilnenia, teda rozmer konštanty a . Rovnakým spôsobom je zosilňovaný aj pôvodný signál tvoriaci časť polynómu a_1x .

Ďalším článkom reťazca je OZ v sumačnom zapojení, ktorý pri sčítavaní signálov pracuje zásadne s invertujúcim vstupom. Zapojenie sumačného OZ je vyobrazené na Obr. 4.5.



Obr. 4.5 Sumačný operačný zosilňovač.

Sumačný operačný zosilňovač v tomto zapojení sčítava štyri signály do jedného výstupného. Signál x^3 je pripojený cez odpor R_{20} na jeho invertujúci vstup. Rovnako aj signál x^2 cez odpor R_{21} a signál x^1 cez odpor R_{19} . Pripočítavaná konštanta a_0 je na vstup

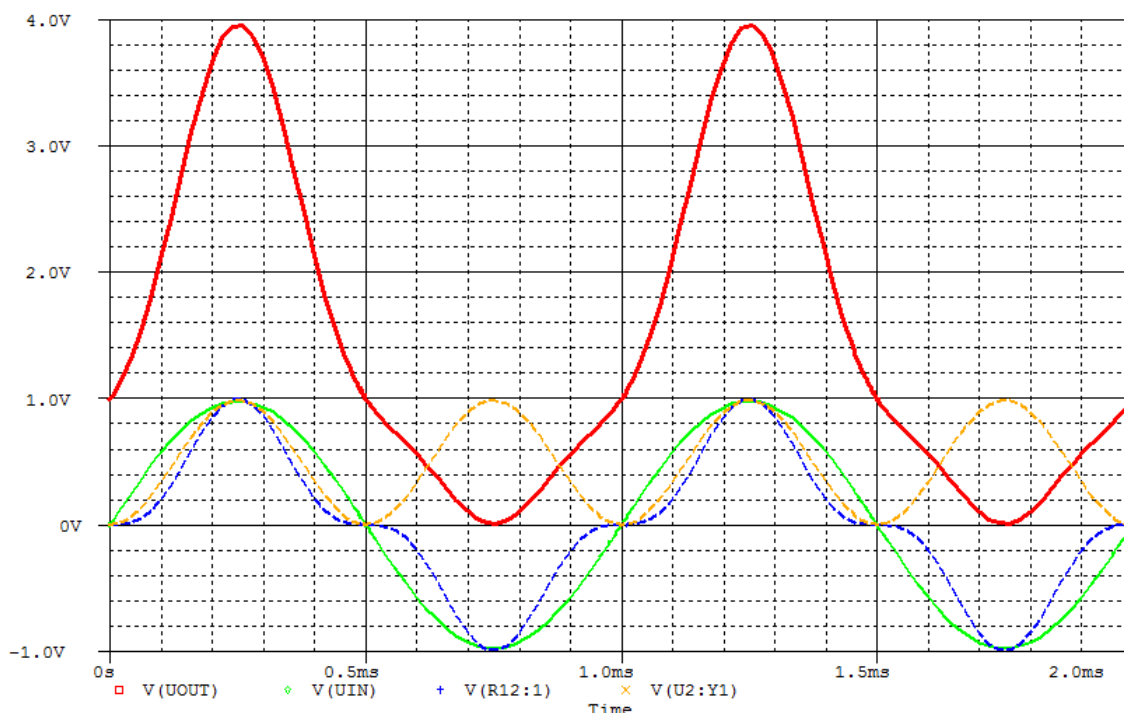
privádzaná ako záporné alebo kladné jednosmerné napätie cez odpor R_{32} . Veľkosť zosilnenia obvodu je nastavovaná hodnotou jednotlivých odporov na vstupe OZ a odporom R_{23} v jeho spätnej väzbe v pomere [7]:

$$U_{OUT} = - \left(\frac{U_{R20} \cdot R_{20}}{R_{23}} + \frac{U_{R21} \cdot R_{21}}{R_{23}} + \frac{U_{R19} \cdot R_{19}}{R_{23}} + \frac{U_{R32} \cdot R_{32}}{R_{23}} \right), [V] \quad (4.3)$$

kde jednotlivé napätia U_R predstavujú vstupné napätia, respektíve signály vstupujúce do obvodu. Z rovnice 4.3 je zrejmé, že pri použití rovnakých hodnôt odporov sú signály rovnomerne sčítavané.

Pre potrebu prípadného odčítania jednotlivých blokov polynomiálnej rovnice bol obvod rozšírený o operačné zosilňovače, pripojené v invertujúcom zapojení. Pomocou prepínačov je možné zvoliť si buď priamy prechod signálu zo zosilňovacieho stupňa na sumačný člen, alebo jeho invertovanie pomocou OZ s nastaveným zosilnením $A = 1$.

Zapojenie prevodníka polynomiálnej funkcie bolo v prvom kroku podrobené časovej analýze s parametrami generátora: $U_{IN} = \pm 1$ V, $f = 1$ kHz, $U_{ccAM} = \pm 5$ V a $U_{ccOZ} = \pm 15$ V (Obr. 4.6).

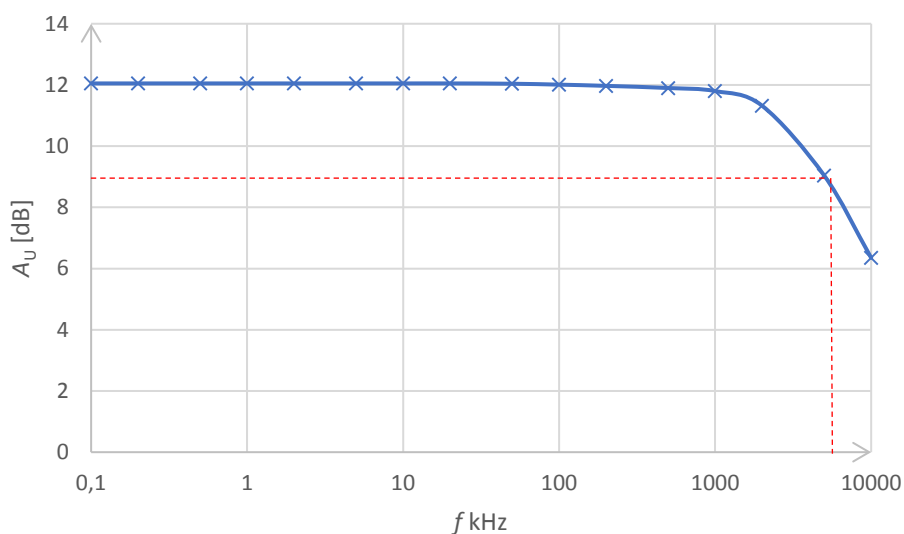


Obr. 4.6 Časová analýza obvodu polynomiálnej funkcie.

Jednosmerné napätie vstupujúce do obvodu ako člen polynomiálnej rovnice a_0 bolo nastavené na -1 V. Ostatné konštanty a_1 až a_3 boli nastavené na hodnotu jedna, čo v praxi znamená, že zosilnenia jednotlivých OZ mali hodnotu $A = 1$. Zobrazená analýza jasne preukazuje funkčnosť daného zapojenia. Prvá mocnina signálu, teda vstupný signál

sám o sebe (zelený priebeh) je v každom okamihu sčítavaný s jeho druhou (žltý čiarkovaný priebeh) a tretou (modrý čiarkovaný priebeh) mocninou. Výstupný signál znázornený červenou farbou je posunutý do kladnej oblasti s offsetom 1 V, ktorý do obvodu zavádza konštanta a_0 , teda jednosmerné napätie s hodnotou 1 V. Z priebehu je taktiež viditeľný súčet jednotlivých amplitúd polynomiálnej rovnice.

Následne bol obvod podrobený AC analýze s nastavenými rovnakými podmienkami a frekvenciou od 100 Hz do 10 MHz (Obr. 4.7).



Obr. 4.7 AC analýza obvodu polynomiálnej funkcie.

Vertikálna os grafu je znova tvorená zlogaritmovaným podielom výstupného napätia ku vstupnému. Ako je z obrázku zrejmé, pokles o 3 dB nastáva až za hodnotou frekvencie 5 MHz, teda takto zapojený obvod je do navrhovanej frekvencie plne použiteľný.

5 NÁVRH NAPÁJACIEHO ZDROJA

V tejto kapitole je bližšie popísaný spôsob návrhu obvodu, ktorého produktom sú napätia používané ako napájacie napätia jednotlivých komponentov laboratórnej úlohy. Základnými prvkami využívanými na reguláciu požadovaného napätia sú stabilizačné obvody typu LM317 a LM337.

5.1 Základné parametre obvodu LM317 a LM337

Obvod LM317 je trojpinový regulátor kladného napätia schopný disponovať výstupným napätím v rozsahu 1,25 V až 37 V a výstupným prúdom okolo 1,5 A. Zmena výstupného napätia je zabezpečená pomocou dvoch externých odporov. Preto využitie nachádza všade, kde je potrebné dosiahnuť presné hodnoty jednosmerného napätia. Jeho základné parametre sú zhrnuté v Tabulke 5-1 [17].

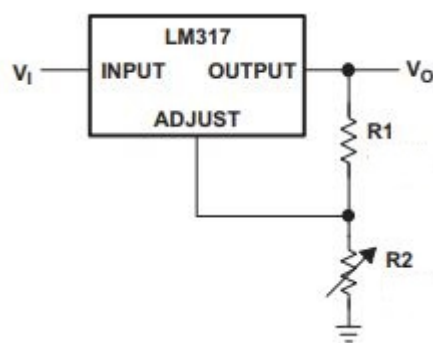
Tabulka 5-1 Základné parametre obvodu LM317 [17].

Označenie	Popis	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
$U_I - U_{OUT}$	Rozdiel napätí medzi vstupom a výstupom	3		40	V
T_J	Pracovná teplota	-65		150	°C
U_{OUT}	Výstupné napätie	1,25		37	V
I_{OUT}	Výstupný prúd	0,01		1,5	A
Line regulation	Zmena výstupného napätia pri zmene vstupného napätia		0,01	0,04	%/V
Load regulation	Zmena výstupného napätia pri zmene výstupného prúdu alebo záťaže.			25	mV
			0,1	0,5	%/V
U_{ref}	Referenčné napätie	1,2	1,25	1,3	V
I_{Omax}	Maximálny výstupný prúd	1,5		2,2	A

Z dôvodu konštantnej hodnoty referenčného napätia U_{REF} stabilizátora je možné v jednoduchosti odvodiť vzťah pre výstupné napätie ako:

$$U_{OUT} = U_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right), [V] \quad (5.1)$$

kde U_{OUT} je výstupné napätie, U_{REF} je referenčné napätie a R_1 a R_2 sú hodnoty odporov deliča napätia zapojeného podľa Obr. 5.1 ako uvádza literatúra [17].



Obr. 5.1 Regulácia výstupného napätia obvodu LM317 [17].

Obvod LM337 je trojpinový regulátor záporného napätia pracujúci s rozsahom výstupného napätia od $-1,2$ V do -37 V a výstupným prúdom až $-1,5$ A. Jeho základné parametre sú uvedené v Tabulke 5-2.

Tabulka 5-2 Základné parametre obvodu LM337 [18].

Označenie	Popis	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
$U_I - U_{OUT}$	Rozdiel napätí medzi vstupom a výstupom			-40	V
T_j	Pracovná teplota	-65		150	°C
U_{OUT}	Výstupné napätie	-2,5		-37	V
I_{OUT}	Výstupný prúd	0,01		1,5	A
Line regulation	Zmena výstupného napätia pri zmene vstupného napätia		0,01	0,04	%/V
Load regulation	Zmena výstupného napätia pri zmene výstupného prúdu alebo záťaže.			50	mV
			0,3	1	%/V
U_{ref}	Referenčné napätie	-1,2	-1,25	-1,3	V
I_{Omax}	Maximálny výstupný prúd	1,5		2,2	A

Regulácia výstupného záporného napätia prebieha podľa vzťahu 5.1. Viac informácií o danom regulátore je možné nájsť v literatúre [18].

5.2 Návrh napájacej jednotky zdroja napätia

Pre správnu funkčnosť jednotlivých obvodov navrhovanej laboratórnej úlohy sú potrebné hlavne presné napájacie napätia jednotlivých prevodníkov. Z toho dôvodu boli pre svoju jednoduchosť regulácie a cenovú nenáročnosť zvolené vyššie popisované obvody. Predpokladom však je, že na pracovisku laboratórnej úlohy bude prítomný stabilizovaný symetrický regulovateľný zdroj napätia. Z toho dôvodu bol návrh transformátora a usmerňovacieho mostíka s filtráciou napätia vynechaný.

Symetrické napätie z regulovateľného laboratórneho zdroja je privádzané na vstupné konektory obvodu. Za nimi nasleduje dvojica diód, ktorá ochraňuje zvyšok obvodu pred prepólovaním vstupného napätia.

Obvod je ďalej rozvetvený na štyri časti. Prvá vetva je vyvedená priamo na kontakty označené +15 V, GND a -15 V, ktoré sú využité na napájanie operačných zosilňovačov.

Druhá vetva obvodu je privedená cez paralelne pripojené kondenzátory C_1 , C_2 na vstupy stabilizátorov napätí. Dvojica stabilizátorov reguluje podľa nastavených odporov napäťových deličov na svojich výstupoch (R_1 , R_2 , P_1 , P_2) výstupné napätie privedené cez paralelne pripojené kondenzátory C_5 , C_6 na výstupné svorky označené +5 V, GND a -5 V. Samotná regulácia výstupného napätia stabilizátorov prebieha podľa vzťahu 5.1. Na jeho správne nastavenie bol jeden z dvojice odporov v odporových deličoch nahradený trimrom, ktorý (zohľadňujúc toleranciu súčiastok) zabezpečí správnu hodnotu napätia privádzanú na jednotlivé prevodníky. Fóliové kondenzátory C_1 , C_2 , C_5 , C_6 slúžia na prípadné odrušenie prídavnej vysokofrekvenčnej zložky a vedú k zníženiu vnútorného odporu zdroja.

Absolútne rovnakým spôsobom boli navrhnuté aj vetvy napäťového zdroja vyvedené na konektory s označením +3,3 V, GND a -3,3 V a +6 V, GND a -6 V.

Kompletná schéma zapojenia sa nachádza v prílohe 2.

6 NÁVRH GENERÁTORA SIGNÁLOV

Nasledujúca kapitola sa zaoberá návrhom laditeľného generátora harmonických signálov s priebehmi v tvare sínusu, trojuholníka a obdĺžnika s dosiahnuteľnou výstupnou frekvenciou minimálne 100 kHz. Ako základný obvod bol kvôli svojej cenovej dostupnosti zvolený obvod XR-8038. Jeho popis a základné parametre sú obsiahnuté v nasledujúcom texte.

Obvod XR-8038 je precízny generátor tvarových signálov, ktorého výstupným produktom sú signály v tvare sínusu, trojuholníka, obdĺžnika prípadne určité pulzy. Na svoju funkčnosť potrebuje len minimum vonkajších komponentov. Pomocou externých potenciometrov a kondenzátorov dokáže meniť svoju výstupnú frekvenciu v rozsahu 0,001 Hz až 200 kHz. Jeho základné parametre sú popísané v Tabulke 6-1 [19].

Tabulka 6-1 Základné parametre obvodu XR-8038 [19].

Označenie	Popis	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
U_{SS}	Nesymetrické napájacie napätie	10		30	V
U_{DS}	Symetrické napájacie napätie	± 5		± 15	V
I_{SS}	Napájací prúd		12	20	mA
f_{max}	Maximálna frekvencia	200			kHz
f_{min}	Minimálna frekvencia		0,001		Hz
r_{out}	Výstupná impedancia		200		Ω
$U_{p-p(max)}$	Maximálna amplitúda sínusového signálu (peak-to-Peak)	0,2	0,22		V _{SS}

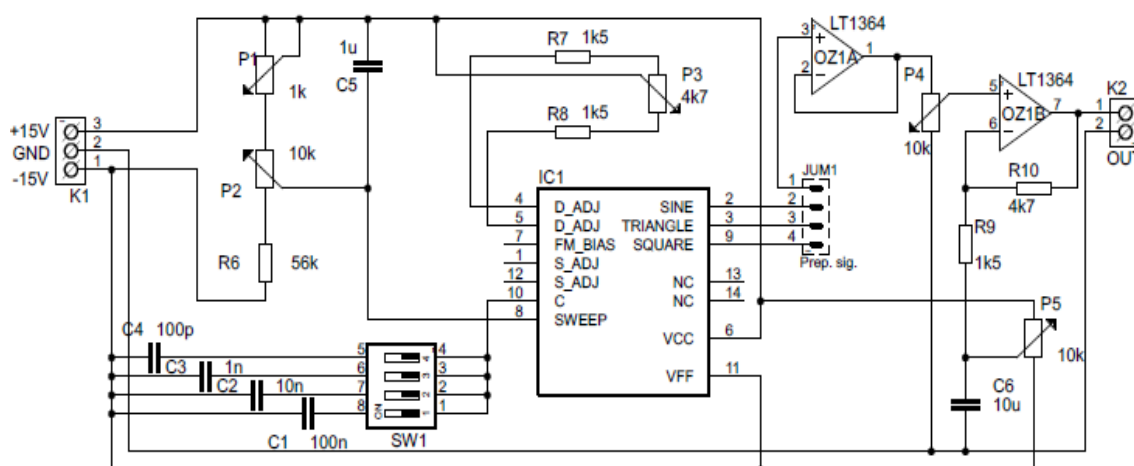
Kompletná schéma obvodu je umiestnená v prílohe 1. Obvod generátora tvarových signálov je napájaný zo symetrického zdroja s napätím ± 15 V. Rozsah frekvencií je prepínaný pomocou série kondenzátorov C_1, C_2, C_3, C_4 s rádovo sa zvyšujúcou kapacitou od 100 pF do 100 nF. Veľkosť frekvencie je nastavovaná privedením napätia na vstup Sweep generátora cez sériu potenciometrov. Potenciometer P_1 slúži na hrubé doladenie frekvencie a potenciometer P_2 na jemné doladovanie. Predradený odpor R_6 plní úlohu nastavenia napäťovej referencie pre oba potenciometre odporového deliča [19].

Potenciometer P_3 má kontakt svojho bežca pripojený ku kladnému napätiu. Jeho zvyšné dva kontakty sú pripojené cez rezistory R_7 a R_8 na 4. a 5. vstup generátora

signálov. Pohybom bežca je nastavovaná rozdielna úroveň napätí na vstupoch 4 a 5, čím obvod dokáže meniť striedu signálu [19].

Výstupné kontakty obvodu 2, 3 a 9, odkiaľ plynú signály sínus, trojuholník a obdĺžnik, sú privedené na prepínač signálov JUM₁, ktorý bude prepínať požadovaný signál na výstup.

Výstupný signál obvodu je však ešte prevedený cez dvojicu napäťových zosilňovačov typu LT1364. Prvý z dvojice operačných zosilňovačov je zapojený ako napäťový sledovač, slúžiaci v tomto prípade k oddeleniu zdroja signálu. Za ním nasleduje potenciometer P_4 , udávajúci veľkosť amplitúdy výstupného signálu. Ďalej je signál privedený na neinvertujúci vstup druhého operačného zosilňovača. Ten má v spätnej väzbe odporový delič, posilnený potenciometrom, napájaným symetrickým napätím, pričom spolu nastavujú DC offset výstupného signálu. Schéma zapojenia generátora harmonických signálov sa nachádza na Obr. 6.1. Viac informácií o zapojení je možné nájsť v literatúre [19].

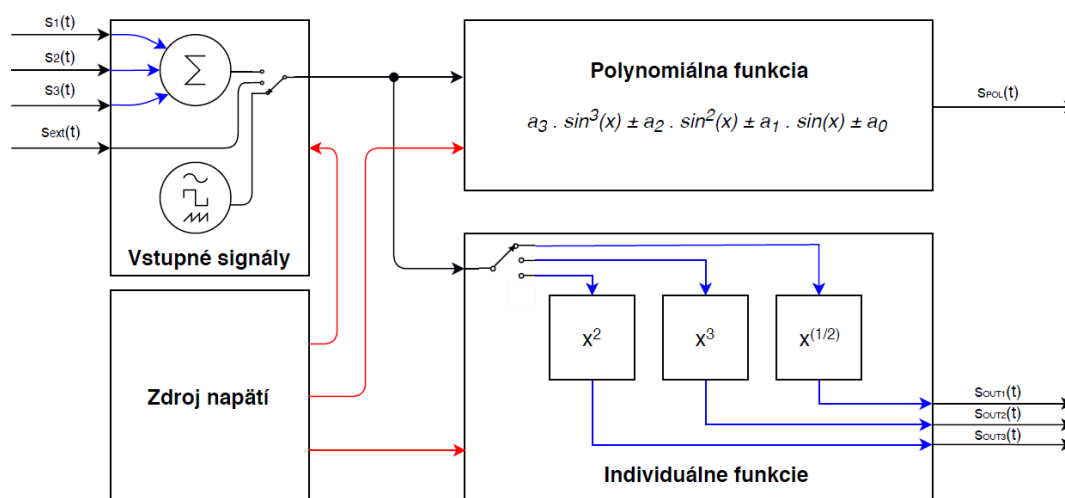


Obr. 6.1 Schéma zapojenia generátora harmonických signálov.

7 PRAKTICKÁ REALIZÁCIA MERACIEHO PRÍPRAVKU

Nasledujúca kapitola popisuje praktické spracovanie a rozvrhnutie blokov prípravku, skonštruovaného primárne pre účely merania navrhovanej laboratórnej úlohy. Obsahom jednotlivých blokov je bližší popis doplnenia a spracovania teoretických návrhov funkčných obvodov jednotlivých prevodníkov a ich ochrana pred zničením.

Prehľad konštrukcie jednotlivých blokov meracieho prípravku dopĺňa bloková schéma zapojenia (Obr. 7.1).



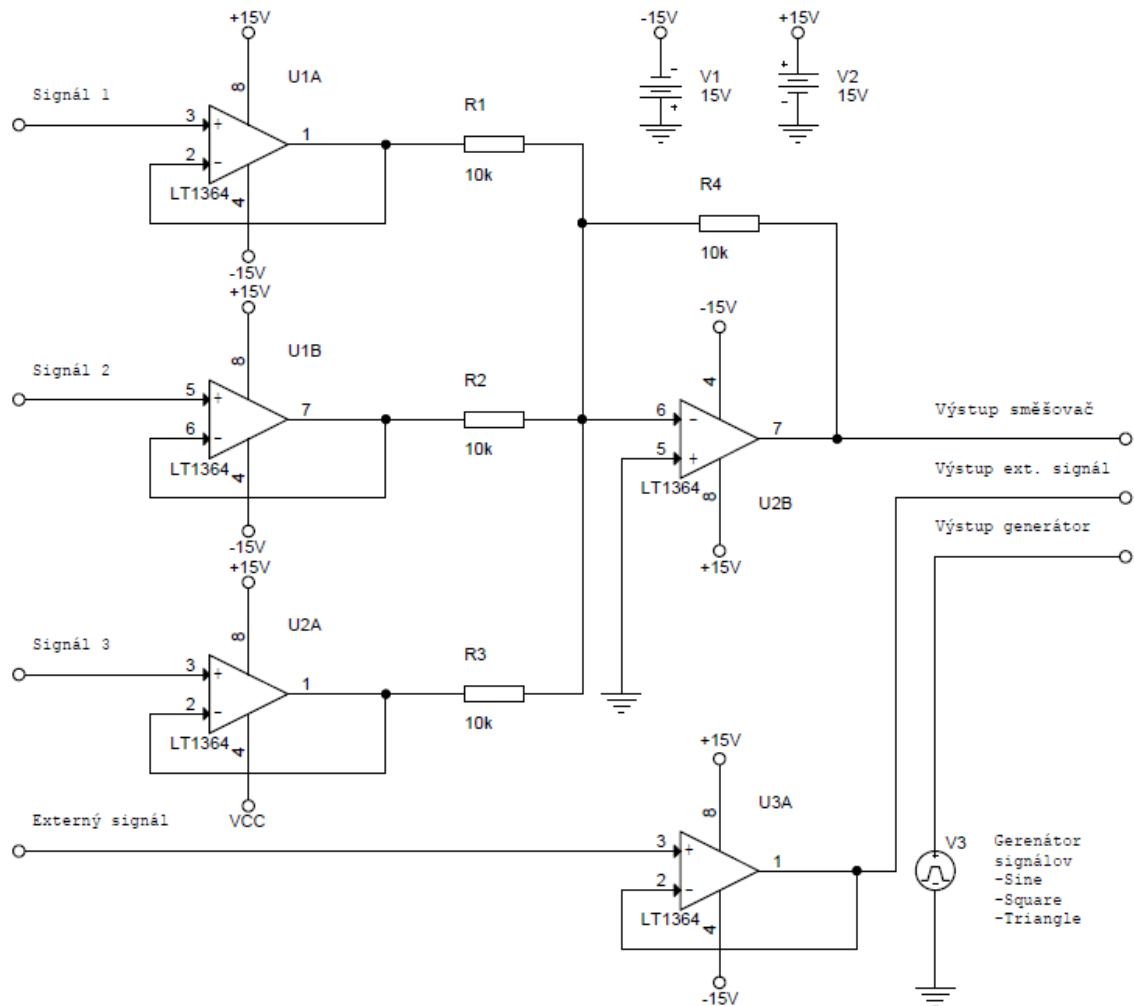
Obr. 7.1 Bloková schéma meracieho prípravku.

Blok vstupných signálov zabezpečuje správnu interpretáciu signálu privádzaného do ďalších blokov k jednotlivým prevodníkom. Jeho funkciou je výber medzi sčítaním troch rôznych vstupných signálov do jedného výstupného pomocou sumačného člena, variant s pripojením interného generátora, generujúceho výstupný signál s možnosťou voľby sine, triangle alebo square a výstupnou frekvenciou $f_{\text{GEN}} = 100 \text{ kHz}$, alebo prepojenie externého zdroja signálu priamo na vstupy prevodníkov. Blok polynomiálnej funkcie určuje pomocou sady prepínačov požadované nastavenie jednotlivých koeficientov a_3 až a_0 polynomiálnej rovnice, prípadne určuje ich súčet alebo rozdiel.

Ďalšou časťou meracieho prípravku je blok individuálnych funkcií, špecializujúci sa na prepínanie medzi funkciami x^2 , x^3 alebo $x^{1/2}$. Jeho súčasťou je prepínač zabezpečujúci voľbu prepojenia vstupného signálu na jeden z požadovaných prevodníkov. Posledným blokom je zdroj napätí vo funkcií napájacej jednotky pre všetky obvody.

7.1 Blok vstupných signálov

Jednou z požiadaviek na merací prípravok laboratórnej úlohy bolo aj zostrojenie funkčnej časti výstupných signálov s možnosťou ich výberu. Daný blok zabezpečuje vytvorenie troch druhov výstupného signálu (Obr 7.2).



Obr. 7.2 Blok vstupných signálov.

Prvou možnosťou výberu signálu vedúceho k blokom prevodníkov je výstupný signál zmiešavača. Vstupné signály 1, 2 a 3 sú cez napäťové sledovače (obvody U_{1A}, U_{1B} a U_{2A}) privedené sadou rezistorov do operačného zosilňovača U_{2B}. Ten v tomto zapojení spolu s trojicou rezistorov R₁, R₂ a R₃ a rezistorom R₄ v spätnej väzbe tvorí súčtový člen vstupných signálov. Nominálne hodnoty jednotlivých rezistorov zabezpečujú napäťový prenos obvodu $A = 1$.

Druhou možnosťou je pripojenie externého signálu, ktorý je opäť cez napäťový sledovač U_{3A} prevádzaný priamo na výstup bloku. Poslednou variantou je použitie

interného generátora signálov, ktorého návrh bol popísaný v kapitole 6. Kompletná schéma zapojenia sa nachádza v prílohe 2.

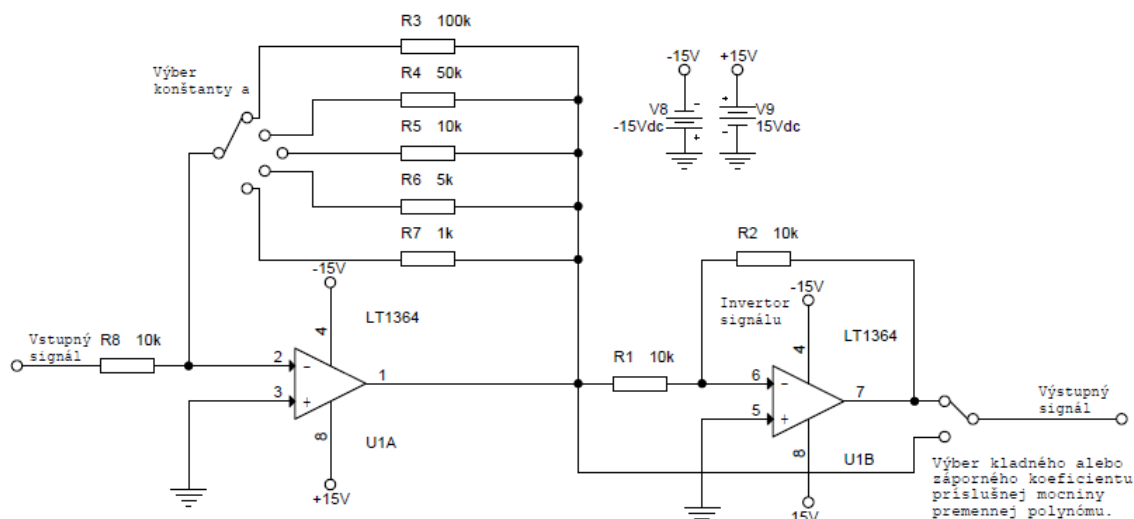
7.2 Blok polynomiálnej funkcie

Návrh samotného prevodníka polynomiálnej funkcie bol zrealizovaný už v kapitole 4. Táto časť sa však zameriava na vybrané funkcie vedúce k uľahčeniu nastavovania jednotlivých častí funkcie.

Požiadavkou na jednotlivé bloky prevodníka pracujúceho podľa matematickej funkcie:

$$f(x) = a_3 \times x^3 \pm a_2 \times x^2 \pm a_1 \times x \pm a_0, \quad (7.1)$$

bolo nastavovanie veľkostí konštánt a_3 až a_0 a pripočítavanie, resp. odpočítavanie častí funkcie. To v navrhovanom zapojení vykonávajú dva operačné zosilňovače typu LT1364 (Obr. 7.3).



Obr. 7.3 Nastavovanie veľkosti a výber záporného alebo kladného koeficientu.

Všeobecne je veľkosť konštanty a nastavovaná pomocou prepínača a paralelne zapojených rezistorov v spätnej väzbe operačného zosilňovača U_{1A} . Hodnoty jednotlivých odporov sú nastavené podľa vzťahu 2.4 tak, aby bol prenos nastavovaný v rozmedzí desiatnásobného zosilnenia až zoslabenia postupne v piatich krokoch. Takto upravený signál je buď privedený priamo na výstupný prepínač, alebo je invertovaný pomocou operačného zosilňovača U_{1B} , čím je docielené pripočítanie, resp. odpočítanie konkrétneho signálu vynásobeného koeficientom a . Operačný zosilňovač má nastavený odpor na invertujúcom vstupe a v jeho spätnej väzbe na rovnakú hodnotu, čím

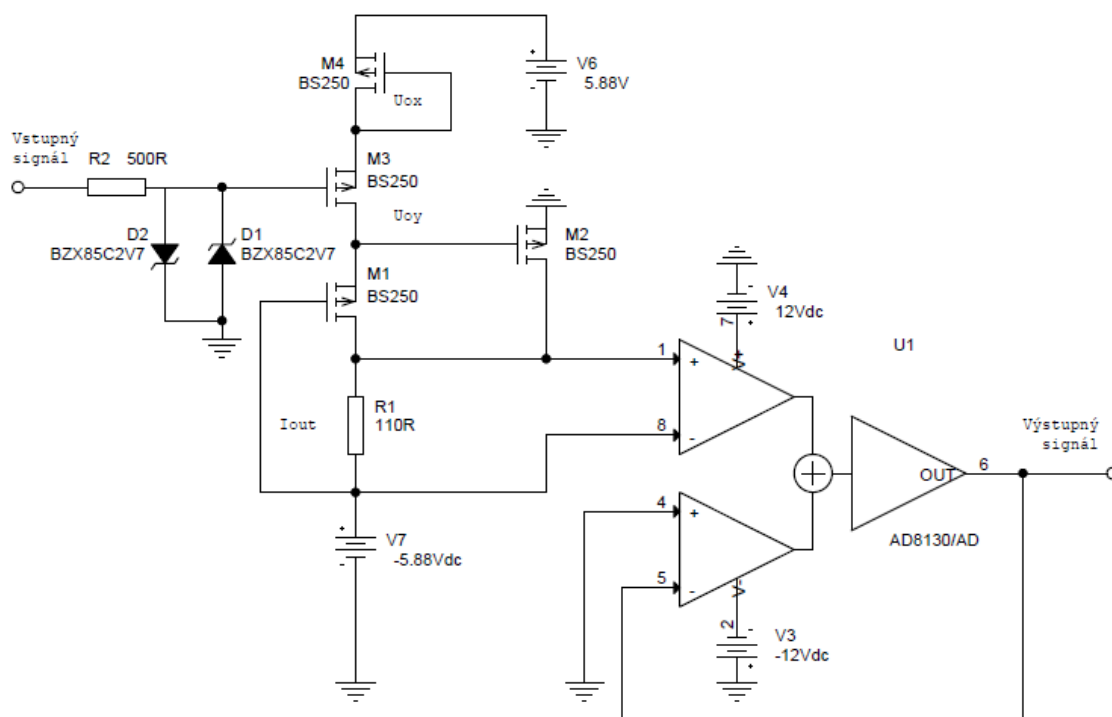
dosahuje napäťový prenos 1. Vstupy napájacích napätí sú ešte doplnkovo ošetrené pripojením blokovacích kondenzátorov voči zemi. Kompletná schéma zapojenia prevodníka polynomiálnej funkcie sa nachádza v prílohe 2.

7.3 Blok individuálnych funkcií

Návrh kvadratickej a inverznej kvadratickej funkcie, ktorým sa zaoberá kapitola 3 stavia na princípoch simulácií, kde sú hodnoty vstupného signálu brané z ideálnych generátorov napätia, resp. prúdu a výstupné veličiny sú odčítané priamo na určených súčiastkach. V reálnom spracovaní je však potrebné doplniť navrhnuté elementárne štruktúry o obvody zabezpečujúce ich správny chod.

7.3.1 Realizácia prevodníka kvadratickej funkcie

V prípade prevodníka kvadratickej funkcie je vstupný signál privádzaný na gate tranzistora M_3 (Obr. 7.4).



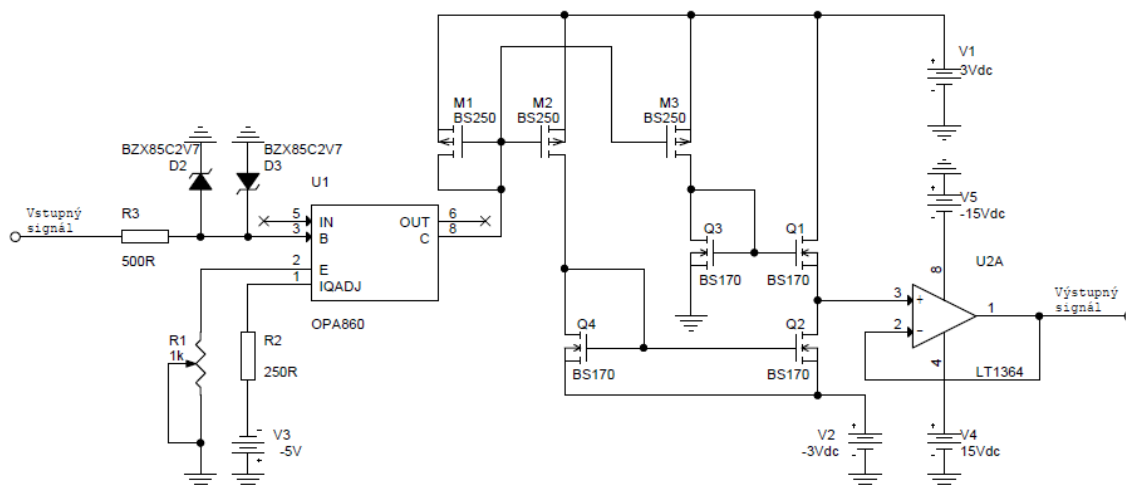
Obr. 7.4 Kompletná schéma zapojenia kvadratickej funkcie.

Signálový vstup obvodu je ochránený voči vyššiemu napätiu pomocou sério-paralelného zapojenia rezistora s nominálnou hodnotou 500 R a dvojice zenerových diód s typovým označením BZX85C2V7, pracujúcich pri Zenerovom napätí $U_Z = 2,7 \text{ V}$.

Odčítavanie napätia vznikajúceho prechodom výstupného prúdu cez odpor R_1 je riešené pomocou diferenciálneho zosilňovača AD8130 od spoločnosti Analog Devices. Ten v tomto zapojení funguje ako rozdielový zosilňovač, kde od konštantného napätia $-5,88\text{ V}$ zdroja V_1 odpočítava aktuálnu hodnotu úbytku napätia na rezistore R_1 . Záporná spätná väzba v obvode diferenciálneho zosilňovača funguje ako napäťový sledovač s prenosom 1. Využívané svorky diferenčného páru teda fungujú ako sledovač vstupného rozdielu napätí a symetrizačný člen súčasne [20].

7.3.2 Realizácia prevodníka inverznej kvadratickej funkcie

Obvod prevodníka inverznej kvadratickej funkcie bol navrhovaný a simulovaný s ideálnym prúdovým generátorom vstupného signálu. V praxi ho však bolo nutné nahradiť reálnym zdrojom prúdu riadeného napätím. Túto funkciu v Obr. 7.5 plní transkonduktančný zosilňovač OPA860.



Obr. 7.5 Kompletná schéma zapojenia inverznej kvadratickej funkcie.

Obvod OPA860 je všestranný monolitický obvod vytvorený pre širokopásmové aplikácie zahrňujúce vysokovýkonné RF a IF obvody. V neposlednom rade však môže byť použitý aj ako napätím riadený prúdový zdroj, približujúci sa svojimi parametrami k ideálnemu tranzistoru [21].

Vo vnútornom zapojení obvodu OPA860 je obsiahnutý tranzistor s troma vývodmi, konkrétne vysoko-impedančným vstupom (báza), nízko-impedančným vstupom alebo výstupom (emitor) a prúdovým výstupom (kolektor). Diamantový tranzistor, ktorý je obsahom obvodu OPA860 nevyžaduje pre svoj správny chod pracovné odpory na jeho kontaktoch a dokonca ani nastavenie pracovného bodu [21].

Vstup zapojenia je znova ochránený voči prepätiu pomocou sério-paralelného zapojenia odporu R_3 a dvoch zenerových diód D_2 a D_3 . Signál je privádzaný na bázu tranzistora obsiahnutého v obvode OPA860. Pomocou potenciometra R_1 je nastavovaná veľkosť odporu emitora tranzistora. Kolektor obvodu OPA860 dodáva do zvyšnej tranzistorovej štruktúry potrebný prúd. Odpor rezistora R_2 , pripojeného na záporný napäťový potenciál udáva veľkosť kludového prúdu pretekajúceho tranzistorom. Výstup tranzistorovej štruktúry je ošetrený proti zničeniu pomocou napäťového sledovača, vytvoreného z operačného zosilňovača LT1364.

7.4 Blok zdroja napätí

Predpokladom pre merací prípravok laboratórnej úlohy je, že každé pracovisko bude zabezpečené stabilizovaným symetrickým laboratórnym zdrojom. Aj z toho dôvodu bol blok zdroja napätí okresaný o časti ako transformátor alebo usmerňovač.

Jeho primárnou úlohou je upravovať vstupné napätie privádzané z laboratórneho zdroja na požadované napätia, použiteľné pre jednotlivé bloky prevodníkov. Teoretický návrh zapojenia je rozobraný v kapitole 5 a kompletná schéma obvodu je umiestnená v prílohe 2.

8 MERANIE ZÁKLADNÝCH PARAMETROV

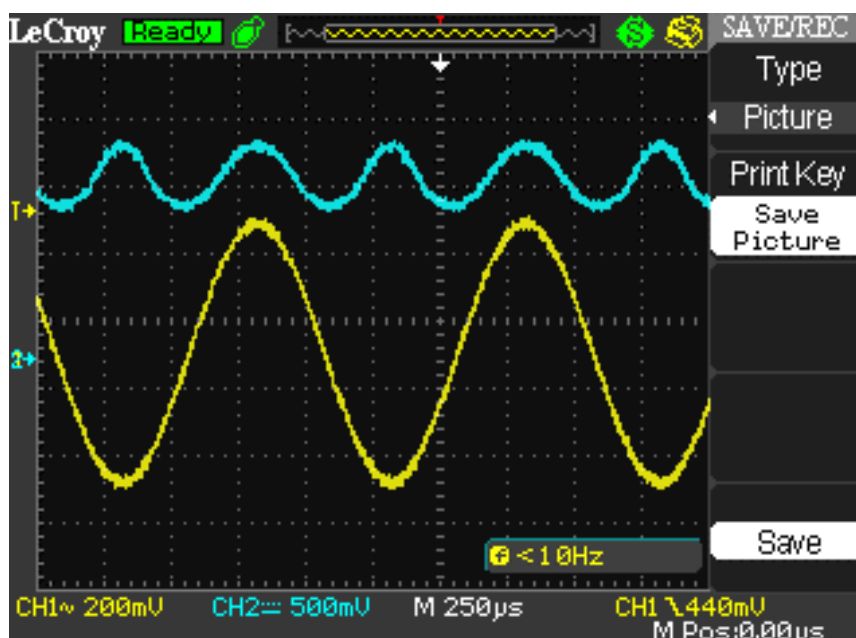
Po realizácii a oživení jednotlivých obvodov boli zmerané ich základné parametre. Ďalšie kapitoly sú rozdelené na samostatné merania a overenia vlastností bloku individuálnych funkcií a meranie vlastností bloku polynomiálnej funkcie.

8.1 Meranie bloku individuálnych funkcií

Jednotlivé obvody prevodníkov funkcií boli postupne podrobené sériám meraní. V nasledujúcej kapitole sú zhrnuté zmerané základné vlastnosti, vyjadrené pomocou grafov a tabuliek.

8.1.1 Meranie vlastností obvodu prevodníka kvadratickej funkcie

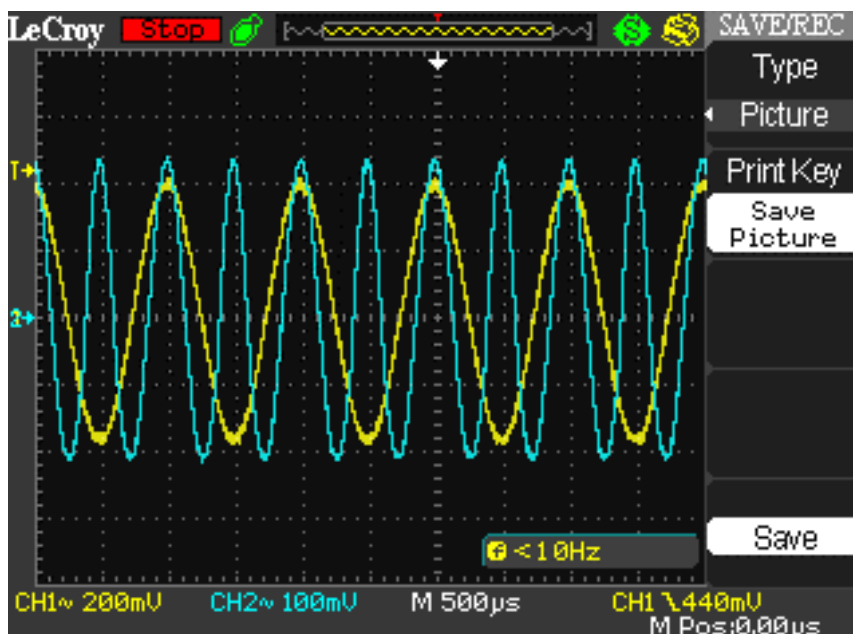
V prvej časti bol obvod podrobený časovej analýze, ktorá potvrdzovala funkčnosť daného zapojenia a správnosť priebehu zobrazeného výstupného signálu. Meranie prebiehalo so vstupným kmitočtom $f = 1$ kHz a amplitúdou vstupného signálu $U_{IN} = 400$ mV.



Obr. 8.1 Časová analýza prevodníka kvadratickej funkcie.

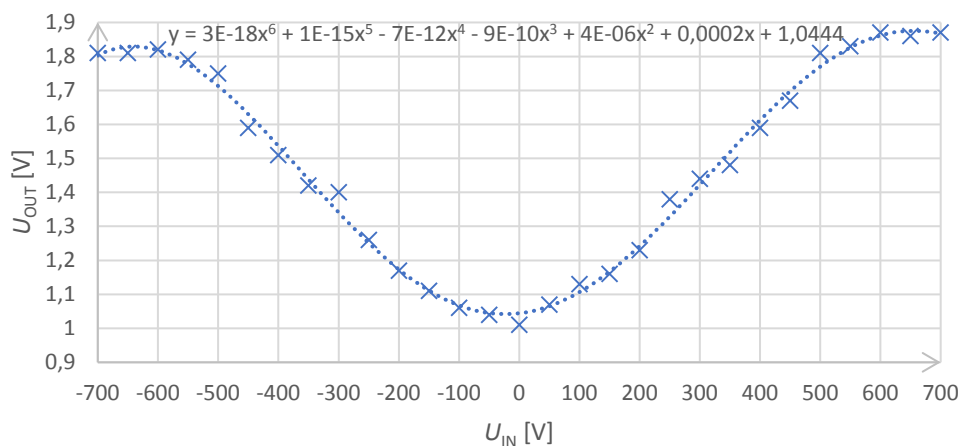
Offset výstupného signálu (modrý priebeh) je spôsobený úbytkom napätia na odpore R_1 , vytvoreného kľudovým prúdom tečúcim cez rezistor R_1 zapojenia prevodníka.

Po oddelení striedavej zložky AC od vstupného signálu osciloskopu bol zmeraný nasledujúci priebeh výstupného signálu v tvare druhej mocniny vstupného signálu (žltý priebeh), ktorý jasne preukazuje funkčnosť navrhovaného prevodníka.



Obr. 8.2 Časová analýza prevodníka kvadratickej funkcie pri zapnutom AC meraní.

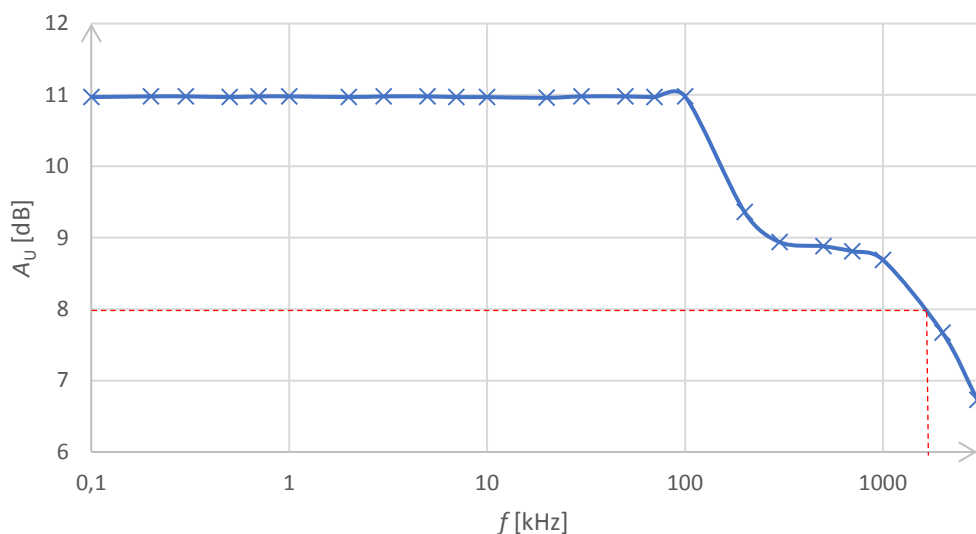
Následne bola na prevodníku zmeraná prevodná charakteristika s nastavovaním veľkosti vstupného napätia U_{IN} od -700 mV do 700 mV s krokom 50 mV a výsledky merania boli vynesené do grafu (Obr. 8.3).



Obr. 8.3 Prevodná charakteristika prevodníka kvadratickej funkcie.

Zmeraná charakteristika bola preložená polynomiálnou spojnicou trendu 6. rádu. Malé odchýlky bodov mohli byť spôsobené zavedením chyby merania. Zo zmeraného priebehu je viditeľné, že prevodník spoľahlivo pracuje v rozmedzí vstupného signálu ± 600 mV.

V poslednom rade bol prevodník podrobený meraniu závislosti výstupného signálu na veľkosti kmitočtu vstupného signálu. Vstupný signál bol nastavovaný s amplitúdou $U_{IN} = 500$ mV.

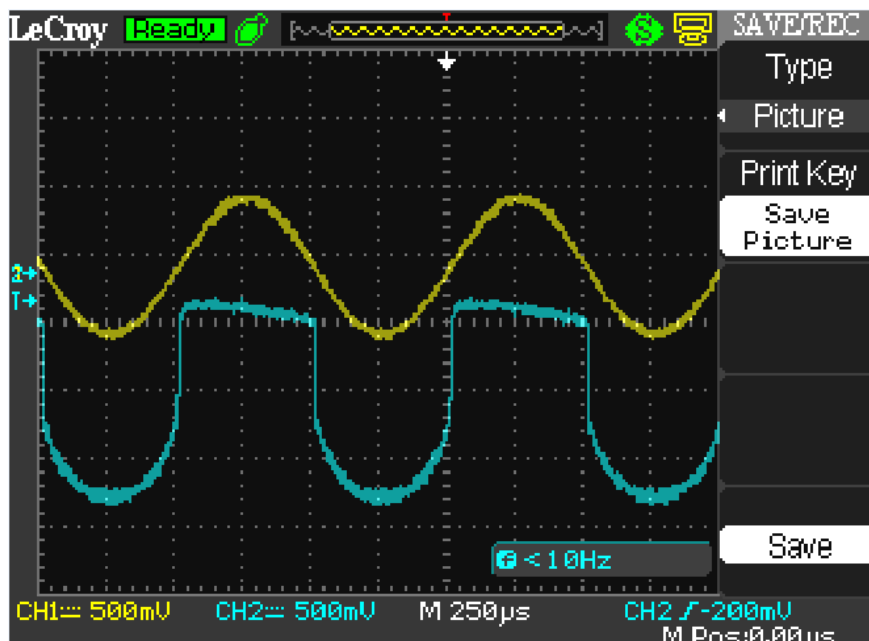


Obr. 8.4 Modulová kmitočtová charakteristika prevodníka kvadratickej funkcie.

Veľkosť poklesu napäťového prenosu A_U o hodnotu 3 dB nastáva až za hranicou vstupného signálu s frekvenciou viac ako 1 MHz, čo plne korešponduje s teoretickým návrhom a preukazuje funkčnosť obvodu v požadovanom rozmedzí do 100 kHz.

8.1.2 Meranie vlastností obvodu prevodníka inverznej kvadratickej funkcie

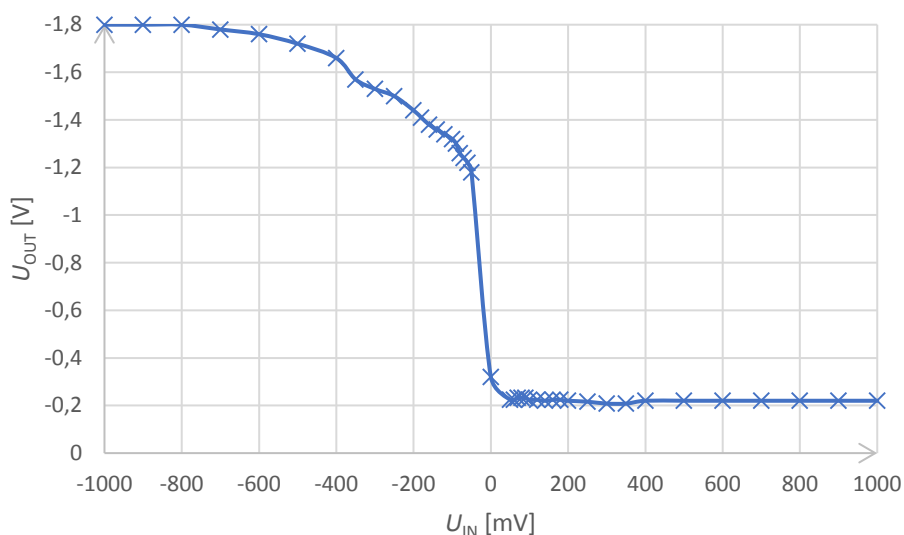
Na začiatku bol obvod podrobený DC časovej analýze s nastaveným vstupným kmitočtom $f = 1$ kHz a amplitúdou vstupného signálu $U_{IN} = 500$ mV. Priebeh výstupného signálu pre zadané parametre zobrazuje Obr. 8.5.



Obr. 8.5 Časová analýza prevodníka inverznej kvadratickej funkcie.

Z časovej analýzy je viditeľný výstupný priebeh modrej farby, ktorý poukazuje na správnosť funkcie prevodníka inverznej kvadratickej funkcie. Výstupný signál (modrý priebeh) svojím tvarom naozaj pripomína odmocninu vstupného signálu (žltý priebeh).

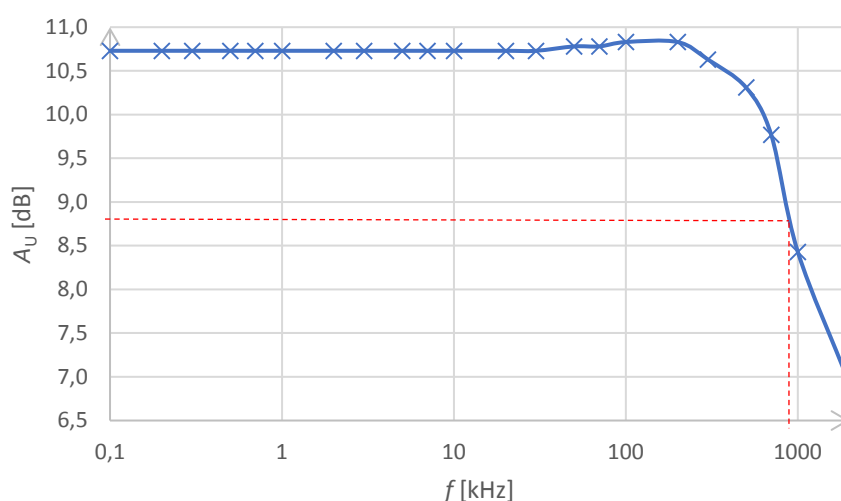
Obvod prevodníka bol ďalej podrobený meraniu prevodnej charakteristiky. Na vstupe prevodníka boli postupne nastavované hodnoty vstupného napätia U_{IN} od -1 V do 1 V (Obr. 8.6).



Obr. 8.6 Prevodná charakteristika prevodníka inverznej kvadratickej funkcie.

Z priebehu prevodnej charakteristiky je viditeľný prenos záporných zložiek vstupného signálu a potlačenie jeho kladných zložiek. Túto anomáliu vniesol do obvodu zaradený zdroj prúdu OPA860. V danom zapojení je voči vstupnému signálu transkonduktančného zosilňovača invertovaný jeho výstupný prúd, respektíve prúd tečúci medzi prvým prúdovým zrkadlom tranzistorov M_1, M_2 a diamantovým tranzistorom vo vnútornom obvode OPA860.

Posledným bodom merania obvodu inverznej kvadratickej funkcie bolo overenie jeho frekvenčnej závislosti vstupného signálu na napäťovom prenose. Meranie bolo vykonané pre vstupný signál s amplitúdou $U_{IN} = 500$ mV (Obr. 8.7).

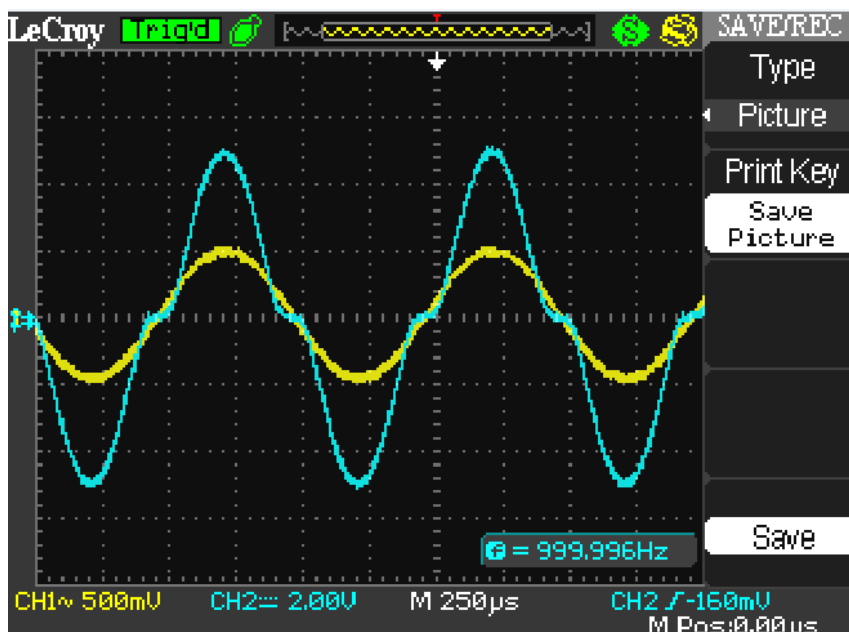


Obr. 8.7 Modulová kmitočtová charakteristika prevodníka inverznej kvadratickej funkcie.

Z modulovej kmitočtovej charakteristiky je viditeľná použiteľnosť prevodníka do vyšších frekvencií, blížiacich sa k 1 MHz, čím opäť spĺňa podmienku jeho funkčnosti do frekvencie 100 kHz.

8.1.3 Meranie vlastností prevodníka kubickej funkcie.

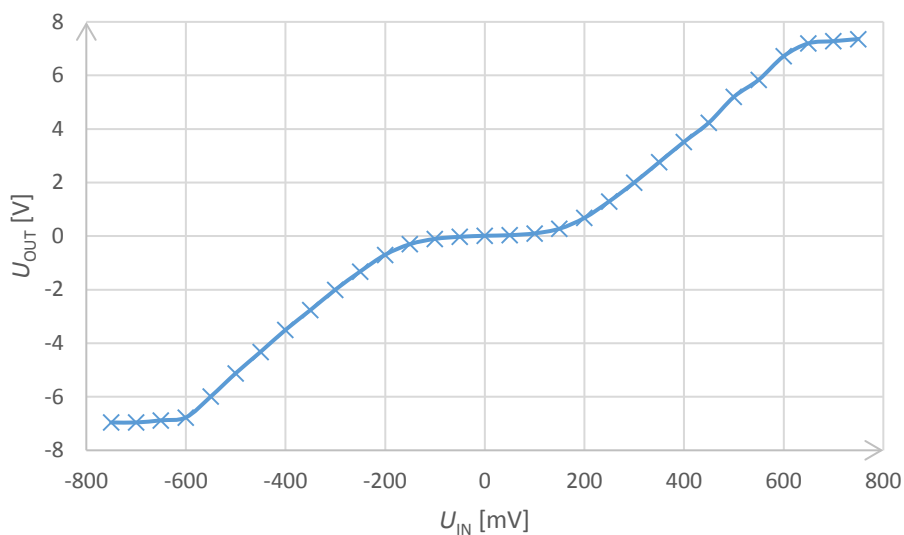
Pre overenie všetkých podstatných vlastností prevodníka kubickej funkcie boli znova zvolené rovnaké typy meraní ako pri predošlých obvodoch. V prvom rade bol obvod podrobený časovej analýze s nastavenou frekvenciou $f = 1$ kHz a amplitúdou vstupného signálu $U_{IN} = 500$ mV. Priebeh výstupného signálu obvodu je zobrazený na Obr. 8.8.



Obr. 8.8 Časová analýza prevodníka kubickej funkcie.

Z obrázka je opäť viditeľná správna funkčnosť návrhu obvodu, kedy výstupný signál svojím tvarom deklaruje očakávaný priebeh v tvare tretej mocniny vstupného sínusového signálu.

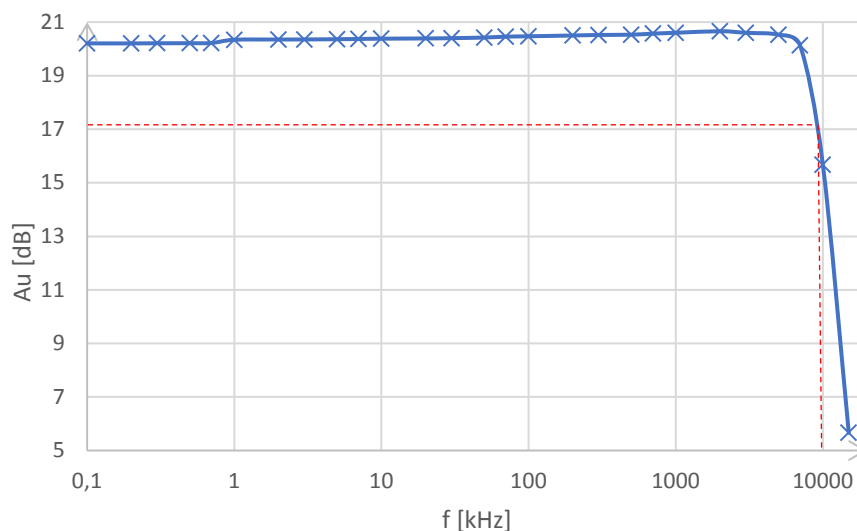
Obvod prevodníka tretej mocniny bol podrobený aj meraniu prevodnej a modulovej kmitočtovej charakteristiky pre potvrdenie jeho vlastností. Pre prevodnú charakteristiku bolo na vstupe prevodníka postupne nastavované vstupné napätie U_{IN} v rozmedzí -750 mV až 750 mV. Výslednú prevodnú závislosť zobrazuje Obr. 8.9.



Obr. 8.9 Prevodná charakteristika prevodníka kubickej funkcie.

Z prevodnej charakteristiky je viditeľné plné využitie prevodníka v rozmedzí vstupného napätia ± 600 mV, čím potvrdzuje svoju funkčnosť v danej oblasti.

Pre meranie modulovej kmitočtovej charakteristiky bol na vstup privedený signál s amplitúdou $U_{IN} = 500$ mV a frekvenciou v rozmedzí 100 Hz až 15 MHz (Obr. 8.10).



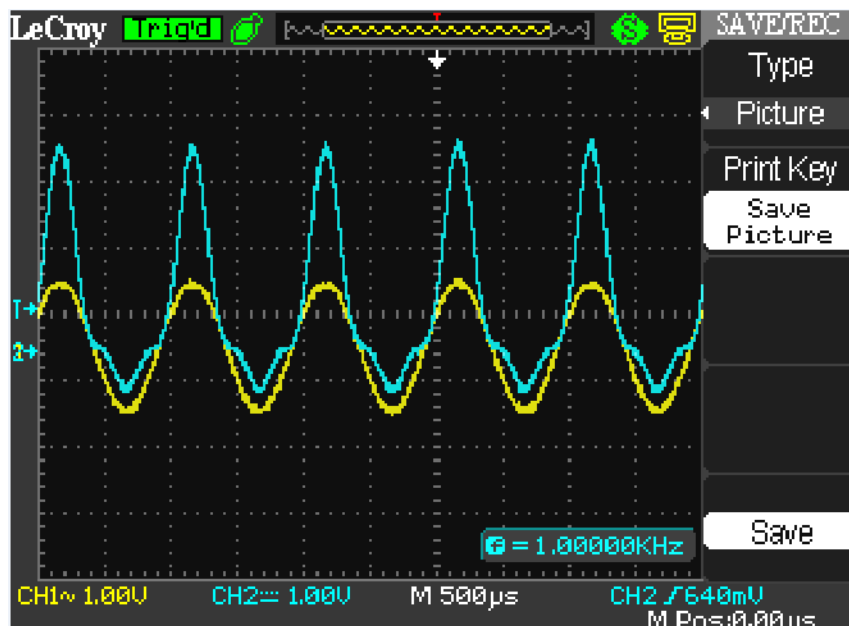
Obr. 8.10 Modulová kmitočtová charakteristika prevodníka kubickej funkcie.

Zobrazený graf modulovej kmitočtovej charakteristiky ukazuje, že pokles napät'ového prenosu A_U nastáva až na hranici frekvencie 10 MHz, čím obvod spĺňa predpoklady návrhu a samozrejme aj požadované parametre.

8.2 Meranie bloku polynomiálnej funkcie

Obvod polynomiálnej funkcie bol pre overenie jeho vlastností podrobený rovnakým meraniam ako predošlé obvody. Koeficienty a_3 až a_1 jednotlivých častí polynomiálnej rovnice, respektíve zosilnenia častí funkcií boli nastavené na hodnotu 1 a všetky v súčtovom tvare.

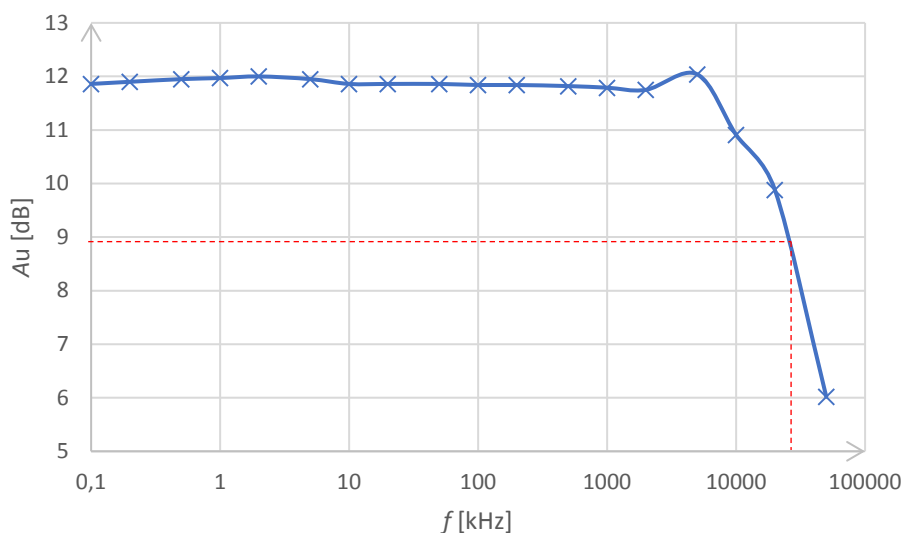
V prvom kroku bola na prevodníku vykonaná časová analýza výstupného signálu voči amplitúde vstupného signálu $U_{IN} = 1$ V pri frekvencii $f = 1$ kHz. Koeficient a_0 bol v tomto prípade nastavený na hodnotu 0. Výsledný priebeh výstupného signálu je zobrazený na Obr. 8.11.



Obr. 8.11 Časová analýza prevodníka polynomiálnej funkcie.

Z výstupného signálu (modrej farby) je viditeľný priebeh podľa polynomiálnej funkcie s nastavenými koeficientami a_3 až $a_1 = 1$ bez koeficientu a_0 , teda bez pridaného jednosmerného napätia. Veľkosť jeho maximálnej hodnoty je štvornásobkom vstupného signálu a priebeh plne korešponduje s očakávaným priebehom podľa simulácie.

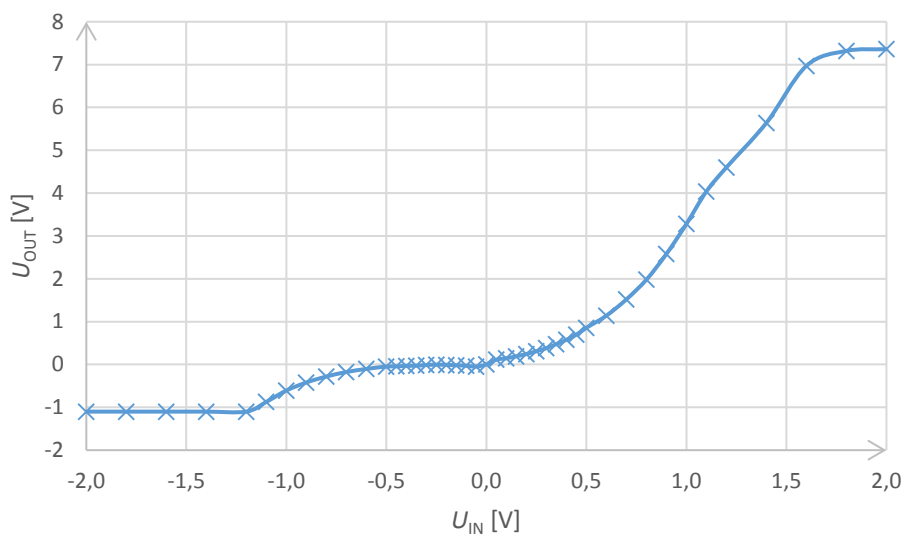
Následne bol prevodník podrobený meraniu modulovej kmitočtovej charakteristiky so vstupnou amplitúdou signálu $U_{IN} = 1$ V. Výsledná charakteristika je umiestnená v Obr. 8.12.



Obr. 8.12 Modulová kmitočtová charakteristika prevodníka polynomiálnej funkcie.

Z modulovej kmitočtovej charakteristiky je viditeľné využitie prevodníka polynomiálnej funkcie až do frekvencií za hranicou 10 MHz, čím niekoľkonásobne prevyšuje požiadavky, ktoré naň budú kladené v rámci laboratórnych cvičení.

Posledným meraním prevodníka bolo určenie prevodnej charakteristiky. Všetky koeficienty a_3 až a_1 jednotlivých častí polynomiálnej rovnice boli nastavené na hodnotu 1 a v súčtovom tvare, koeficient a_0 bol nastavený na 0. Prevodná charakteristika takejto konfigurácie rovnice sa nachádza na Obr. 8.13.



Obr. 8.13 Prevodná charakteristika prevodníka polynomiálnej funkcie.

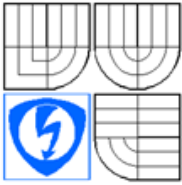
Z prevodnej charakteristiky polynomiálnej rovnice je viditeľné spoľahlivé použitie obvodu v tomto zapojení v rozmedzí napätí vstupných signálov U_{IN} od $-1,2$ V do $1,5$ V.

8.3 Zoznam meracích prístrojov

Pre overenie vlastností jednotlivých prevodníkov, zmeranie požadovaných parametrov a pre vytvorenie obrázkov a grafov, deklarujúcich správnu funkciu jednotlivých obvodov, boli použité tieto prístroje:

1. Osciloskop LeCroy waveAce 101, 40 MHz, 500 Ms/s
2. Generátor signálov Tektronix AFG310 – Arbitrary function generátor
3. Laboratórny symetrický zdroj Siglent SPD3303C

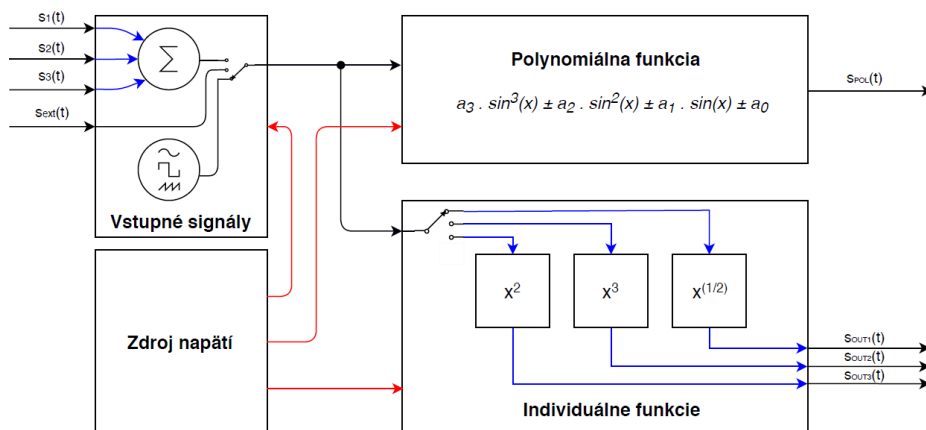
9 LABORATÓRNA ÚLOHA – PROTOKOL

 VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ		Predmet	
		Meno	
		Ročník	Študijná skupina
		Spolupracoval	Merané dňa
Kontroloval		Hodnotenie	Dňa
Číslo úlohy	Názov úlohy		

Teoretický úvod:

Analógové funkčné prevodníky sú dvojbrány s nelineárnou prevodnou charakteristikou, ktoré prevádzajú vstupný signál na výstupný podľa odpovedajúceho druhu zvolenej funkcie. K účelom merania samotnej laboratórnej úlohy bol skonštruovaný merací prípravok vykonávajúci základné matematické funkcie, konkrétne kvadratickú funkciu $f(t) = x^2$, kubickú funkciu $f(t) = x^3$, inverznú kvadratickú funkciu $f(t) = x^{1/2}$ a polynomiálnu funkciu $f(t) = a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0$. Jednotlivé bloky prevodníkov, zostavené výhradne z diskretných voľne dostupných súčiastok, prevádzajú okamžité hodnoty signálu v čase t podľa zvolenej funkcie.

Merací prípravok je rozdelený na štyri základné časti tak, ako ukazuje bloková schéma (Obrázok 1). Prvá časť zabezpečuje vstupné signály pre jednotlivé prevodníky. Tu nastáva možnosť voľby vnútorného generátora obsiahnutého vo vnútri meracieho prípravku, prípadne externého generátora z vybavenia laboratória. Zabudovaný generátor ponúka možnosti výberu sínusového, trojuholníkového alebo obdĺžnikového signálu. Priamo na ovládacom paneli sa nastavuje veľkosť frekvencie, amplitúdy a offsetu, či prípadne veľkosť striedy. Pomocou dvojpolohového prepínača je možné si zvoliť, ku ktorým funkciám má byť vstupný signál privedený.



Obrázok 1 Bloková schéma zapojenia meracieho zariadenia.

Druhou časťou prípravku je obvod individuálnych funkcií obsahujúci funkcie x^2 , x^3 a $x^{1/2}$, ktoré sú zvolené pomocou prepínača na ovládacom paneli. Prevodník kvadratickej funkcie je založený na princípe P-MOS tranzistorov BS250 pracujúcich v oblasti saturácie. Zmena napätia vstupného signálu vyvoláva druhú mocninu prúdu pretekajúceho odporom R_1 (Obrázok 2). Výstupný signál je postavený na princípe drainového prúdu I_d pretekajúceho obvodom. Napätia vznikajúce medzi tranzistormi M_1 , M_3 a M_4 nastavujú parametre vodivých kanálov tranzistorov M_2 a M_4 . Zároveň sa prúdy tranzistorov I_{D1} , I_{D3} a I_{D4} rovnajú. Výstupný prúd I_{OUT} je potom rovný:

$$I_{OUT} = I_{D2} + I_{D3} \cdot [A] \quad (1)$$

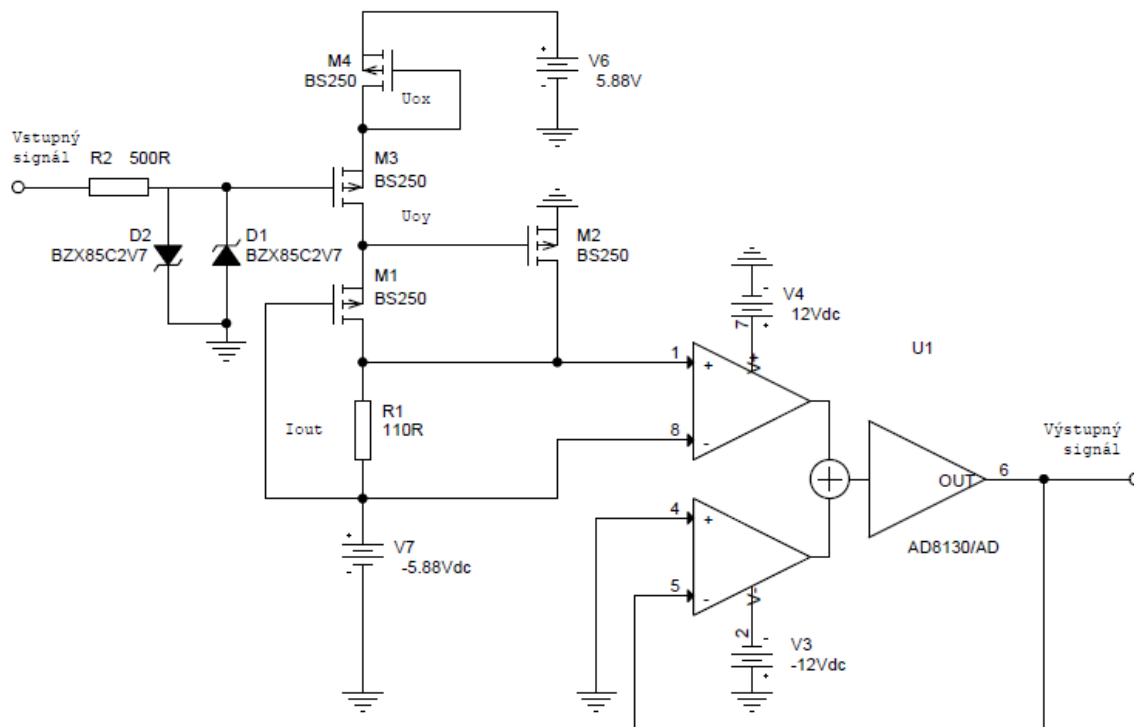
Vyjadrením zo základnej rovnice MOSFET tranzistora pracujúceho v saturácii, doplneného napätiami vznikajúcimi medzi tranzistormi M_1 , M_3 a M_4 , sa výstupný prúd vypočíta podľa vzťahu:

$$I_{OUT} = K \left\{ \left[\frac{U_{IN}}{2} - \left(\frac{U_{V2}}{2} + U_{TH} \right) \right]^2 + \left[-\frac{U_{IN}}{2} - \left(\frac{U_{V2}}{2} + U_{TH} \right) \right]^2 \right\}, [A] \quad (2)$$

za podmienky, že platí:

$$\frac{U_{V2}}{2} = -U_{TH}, [V] \quad (3)$$

kde K predstavuje transkonduktančný parameter a U_{TH} predstavuje prahové napätie. Odčítavanie napätia, vznikajúceho prechodom výstupného prúdu cez odpor R_1 , je riešené pomocou diferenciálneho zosilňovača AD8130. Ten v tomto zapojení funguje ako rozdielový zosilňovač, kde od konštantného napätia -5 V zdroja V_1 odpočítava aktuálnu hodnotu úbytku napätia na rezistore R_1 .

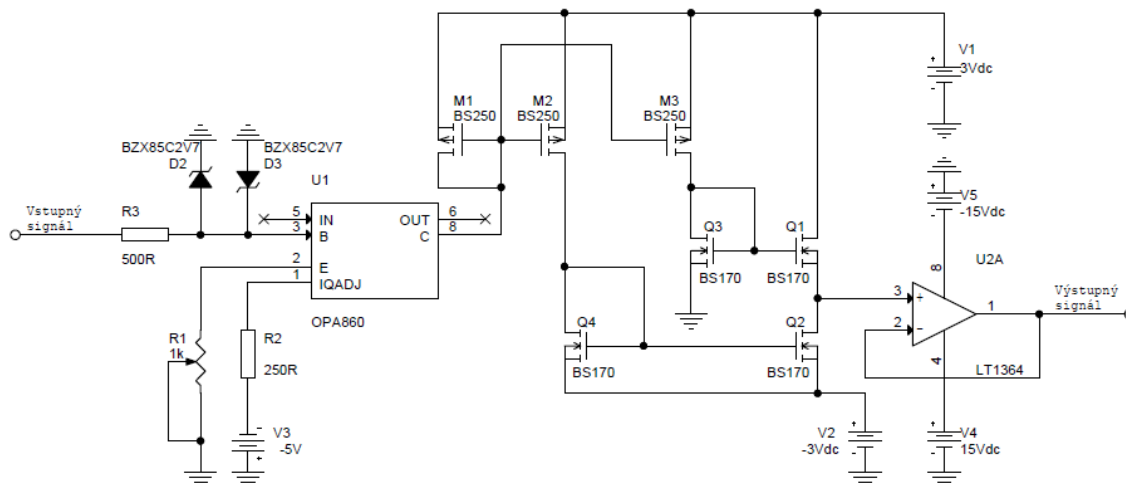


Obrázok 2 Schéma zapojenia prevodníka kvadratickej funkcie.

Vnútna štruktúra prevodníka inverznej kvadratickej funkcie zahŕňa kombináciu N-MOS a P-MOS tranzistorov pracujúcich opäť v saturačných režimoch. Zapojenie simuluje funkciu druhej odmocniny vstupného signálu prevádzaného na výstup prevodníka. Výstupný signál je riadený dvoma prúdovými zrkadlami, respektíve tranzistormi Q₃ a Q₄, ktoré určujú napätia na bázach tranzistorov Q₁ a Q₂ (Obrázok 3).

Veľkosť pracovných bodov tranzistorov Q₁ a Q₃ je nastavovaná tranzistorom M₃, ktorý sa v obvode správa ako napätím ovládaný rezistor a jeho pracovný bod priamo nastavuje napätie na prúdovom zrkadle tranzistorov M₁ a M₂. Napätie prítomné v prúdovom zrkadle zloženom z tranzistorov M₁ a M₂ typu P-MOS nastavuje pracovný bod tranzistorov Q₂ a Q₄, zapojených znova ako prúdové zrkadlo.

Ako zdroj vstupného prúdu pre tranzistorovú štruktúru bol použitý obvod OPA860, čo je transkonduktančný zosilňovač obsahujúci tranzistor vnútri svojej štruktúry. Na bázu tranzistora je privádzaný vstupný signál a z jeho drainu zase odoberaný vstupný prúd pre obvod prevodníka. Konkrétne v tomto zapojení sa správa ako napätím riadený zdroj prúdu.



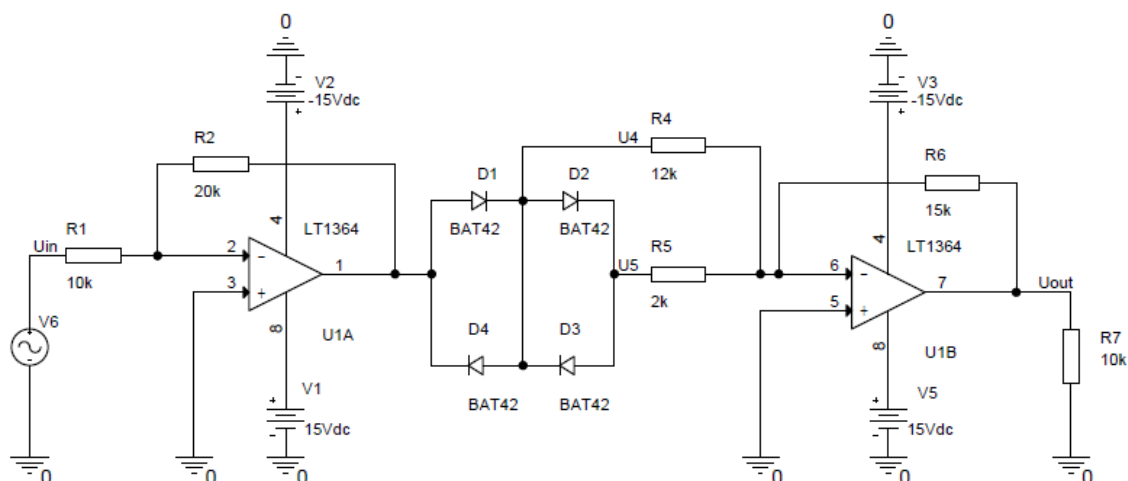
Obrázok 3 Schéma zapojenia prevodníka inverznej kvadratickej funkcie.

Výsledný vzťah pre výstupné napätie v tomto prípade bude:

$$U_{OUT} = \sqrt{\frac{I_{IN}}{K}} \cdot [V] \quad (4)$$

Posledným prevodníkom tohto bloku je prevodník kubickej funkcie, ktorý pomocou zapojenia operačných zosilňovačov LT1364 a diód BAT42 simuluje prevod vstupného signálu na obraz jeho tretej mocniny na výstupe.

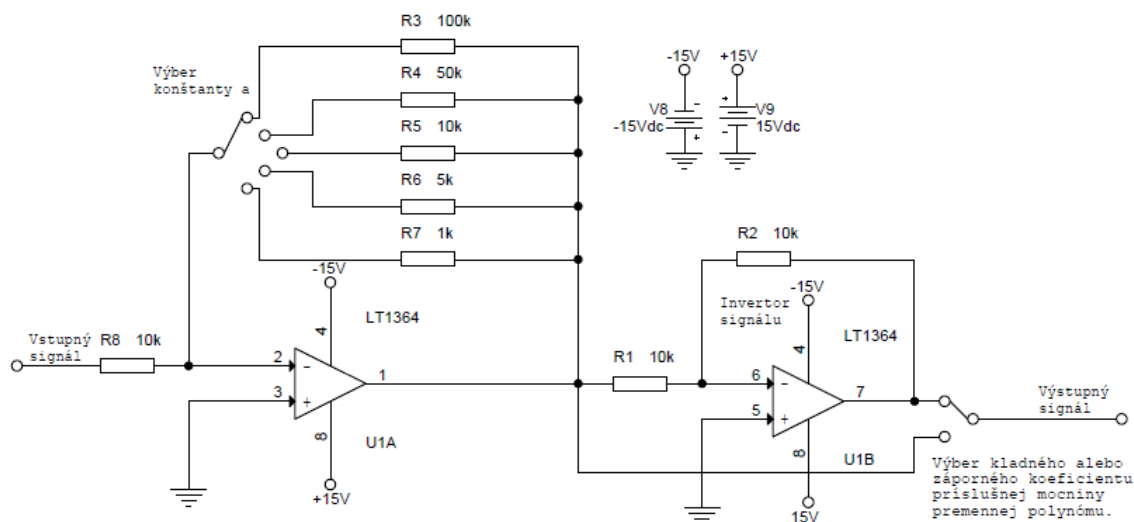
Signál privádzaný na vstup prevodníka je zosilnený pomocou invertujúceho OZ a následne prevedený sériou diód, pričom na každej z nich vzniká určitý úbytok napätia. Jednotlivé úbytky sú sčítavané do jedného signálu pomocou súčtového OZ na výstupe obvodu (Obrázok 4).



Tretím blokom meracieho prípravku je prevodník polynomiálnej funkcie. Zapojenie je vytvorené pomocou analógových násobičiek a operačných zosilňovačov, ktoré prevádzajú vstupný signál podľa funkcie $f(t) = a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0$ na výstup obvodu. Princíp vnútorného zapojenia naznačuje bloková schéma (Obrázok 5).

Principiálne je vstupný signál vzájomne násobený na vstupoch prvej násobičky, pričom na jej výstupe vzniká signál druhej mocniny (x^2). Vynásobením vzniknutého signálu s jeho pôvodnou verziou v druhej analógovej násobičke sa vytvorí na jej výstupe obraz tretej mocniny (x^3). Výstupné signály tvoria základ polynomiálnej rovnice, ktorú je ešte potrebné doplniť konštantami násobiacimi jednotlivé časti funkcie, prípadne ich sčítavanie alebo odčítavanie. To je zabezpečené pomocou dvojice operačných zosilňovačov (Obrázok 6).

Prvý OZ zmenou odporu v jeho spätnej väzbe mení veľkosť zosilnenia, čím v podstate nastavuje veľkosť koeficientu a rovnice v rozmedzí 0,1; 0,5; 1; 5 a 10. Nastavenie veľkosti jednotlivých koeficientov prebieha pomocou rotačných prepínačov, umiestnených na ovládacom paneli prípravku, rovnako ako aj funkcia súčtu alebo rozdielu častí polynomiálnej funkcie, ktorú zabezpečujú dvojpolohové prepínače prípravku. Vo vnútornom zapojení sa pomocou nich do vetvy výstupného signálu zaraďuje invertujúci OZ, ako ukazuje schéma zapojenia.



Obrázok 6 Nastavovanie znamienok a koeficientov funkcie polynomiálneho prevodníka.

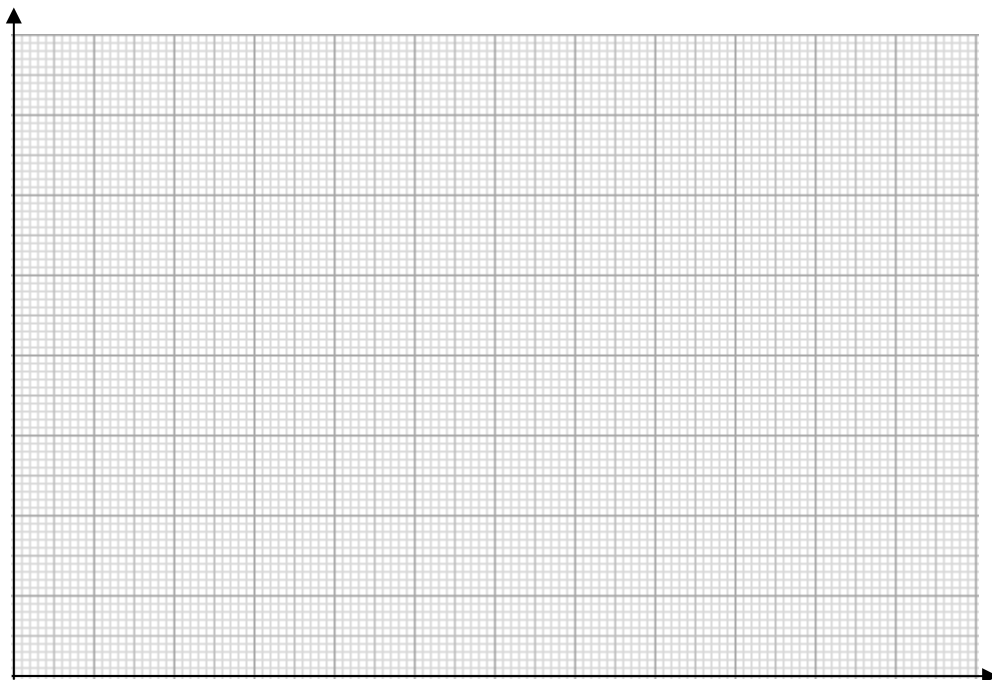
Posledným blokom meracieho zariadenia je napájací zdroj. Pre správnu funkciu obvodov musí byť k napájacej časti pripojený stabilizovaný laboratórny symetrický zdroj s nastaveným napätím v rozmedzí 13 ÷ 15 V. Vnútorná štruktúra obvodu zabezpečuje prívod napätí pre napájanie jednotlivých častí prevodníkov aj pre správne nastavenie pracovných bodov tranzistorov, ktoré boli už vopred odladené.

Zadanie:

1. Zoznámte sa s meracím prípravkom a jeho funkciami, ktoré vykonáva.
2. V rámci domácej teoretickej prípravy považujte o princípoch platiacich v jednotlivých prevodníkoch meracieho zariadenia. Pokúste sa odhadnúť tvary priebehov výstupných signálov, ktoré očakávate ako výstup merania.
3. Skontrolujte správnosť zapojenia meracieho pracoviska a nastavte základné parametre merania.
4. V prvej fáze začnite meraním bloku individuálnych funkcií. Spracujte a vykreslite signály jednotlivých prevodníkov funkcií. Zhotovte prevodnú charakteristiku prevodníkov a pokúste sa odhadnúť mieru maximálnych kmitočtov, do ktorých sú prevodníky použiteľné. Vyskúšajte si pripojenie aj iných druhov signálu (trojuholník, obdĺžnik) a ich vplyv na prevod signálu. Pozorujte zhodu alebo rozdiely voči vašim očakávaným výsledkom.
5. V druhej fáze pokračujte pripojením bloku polynomiálnej funkcie. Vyskúšajte si viacero kombinácií a vyneste do spoločného grafu ich priebehy. Znova si vyskúšajte aj pripojenie iných druhov signálu (trojuholník, obdĺžnik) a ich vplyv na prevod signálu. Rozhodnite o zhode alebo rozdiely oproti vašim očakávaným výsledkom.
6. Spracujte meranie do formy protokolu a s vlastným záverom zhrňujúcim vaše poznatky z merania odovzdajte na hodnotenie.

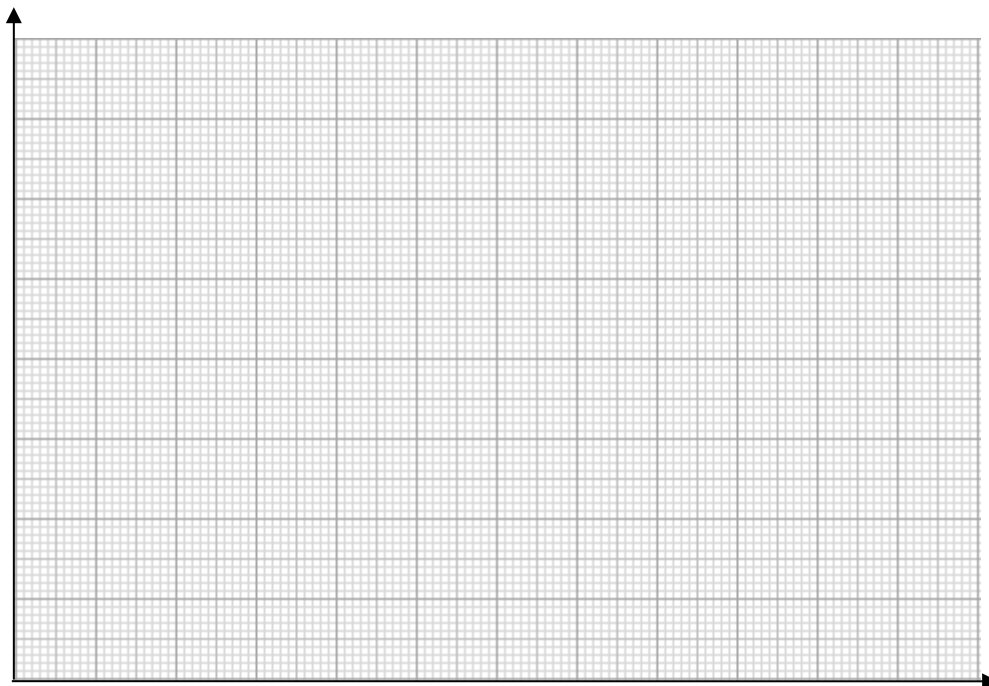
Domáca príprava:

V rámci domácej prípravy sa zoznámte s meracím zariadením, zapojením jednotlivých prevodníkov, spôsobe nastavovania parametrov ich funkcií a vnútornou štruktúrou, ktorá vykonáva požadované prevody. Do grafu č. 1 a 2 vykreslite vami očakávané výsledky výstupných priebehov z jednotlivých prevodníkov, primárne pre vstupný signál v tvare sínusu. Nezapudnite označiť osy.



Graf 1 Očakávané priebehy výstupných signálov jednotlivých prevodníkov.

Očakávaný výstupný signál polynomiálnej rovnice koncipujte pre funkciu s nastavenými koeficientami a rovnými 1, výlučne v súčtovom tvare.



Graf 2 Očakávaný priebeh výstupného signálu polynomiálnej rovnice.

Pokúste sa spočítať predpokladaný prúd prechádzajúci odporom R_1 , ak viete, že napätie nastavujúce pracovné body je $U_V = \pm 5 \text{ V}$, parameter $K = 150 \cdot 10^{-3}$ a vstupné napätie $U_{IN} = 500 \cdot 10^{-3} \text{ V}$.

Poznámky k meraniu:

Add. 4.:

K svorkám napájacieho zdroja pripojte napájacie napätie z laboratórneho zdroja a nastavte na ňom symetrické napätie v rozmedzí $13 \div 15$ V. Sondu osciloskopu pripojenú ku kanálu 1 pripojte k svorkám meracieho prípravku, označeného Gen. OUT. Na generátore signálov nastavte výstupný sínusový priebeh s frekvenciou $f = 1$ kHz a amplitúdou $U_{IN} = 500$ mV. Na prípravku v sekcii generátora nastavte prepínač do polohy „To individual functions“ a v sekcii Individual functions prepnite rotačný prepínač do polohy X^2 . Na výstupných svorkách sledujte priebeh výstupného signálu voči vstupnému. Rovnakým spôsobom si overte všetky varianty prevodníkov v tejto sekcii a do vypracovania prekreslite vynesené priebehy. Vyskúšajte si vplyv prevodníka aj na iné priebehy signálu z generátora.

Následne nastavte amplitúdu generátora na minimálnu hodnotu a postupne ju po určitých úsekoch zvyšujte. Z výstupného signálu na osciloskope odčítajte veľkosti kladných aj záporných amplitúd. Zmerané hodnoty vynesť do tabuľky a vytvorte prevodné charakteristiky prevodníkov.

K záveru bodu č. 4 sa pokúste odhadnúť kmitočtovú závislosť jednotlivých prevodníkov. Postupne zvyšujte kmitočet generátora, kým nedôjde k skresleniu výstupného signálu. Odčítajte veľkosť frekvencie a zapíšte do protokolu.

Add. 5.:

Prepnite prepínač v sekcii generátora do polohy „To Polynom function“ a pripojte sondu druhého kanálu osciloskopu k svorkám Poly. OUT. Nastavte všetky koeficienty polynomiálnej funkcie pomocou rotačných prepínačov do polohy 1 a na osciloskope sledujte priebeh výstupného signálu. Do prichystaných grafov vynesť priebeh pre funkciu s nastavenými koeficientami a rovnými 1, výlučne v súčtovom tvare. V rámci záveru výsledný priebeh porovnajte s vami očakávaným výsledkom. Do druhého grafu vynesť vami ľubovoľne nastavený priebeh funkcie. Vyskúšajte si vplyv prevodníka aj na iné priebehy signálu z generátora.

Pouvažujte, akým spôsobom prevodník polynomiálnej funkcie funguje a ako sa menia priebehy výstupného signálu pre ľubovoľne nastavené jednotlivé časti polynomiálnej funkcie.

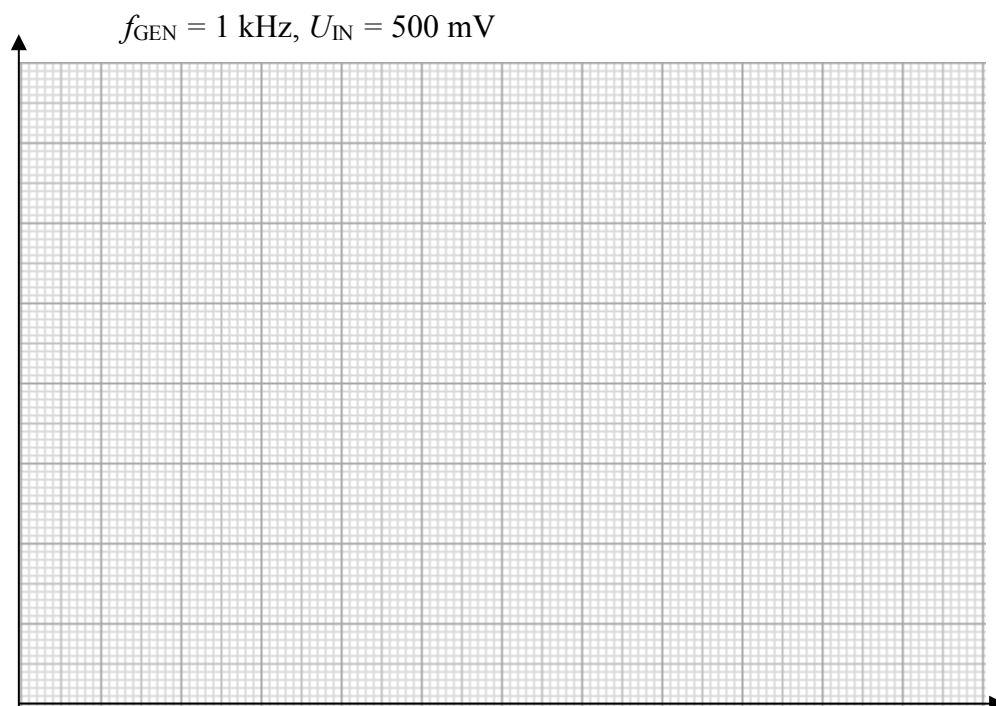
Ku koncu bodu č. 5 sa znova pokúste odhadnúť kmitočtovú závislosť prevodníka.

Add. 6.:

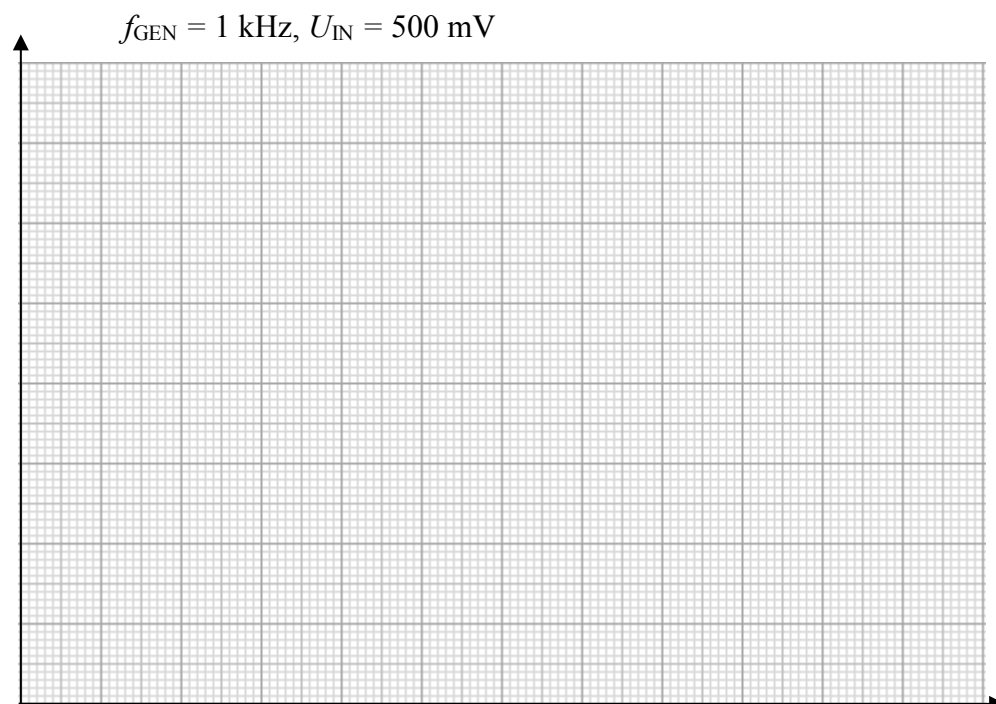
V závere zhodnoťte poznatky, ktoré ste počas merania nadobudli. Stručne opíšte rozdiely medzi priebehmi, ktoré ste očakávali a priebehmi, ktoré ste sledovali na výstupoch jednotlivých prevodníkov. Zhodnoťte jednotlivé vykreslené grafy a prevodné charakteristiky. Prípadné nezrovnalosti konzultujte s vyučujúcim. Nezabudnite popísať osy grafov aj s jednotkami.

Vypracovanie:

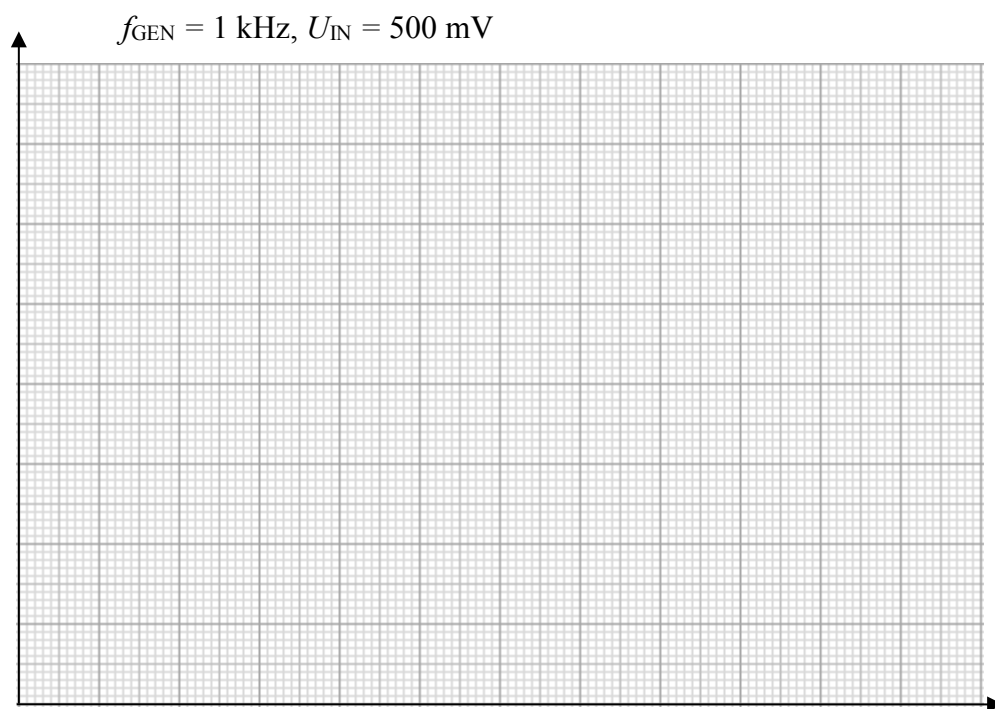
Úloha č. 4:



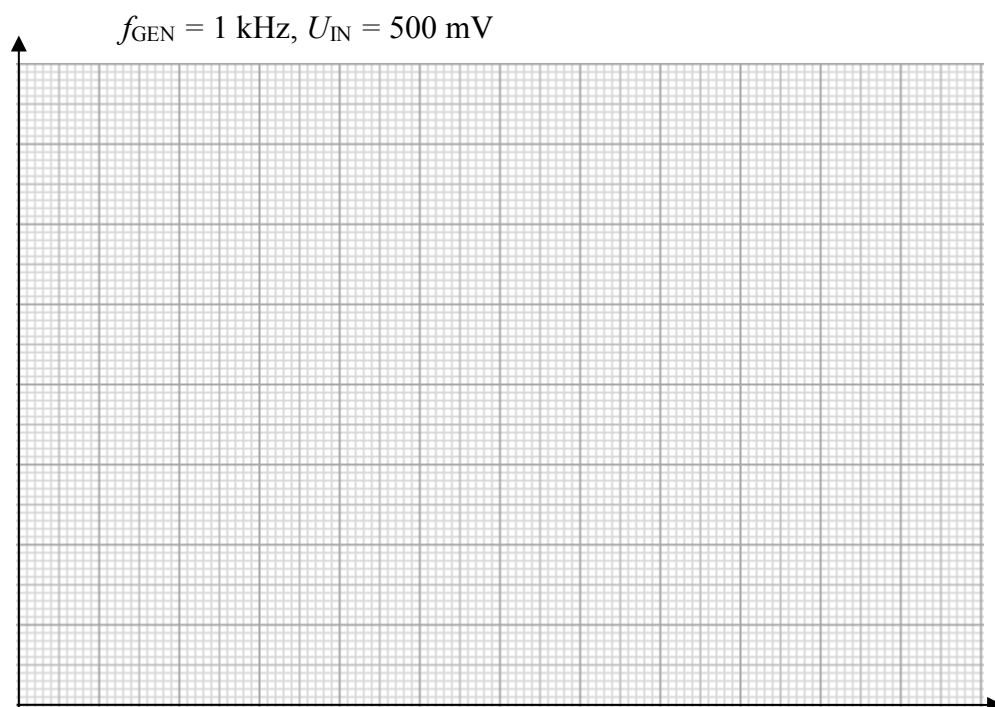
Graf 3 Priebeh výstupného signálu prevodníka kvadratickej funkcie.



Graf 4 Priebeh výstupného signálu prevodníka kubickej funkcie.



Graf 5 Priebek výstupného signálu prevodníka inverznej kvadratickej funkcie.

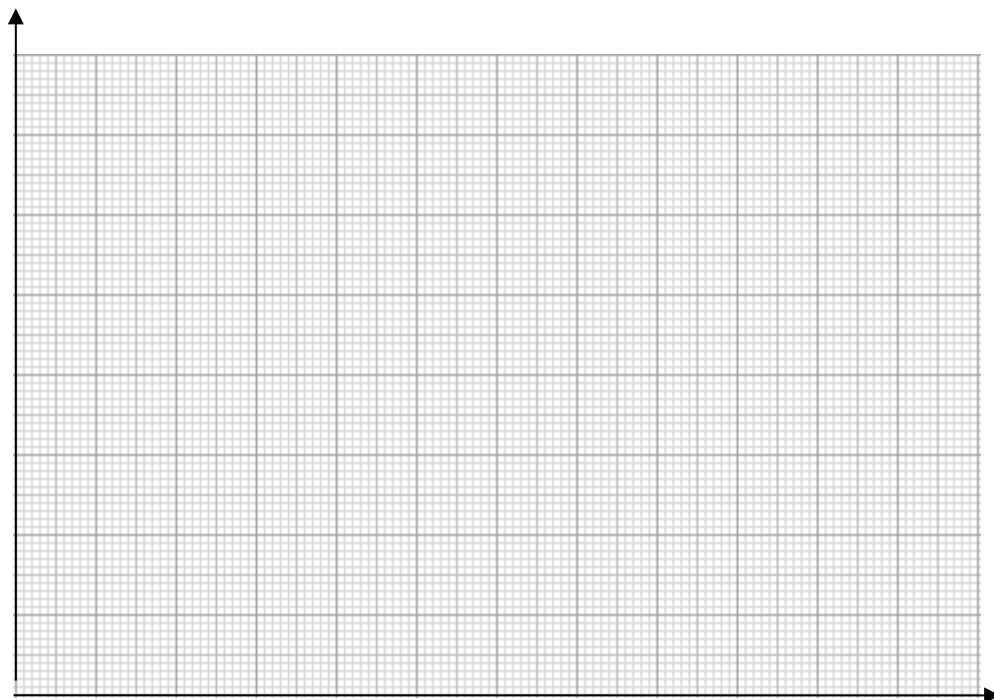


Graf 6 Ľubovoľný priebeh výstupného signálu prevodníka.

Prevodná charakteristika obvodu kvadratickej funkcie					
$f = 1 \text{ kHz}$					
$U_{IN} \text{ [mV]}$	$U_{OUTmin} \text{ [mV]}$	$U_{OUTmax} \text{ [mV]}$	$U_{IN} \text{ [mV]}$	$U_{OUTmin} \text{ [mV]}$	$U_{OUTmax} \text{ [mV]}$
50			400		
100			450		
150			500		
200			550		
250			600		
300			650		
350			700		

Prevodná charakteristika obvodu kubickej funkcie					
$f = 1 \text{ kHz}$					
$U_{IN} \text{ [mV]}$	$U_{OUTmin} \text{ [mV]}$	$U_{OUTmax} \text{ [mV]}$	$U_{IN} \text{ [mV]}$	$U_{OUTmin} \text{ [mV]}$	$U_{OUTmax} \text{ [mV]}$
50			400		
100			450		
150			500		
200			550		
250			600		
300			650		
350			700		

Prevodná charakteristika obvodu inverznej kvadratickej funkcie					
$f = 1 \text{ kHz}$					
$U_{IN} \text{ [mV]}$	$U_{OUTmin} \text{ [mV]}$	$U_{OUTmax} \text{ [mV]}$	$U_{IN} \text{ [mV]}$	$U_{OUTmin} \text{ [mV]}$	$U_{OUTmax} \text{ [mV]}$
50			400		
100			450		
150			500		
200			550		
250			600		
300			650		
350			700		



Graf 7 Prevodné charakteristiky výstupných signálov prevodníkov funkcií

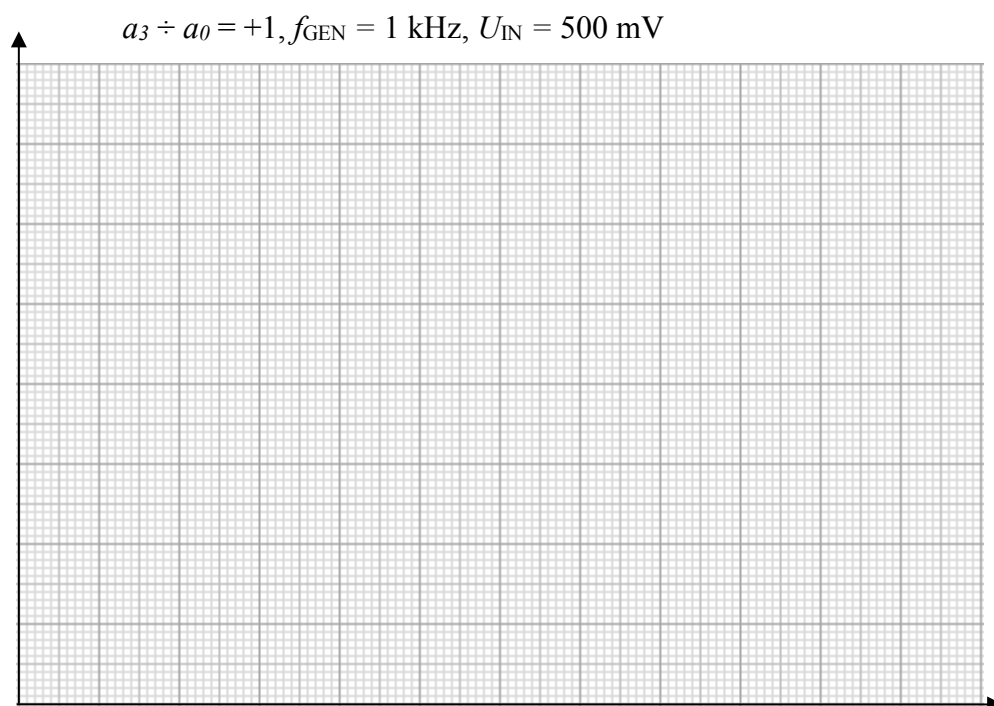
Kmitočtové závislosti jednotlivých prevodníkov:

Prevodník kvadratickej funkcie: $f_{\text{MAX}} = \dots\dots\dots$

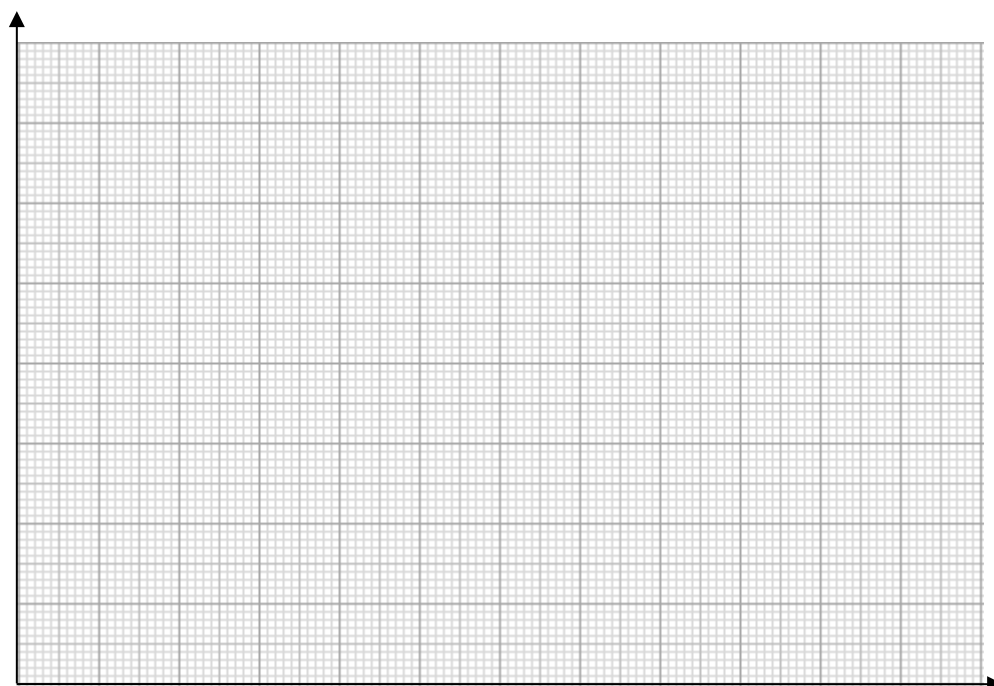
Prevodník kubickej funkcie: $f_{\text{MAX}} = \dots\dots\dots$

Prevodník inverznej kvadratickej funkcie: $f_{\text{MAX}} = \dots\dots\dots$

Úloha č. 5:



Graf 8 Priebeh výstupného signálu prevodníka polynomiálnej funkcie.



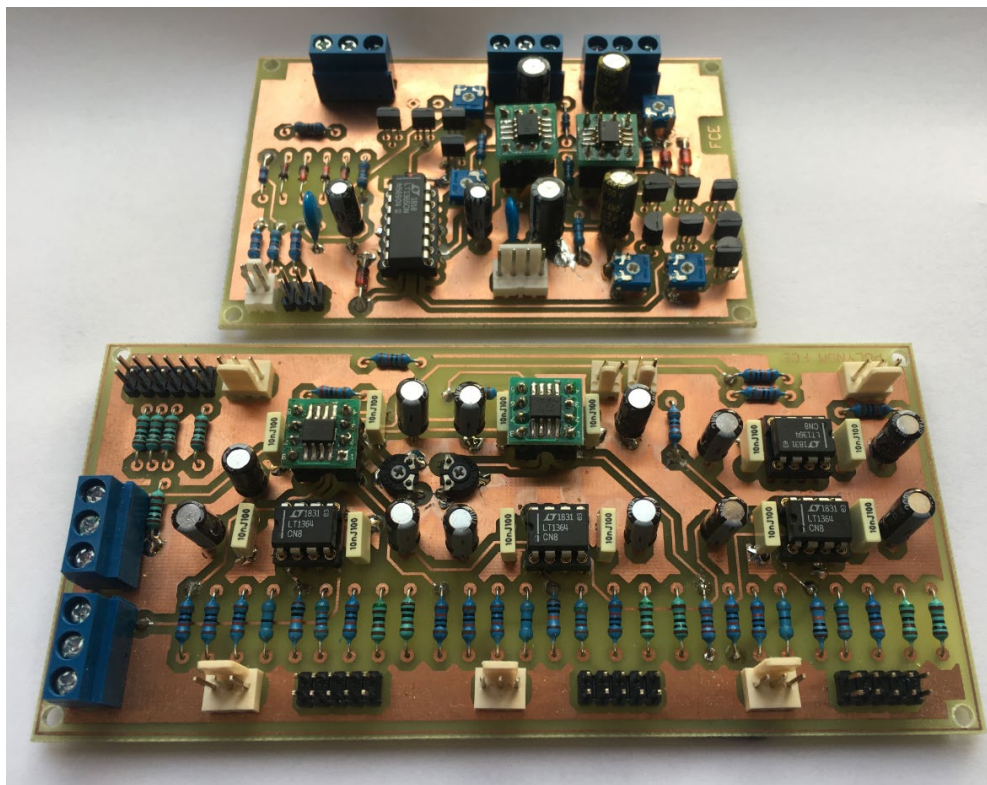
Graf 9 Priebeh ľubovoľného výstupného signálu prevodníka polynomiálnej funkcie.

Kmitočtová závislosť prevodníka polynomiálnej funkcie:

Prevodník polynomiálnej funkcie: $f_{\text{MAX}} = \dots\dots\dots$

Záver:

10 FOTODOKUMENTÁCIA



Obr. 10.1 Osadené DPS prevodníkov funkcií.



Obr. 10.2 Finálna podoba laboratórneho prípravku.

11 ZÁVER

Cieľom tejto diplomovej práce bolo vytvoriť analógové funkčné prevodníky pre laboratórnu výučbu, konkrétne dvojbrány s nelineárnou prevodnou charakteristikou odpovedajúce kvadratickej, kubickej a inverznej kvadratickej funkcii a blok realizujúci polynomiálnu prevodnú charakteristiku.

V úvodnej časti práce boli vysvetlené základné princípy obvodových prvkov využitých na vytvorenie dvojbránov nelineárnych funkcií. Boli v nej rozobrané základné vlastnosti tranzistorov, dôležité informácie o operačných zosilňovačoch spolu s teóriou o analógových násobičkách. Návrhy prevodníkov kvadratickej a inverznej kvadratickej funkcie pomocou tranzistorov dopĺňajú na základe simulácií priložené charakteristiky preukazujúce ich použiteľnosť v zadanom rozmedzí parametrov. Obvod kubickej funkcie však musel byť zhotovený z operačných zosilňovačov a diód, pretože zapojenie výlučne z tranzistorov by siahalo do rozsiahlych tranzistorových štruktúr. Aj napriek tomu obvod ponúka študentom v meraní laboratórnej úlohy výstupné priebehy signálu v tvare tretej mocniny vstupného signálu so skvelou kvalitou v požadovanom rozsahu frekvencií do 100 kHz.

Prevodník polynomiálnej funkcie bol koncipovaný na princípe vzájomných násobení vstupných signálov pomocou analógových násobičiek. Ich doplnením operačnými zosilňovačmi vznikol obvod zabezpečujúci prevod signálu podľa voľby nastavenia veľkostí a znamienka konštánt polynomiálnej rovnice tretieho rádu. Simulácie navrhnutého obvodu znova preukázali jeho použiteľnosť v požadovanom rozmedzí parametrov.

V rámci praktickej realizácie boli k navrhnutým obvodom doplnené potrebné súčasti zabezpečujúce ich funkčnosť a vyššiu odolnosť, ako je bližšie opísané v samotnej kapitole. Primárne bol však obvod prevodníka kvadratickej funkcie doplnený o diferenciálny zosilňovač na jeho výstupe, slúžiaci k získavaniu požadovaného výstupného signálu z obvodu. Prevodník inverznej kvadratickej funkcie bol doplnený o napätím riadený zdroj prúdu na vstupe obvodu, ktorý zabezpečuje pripojenie diamantového tranzistora transkonduktančného zosilňovača OPA860.

Správnosť návrhu preukazujú výsledky meraní zhrnuté v rámci ôsmej kapitoly, pričom meranie prebiehalo na kompletne skonštruovanom prípravku pre laboratórnu

výučbu. Na základe priložených grafov a analýz je preukázateľné, že teoretický návrh podložený simuláciami priamo korešponduje s reálnymi hodnotami zmeranými na jednotlivých prevodníkoch. Výsledky meraní deklarujú použiteľnosť prípravku v zadanom rozmedzí parametrov vstupných napätí, frekvencií a očakávaných výstupných priebehov, čím sa laboratórny prípravok môže stať plnohodnotnou súčasťou navrhovanej laboratórnej úlohy.

Pre zjednodušenie jeho obsluhy boli navrhnuté aj podporné obvody ako generátor harmonických signálov a napájací zdroj, ktoré boli následne implementované priamo do prípravku. V rámci kompletizácie návrhu bol merací prípravok uzavretý do ochranného plastového boxu, ktorý bol doplnený riadiacim panelom s vyvedenými prepínačmi, potenciometrami a meracími konektormi, ako ukazuje fotodokumentácia.

V rámci predpokladov pre budúce meranie študentmi bol navrhnutý a vytvorený merací formulár obsiahnutý v kapitole deväť. Body zadania formuláru umožnia študentom prakticky si overiť vplyv prevodníkov na vstupný signál a pouvažovať nad princípmi, na základe ktorých jednotlivé obvody fungujú.

LITERATURA

- [1] LÁNIČEK, Robert. *Elektronika: obvody, součástky, děje*. Praha: BEN – technická
- [2] ELUC. *Unipolární tranzistory – tranzistory řízené elektrickým polem* [online]. 2015 [cit. 2018-12-8]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/596>
- [3] ELUC. *Princip činnosti základních typů JFET tranzistorů* [online]. 2015 [cit. 2018-12-8]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/597>
- [4] ELUC. *Princip činnosti základních typů MOSFET tranzistorů* [online]. 2015 [cit. 2018-12-8]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/598>
- [5] ELUC. *Tranzistory MOSFET s indukovaným kanálem* [online]. 2015 [cit. 2018-12-8]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/599>
- [6] BOUŠEK, J., KOSINA, P., MOJROVA, B.: *Elektronické součástky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2015.
- [7] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-059-8
- [8] BRANČÍK, L. a DOSTÁL, T. *Analogové elektronické obvody*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2007. 124 s. ISBN 978-80-214-3525-4.
- [9] ZUMBAHLEN, H. *Linear circuit design handbook*. Amsterdam : Elsevier, 2008, ix, 943 s. Analog Devices. ISBN 978-0-7506-8703-4.
- [10] ON SEMICONDUCTOR. *BS170 Small Signal MOSFET 500mA, 60Volts* [online]. 7.vyd. 2017 [cit. 2018-12-8]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/BS170-D.PDF>
- [11] PHILIPS. *BS250 P-channel enhancement mode vertical D-MOS transistor* [online]. 2017 [cit. 2018-12-8]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/16638/PHILIPS/BS250.html>
- [12] VISHAY. *BAT42 Small Signal Schottky Diode* [online]. 2005 [cit. 2018-12-8]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/85660/bat42.pdf>
- [13] LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. *LT1364/LT1365 Dual and Quad 70MHz, 1000V/μs Op Amps*. Wwww.analog.com [online]. Milpitas, 2005 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/13645fa.pdf>

- [14] ANALOG DEVICES. *AD835 250MHz, Voltage Output, 4-Quadrant Multiplier* [online]. 2014 [cit. 2018-12-9]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD835.pdf>
- [15] SAKUL, CH. *A CMOS Square-Rooting Circuits*. In proceeding of 23rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), 2008, 537-540.
- [16] SAKUL, CH. *A new CMOS squaring Circuit using voltage/Current Input*. In proceeding of 23rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), 2008, 525-528.
- [17] TEXAS INSTRUMENTS. *LM317 3-Terminal Adjustable Regulator* [online]. 2016 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/slvs044x/slvs044x.pdf>
- [18] TEXAS INSTRUMENTS. *LMx37 3-Terminal Adjustable Regulators* [online]. 2015 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm337.pdf>
- [19] EXAR. *XR-8038A Precision Waveform Generator* [online]. 1997 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/82328/EXAR/XR8038.html>
- [20] ANALOG DEVICES. *Low Cost 270 MHz Differential Receiver Amplifiers AD8129/AD8130*. www.analog.com [online]. Norwood: Analog Devices, 2005 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad8129_8130.pdf
- [21] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. *Wide Bandwidth OPERATIONAL TRANSCONDUCTANCE AMPLIFIER (OTA) and BUFFER*. www.ti.com [online]. Dallas, 2005 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa860.pdf>
- [22] BUSCARINO, Arturo, Luigi FORTUNA, Mattia FRASCA a Gregorio SCIUTO. *From the Mathematical Model to the Circuit*. BUSCARINO, Arturo, Luigi FORTUNA, Mattia FRASCA a Gregorio SCIUTO. *A Concise Guide to Chaotic Electronic Circuits* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2014, 2014-4-23, s. 11-31 [cit. 2019-05-13]. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. DOI: 10.1007/978-3-319-05900-6_2. ISBN 978-3-319-05899-3. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-05900-6_2

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

FET	...	Field Effect Transistor
JFET	...	Junction-FET
MOSFET	...	Metal-Oxide-Semiconductor
OZ	...	Operačný zosilňovač
IN	...	Vstup
OUT	...	Výstup

Symboly:

I_{DSS}	...	Saturačný prúd tranzistora	[A]
$U_{GS(off)}$	...	Napätie uzavretia kanálu tranzistora	[V]
$r_{DS(off)}$	...	Odpor uzavretého kanálu	[Ω]
$r_{DS(on)}$	...	Odpor otvoreného kanálu	[Ω]
U_p	...	Prahové napätie tranzistora	[V]
$U_{DS(sat)}$	...	Saturačné napätie tranzistora	[V]
P_{Dmax}	...	Maximálny výkon tranzistora	[W]
L	...	Dĺžka kanálu tranzistora	[m]
W	...	Šírka kanálu tranzistora	[m]
A_U	...	Napät'ové zosilnenie	[-]
R_{VST}	...	Vstupný odpor	[Ω]
R_{VYST}	...	Výstupný odpor	[Ω]
U_{IO}	...	Zvyškové napätie OZ	[V]
K_U	...	Napät'ový prenos	[-]
U_i	...	Aktuálna hodnota výstupného napätia	[V]
U_{DS}	...	Napätie medzi Drain a Source	[V]
U_{GS}	...	Napätie medzi Gate a Source	[V]
I_D	...	Drainový prúd	[A]
I_{GSS}	...	Zvodový prúd hradla	[A]
$U_{BR(DSS)}$	...	Prierazné napätie tranzistora	[V]
$U_{GS(Th)}$	...	Prahové napätie hradla	[V]
g_{fs}	...	Transkonduktančný parameter	[mmhos]

C_{iss}	...	Vstupná kapacita	[F]
Y_{fs}	...	Transadmitančný parameter	[mS]
U_{RM}	...	Maximálne záverné napätie	[V]
I_F	...	Pracovný prúd diódy	[A]
P_V	...	Maximálny výkon diódy	[W]
I_{FSM}	...	Špičkový pracovný prúd diódy	[A]
U_{CC+}	...	Kladné napájacie napätie	[V]
U_{CC-}	...	Záporné napájacie napätie	[V]
U_{IO}	...	Offsetové napätie vstupu	[V]
I_{IO}	...	Vstupný offsetový prúd	[A]
U_{OM}	...	Maximálne výstupné napätie	[V]
U_{ICR}	...	Vstupné napätie	[V]
I_{CC}	...	Napájací prúd	[A]
THD	...	Totálne harmonické skreslenie	[%]
SR	...	Rýchlosť prebehu na jednotku zosilnenia	[V/us]
f	...	Frekvencia	[Hz]
K	...	Transkonduktančný parameter	[mmhos]
A_{IN}	...	Zosilnenie invertujúceho OZ	[-]
B	...	Spätnoväzbový prenos	[-]
U_{ccAM}	...	Napájacie napätie analógovej násobičky	[V]
U_{ccOZ}	...	Napájacie napätie OZ	[V]
T_J	...	Pracovná teplota	[°C]

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1	Tabuľky meraní prevodníkov	I
Príloha 2	Schémy zapojenia	V
Príloha 3	Dosky plošných spojov.....	IX
Príloha 4	Osadzovacie plány	XIII
Príloha 5	Zoznam osadených súčiastok.....	XV
Príloha 6	Riadiaci panel	XVIII

Príloha 1 Tabuľky meraní prevodníkov

Tabuľka 1 Hodnoty merania prevodnej charakteristiky prevodníka kvadratickej funkcie.

Prevodná charakteristika			
U_{IN} [mV]	U_{OUT} [V]	U_{IN} [mV]	U_{OUT} [V]
-700	1,81	50	1,07
-650	1,81	100	1,13
-600	1,82	150	1,16
-550	1,79	200	1,23
-500	1,75	250	1,38
-450	1,59	300	1,44
-400	1,51	350	1,48
-350	1,42	400	1,59
-300	1,40	450	1,67
-250	1,26	500	1,81
-200	1,17	550	1,83
-150	1,11	600	1,87
-100	1,06	650	1,86
-50	1,04	700	1,87
0	1,01		

Tabuľka 2 Hodnoty merania modulovej kmitočtovej charakteristiky prevodníka kvadratickej funkcie.

Modulová kmitočtová charakteristika					
pri $U_{IN} = 500\text{mV}$					
f [kHz]	U_{OUT} [V]	A_U [dB]	f [kHz]	U_{OUT} [V]	A_U [dB]
0,1	1,76	10,97	30	1,77	10,98
0,2	1,77	10,98	50	1,77	10,98
0,3	1,77	10,98	70	1,76	10,97
0,5	1,76	10,97	100	1,77	10,98
0,7	1,77	10,98	200	1,46	9,36
1	1,77	10,98	300	1,40	8,94
2	1,76	10,97	500	1,39	8,88
3	1,77	10,98	700	1,38	8,81
5	1,77	10,98	1000	1,36	8,69
7	1,76	10,97	2000	1,20	7,67
10	1,76	10,97	3000	1,09	6,73
20	1,76	10,96			

Vzorový výpočet:

$$A_U = 20 \times \log \left(\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right) = 20 \times \log \left(\frac{1,76}{500 \times 10^{-3}} \right) = 10,97 [-]$$

Tabuľka 3 Hodnoty merania prevodnej charakteristiky prevodníka inverznej kvadratickej funkcie.

Prevodná charakteristika			
U_{IN} [mV]	U_{OUT} [V]	U_{IN} [mV]	U_{OUT} [V]
-1000	-1,800	50	-0,224
-900	-1,800	60	-0,224
-800	-1,800	70	-0,232
-700	-1,780	80	-0,232
-600	-1,760	90	-0,232
-500	-1,720	100	-0,224
-400	-1,660	120	-0,224
-350	-1,570	140	-0,220
-300	-1,530	160	-0,224
-250	-1,500	180	-0,224
-200	-1,440	200	-0,220
-180	-1,410	250	-0,216
-160	-1,380	300	-0,208
-140	-1,360	350	-0,208
-120	-1,340	400	-0,220
-100	-1,320	500	-0,220
-90	-1,300	600	-0,220
-80	-1,260	700	-0,220
-70	-1,240	800	-0,220
-60	-1,220	900	-0,220
-50	-1,180	1000	-0,220
0	-0,320		

Tabuľka 4 Hodnoty merania modulovej kmitočtovej charakteristiky prevodníka inverznej kvadratickej funkcie.

Modulová kmitočtová charakteristika					
pri $U_{IN} = 500\text{mV}$					
f [kHz]	U_{OUT} [V]	A_U [dB]	f [kHz]	U_{OUT} [V]	A_U [dB]
0,1	1,71	10,73	20	1,71	10,73
0,2	1,71	10,73	30	1,71	10,73
0,3	1,71	10,73	50	1,73	10,78
0,5	1,71	10,73	70	1,73	10,78
0,7	1,71	10,73	100	1,74	10,83
1	1,71	10,73	200	1,74	10,83
2	1,71	10,73	300	1,70	10,63
3	1,71	10,73	500	1,64	10,31
5	1,71	10,73	700	1,54	9,77
7	1,71	10,73	1000	1,32	8,43
10	1,71	10,73	2000	1,11	6,92

Vzorový výpočet:

$$A_U = 20 \times \log \left(\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right) = 20 \times \log \left(\frac{1,71}{500 \times 10^{-3}} \right) = 10,73 \text{ [dB]}$$

Tabuľka 5 Hodnoty merania prevodnej charakteristiky prevodníka kubickej funkcie.

Prevodná charakteristika			
U_{IN} [mV]	U_{OUT} [V]	U_{IN} [mV]	U_{OUT} [V]
-750	-6,96	50	0,03
-700	-6,96	100	0,10
-650	-6,88	150	0,28
-600	-6,77	200	0,68
-550	-5,99	250	1,30
-500	-5,12	300	2,00
-450	-4,32	350	2,76
-400	-3,50	400	3,52
-350	-2,76	450	4,24
-300	-2,00	500	5,20
-250	-1,32	550	5,84
-200	-0,70	600	6,72
-150	-0,30	650	7,20
-100	-0,10	700	7,28
-50	-0,03	750	7,36
0	0,01		

Tabuľka 6 Hodnoty merania modulovej kmitočtovej charakteristiky prevodníka kubickej funkcie.

Modulová kmitočtová charakteristika					
pri $U_{IN} = 500\text{mV}$					
f [kHz]	U_{OUT} [V]	A_U [dB]	f [kHz]	U_{OUT} [V]	A_U [dB]
0,1	5,120	20,206	70	5,270	20,456
0,2	5,118	20,204	100	5,280	20,470
0,3	5,122	20,210	200	5,296	20,500
0,5	5,123	20,212	300	5,308	20,520
0,7	5,129	20,221	500	5,314	20,530
1	5,199	20,340	700	5,339	20,570
2	5,205	20,350	1000	5,358	20,600
3	5,206	20,352	2000	5,395	20,660
5	5,212	20,361	3000	5,358	20,600
7	5,218	20,370	5000	5,315	20,530
10	5,224	20,381	7000	5,075	20,130
20	5,230	20,390	10000	3,037	15,670
30	5,236	20,400	15000	0,959	5,660
50	5,250	20,423			

Vzorový výpočet:

$$A_U = 20 \times \log \left(\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right) = 20 \times \log \left(\frac{5,12}{500 \times 10^{-3}} \right) = 20,206 [-]$$

Tabuľka 7 Hodnoty merania prevodnej charakteristiky prevodníka polynomiálnej funkcie.

Prevodná charakteristika			
U_{IN} [mV]	U_{OUT} [V]	U_{IN} [mV]	U_{OUT} [V]
-2,00	-1,100	0,05	0,112
-1,80	-1,100	0,10	0,146
-1,60	-1,100	0,15	0,192
-1,40	-1,100	0,20	0,244
-1,20	-1,100	0,25	0,310
-1,10	-0,872	0,30	0,382
-1,00	-0,608	0,35	0,476
-0,90	-0,420	0,40	0,576
-0,80	-0,281	0,45	0,696
-0,70	-0,176	0,50	0,856
-0,60	-0,104	0,60	1,140
-0,50	-0,048	0,70	1,520
-0,45	-0,044	0,80	1,980
-0,40	-0,032	0,90	2,580
-0,35	-0,028	1,00	3,280
-0,30	-0,012	1,10	4,040
-0,25	-0,004	1,20	4,600
-0,20	-0,008	1,40	5,640
-0,15	-0,018	1,60	6,970
-0,10	-0,030	1,80	7,320
-0,05	-0,048	2,00	7,360
0,00	0,002		

Tabuľka 8 Hodnoty merania modulovej kmitočtovej charakteristiky prevodníka polynomiálnej funkcie.

Modulová kmitočtová charakteristika					
pri $U_{IN} = 500\text{mV}$					
f [kHz]	U_{OUT} [V]	A_U [dB]	f [kHz]	U_{OUT} [V]	A_U [dB]
0,1	3,917	11,86	100	3,908	11,84
0,2	3,935	11,9	200	3,908	11,84
0,5	3,958	11,95	500	3,899	11,82
1	3,967	11,97	1000	3,886	11,79
2	3,981	12	2000	3,868	11,75
5	3,958	11,95	5000	3,999	12,04
10	3,917	11,86	10000	3,510	10,91
20	3,917	11,86	20000	3,119	9,88
50	3,917	11,86	50000	2,000	6,02

Vzorový výpočet:

$$A_U = 20 \times \log \left(\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right) = 20 \times \log \left(\frac{3,917}{500 \times 10^{-3}} \right) = 11,86 [-]$$

Príloha 2 Schémy zapojenia

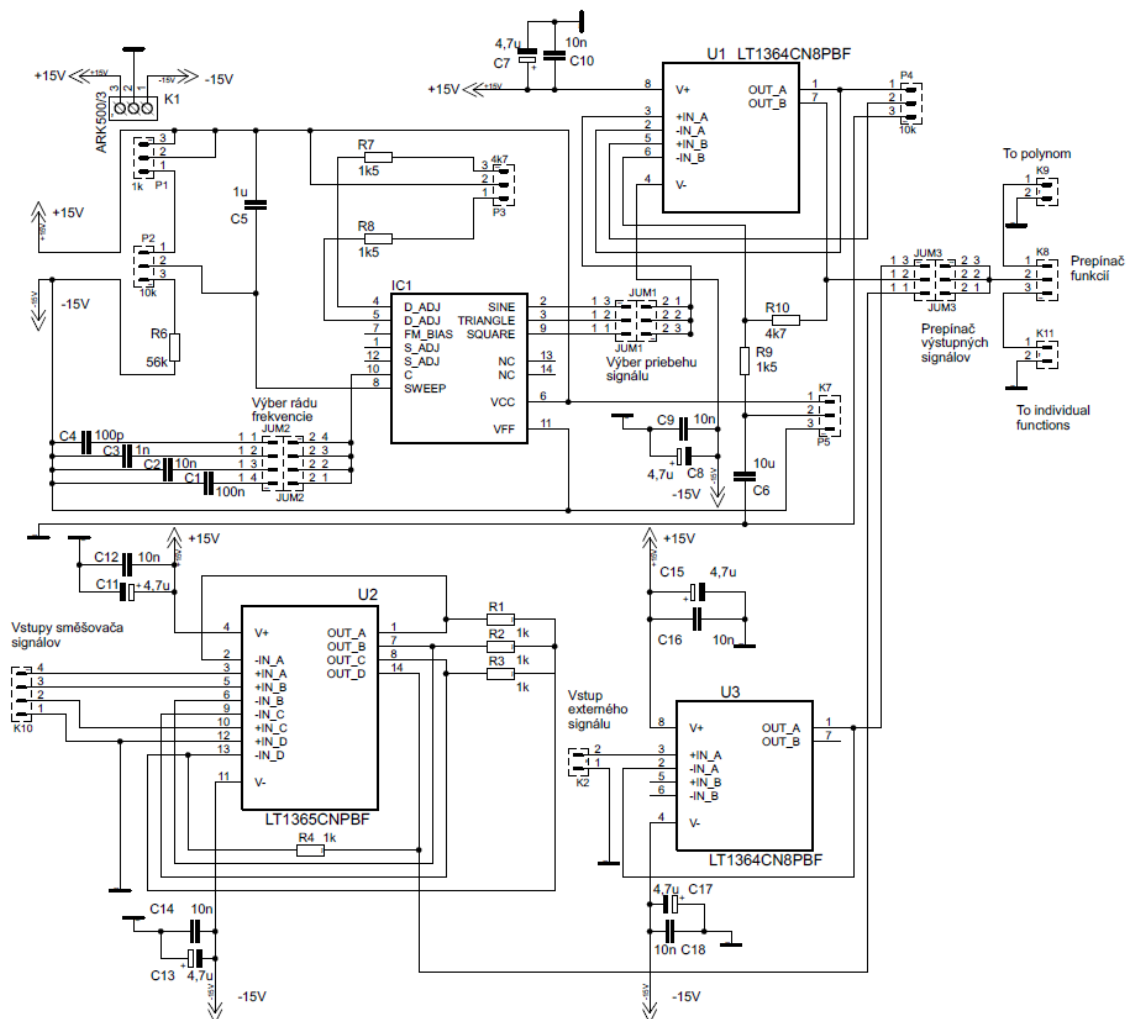


Schéma 1 Obvod vstupných signálov s generátorom harmonických signálov.

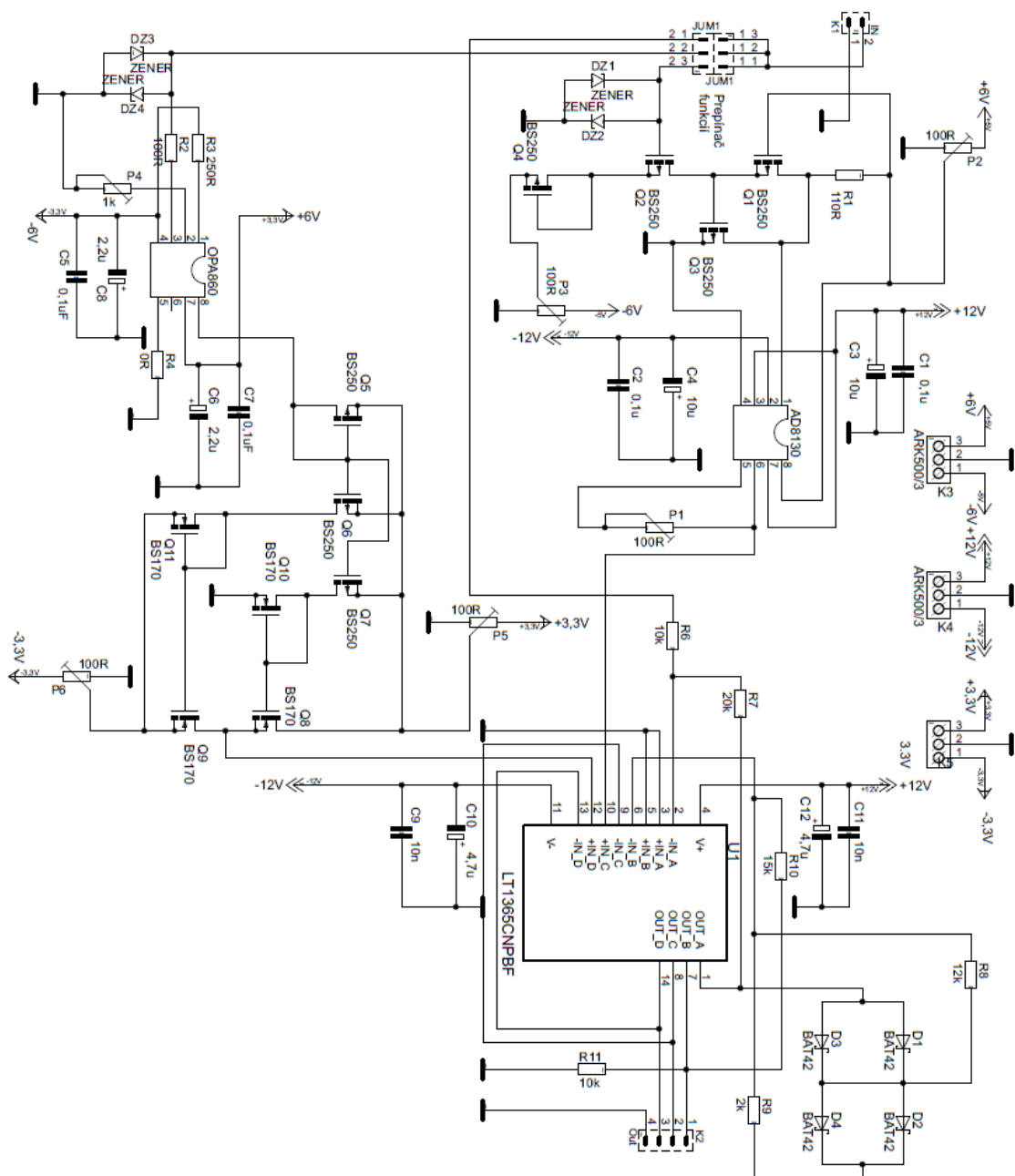


Schéma 2 Kompletné zapojenie individuálnych funkcií.

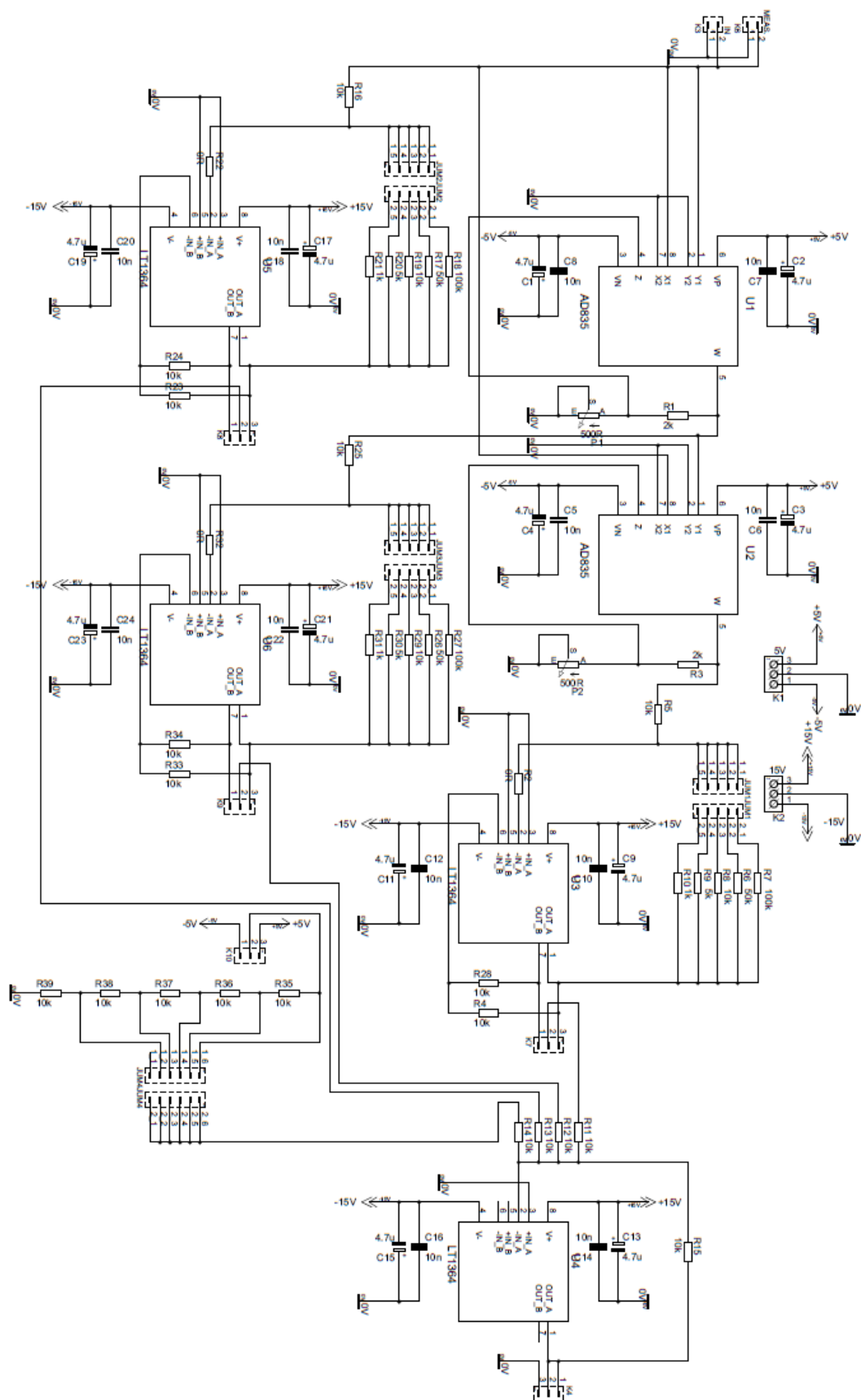


Schéma 3 Kompletná schéma zapojenia obvodu polynomiálnej funkcie.

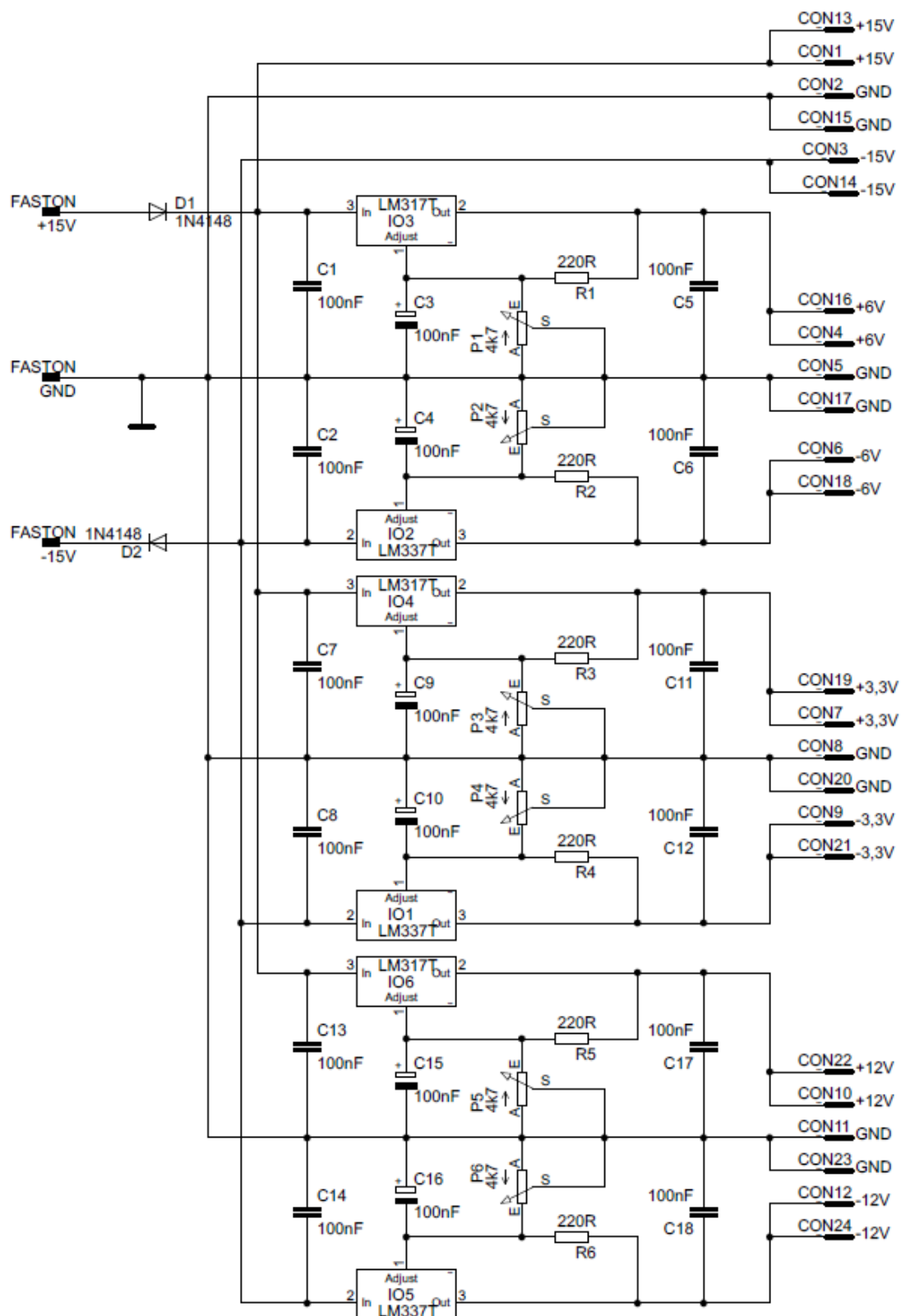
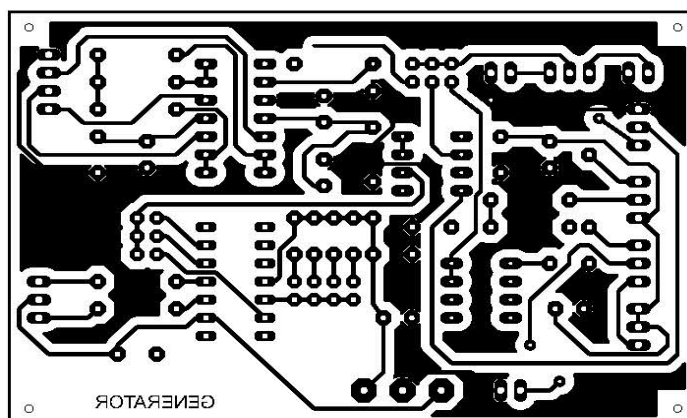
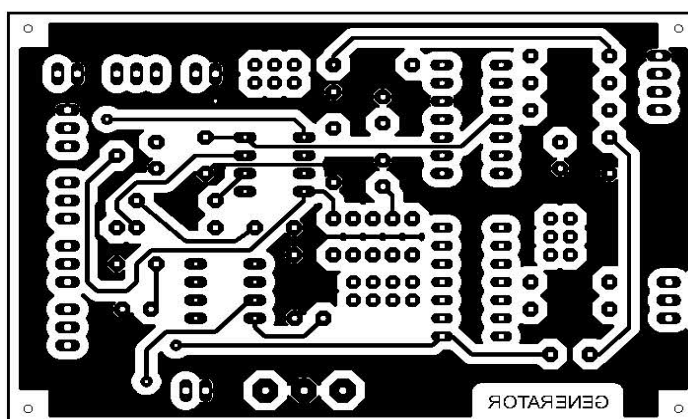


Schéma 4 Zdroj napětí.

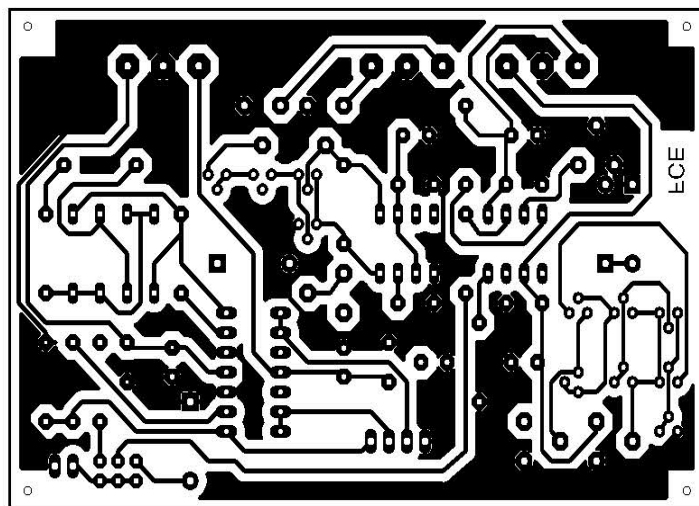
Príloha 3 Dosky plošných spojov.



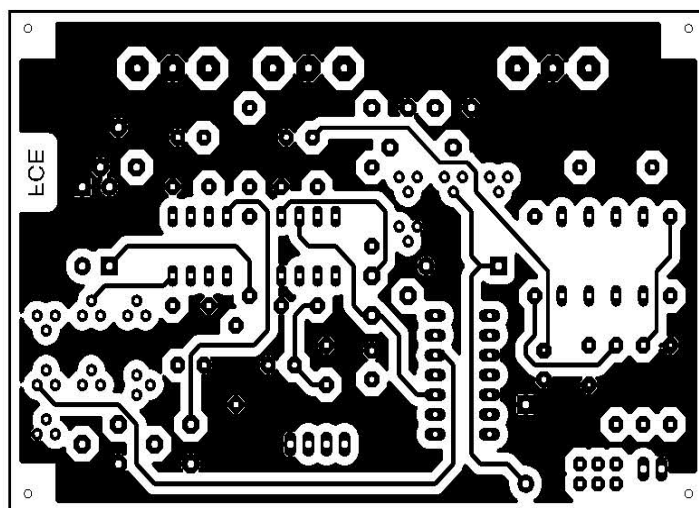
DPS 1 Směšovač s generátorem - strana bottom.



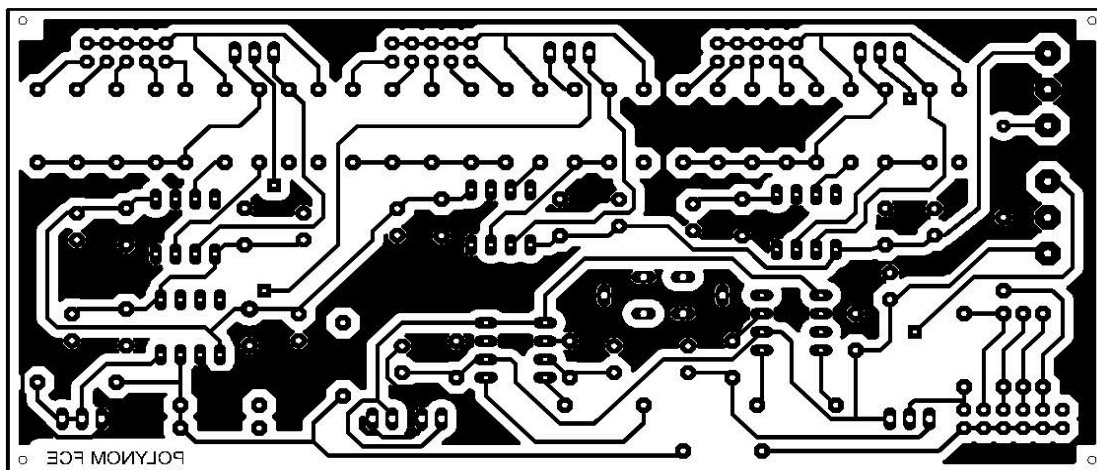
DPS 2 Směšovač s generátorem - zrkadlená strana top.



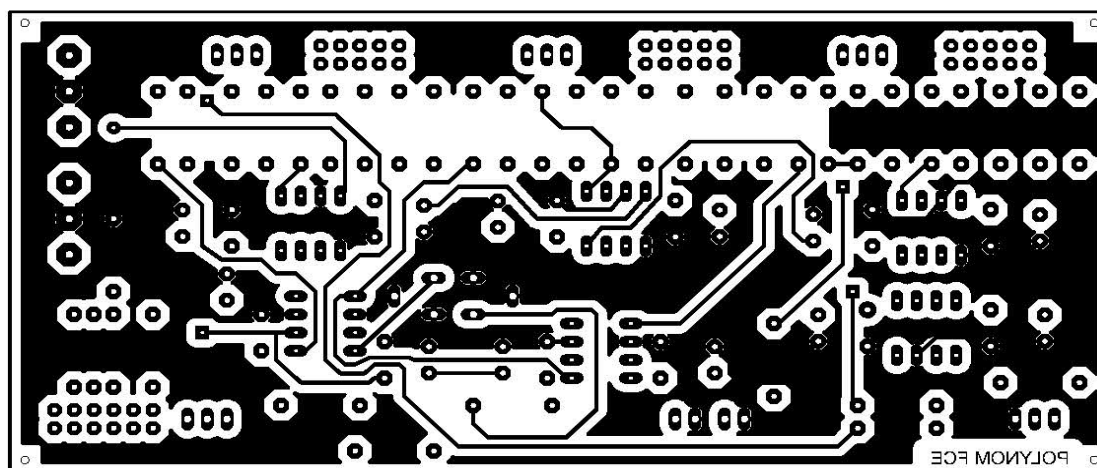
DPS 3 Doska individuálnych funkcií - strana bottom.



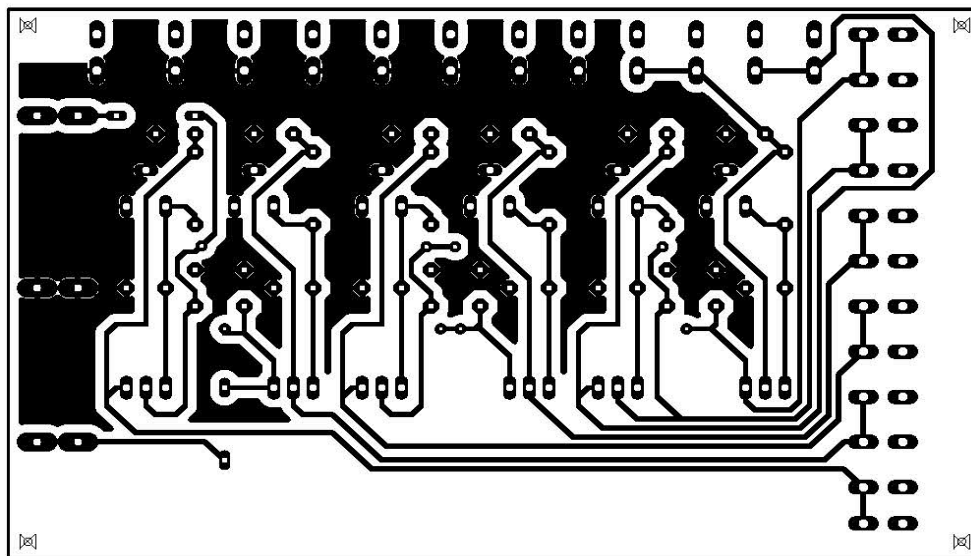
DPS 4 Doska individuálnych funkcií - zrkadlená strana top.



DPS 5 Polynomiálna funkcia - strana bottom.

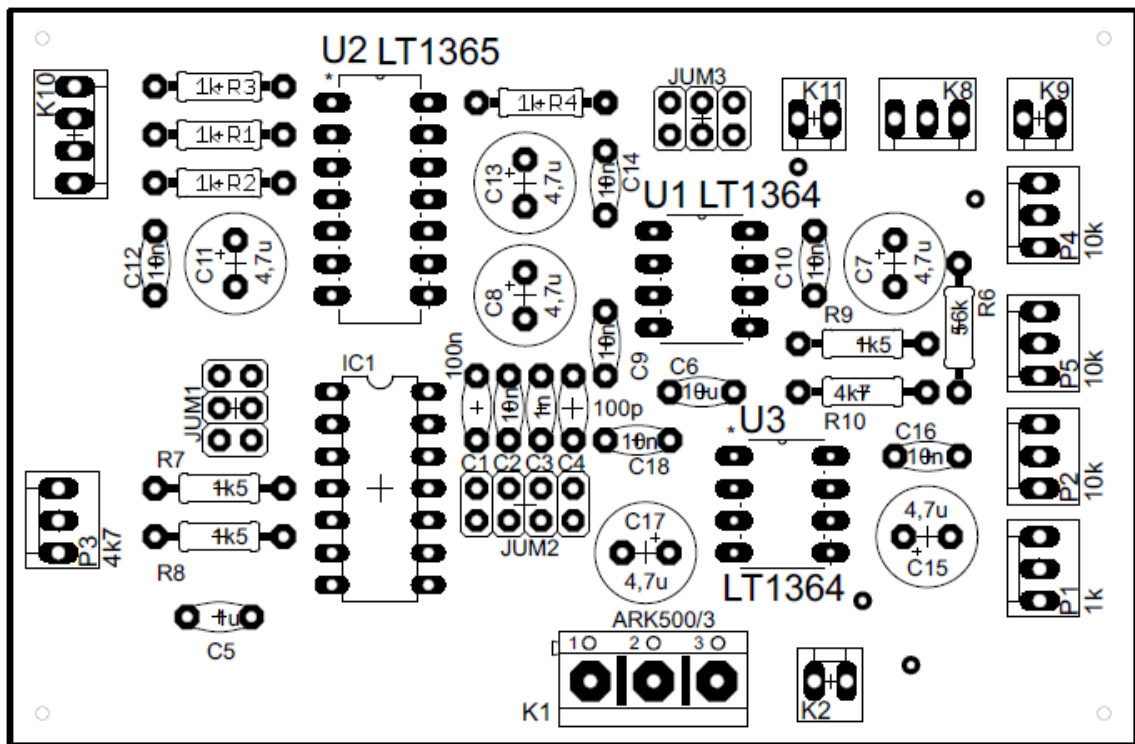


DPS 6 Polynomiálna funkcia - zrkadlená strana top.

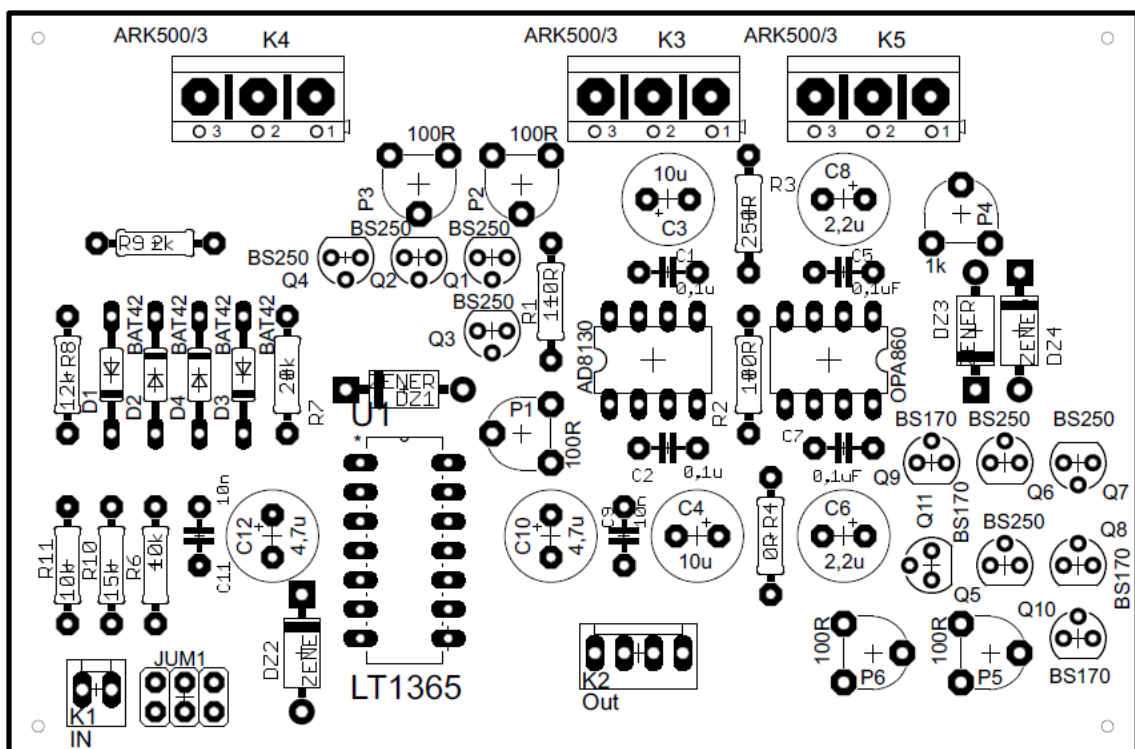


DPS 7 Zdroj napätí – strana bottom.

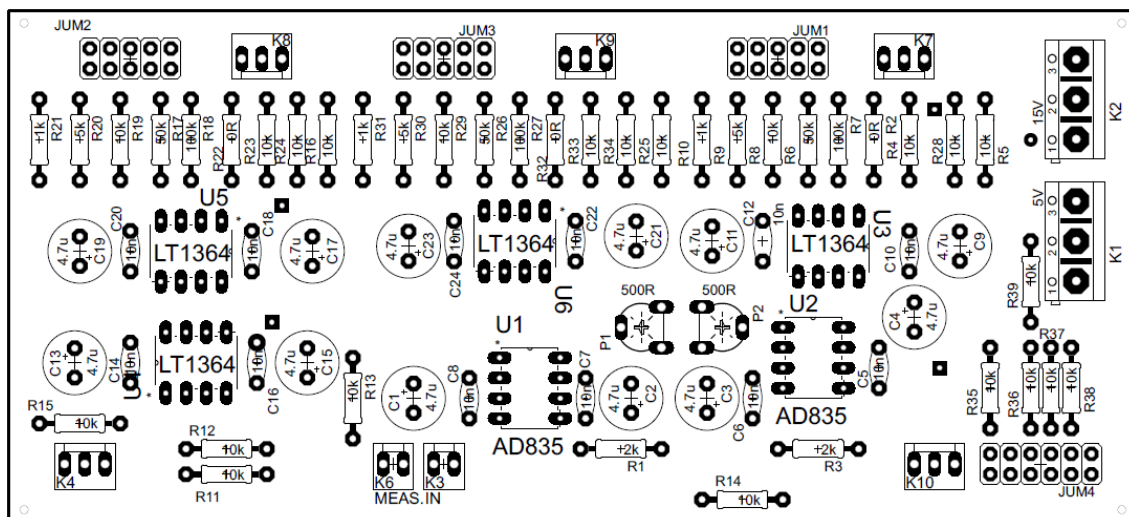
Príloha 4 Osadzovacie plány



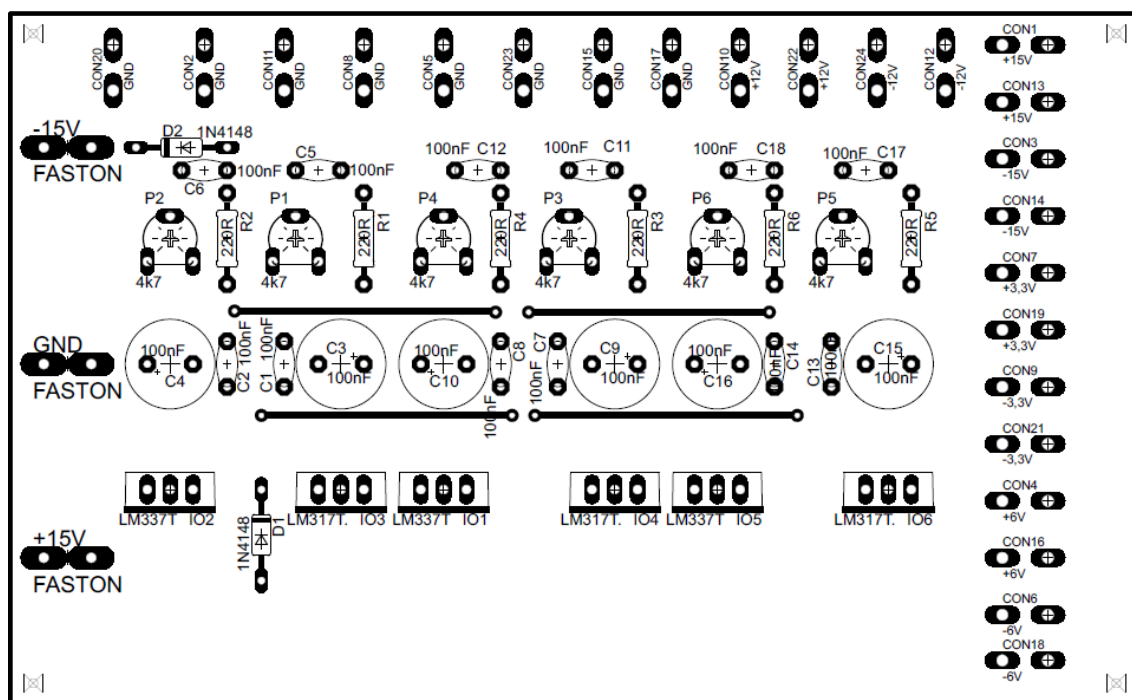
Osadzovací plán 1 Směšovač s generátorem signálů.



Osadzovací plán 2 Doska individuálních funkcí.



Osadzovací plán 3 Doska polynomiálnej funkcie.



Osadzovací plán 4 Zdroj napätí.

Príloha 5 Zoznam osadených súčiastok

Tabuľka 9 Zoznam súčiastok prevodníka polynomiálnej funkcie.

Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
R2, R4	100R	R-10	metalizovaný rezistor
R7, R18, R27	100k	R-10	metalizovaný rezistor
R4, R5, R8, R11, R12, R13, R14, R15, R16, R19, R23, R24, R25, R28, R29, R33, R34, R35, R36, R37, R38, R39	10k	R-10	metalizovaný rezistor
R9, R20, R30	5k	R-10	metalizovaný rezistor
R10, R21, R31	1K	R-10	metalizovaný rezistor
R1, R3	2k	R-10	metalizovaný rezistor
R6, R17, R26	50k	R-10	metalizovaný rezistor
R2, R22, R32	0R	R-10	metalizovaný rezistor
P1, P2	500R	PT6V	trimer
C5, C6, C7, C8, C10, C12, C14, C16, C18, C20, C22, C24	10n	RM-10	keramický kondenzátor
C1, C2, C3, C4, C9, C11, C13, C15, C17, C19, C21, C23	4,7 μ	RM-3,5	elektrolytický kondenzátor
JUM1, JUM2, JUM3		S2G5	Konektory - kolíky – 2x5
JUM4		S2G6	Konektory - kolíky – 2x6
K4, K7, K8, K9, K10		PSH02-03p	konektory – vidlica-3pin
K3, K6		PSH02-02p	konektory – vidlica-2pin
U1, U2		DIL8	AD835
U3, U4, U5, U6		DIL8	LT1364
K2, K3		ARK500/3	Svorkovnica 5mm - trojitá

Tabuľka 10 Zoznam súčiastok zdroja napätí.

Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
R1, R2, R3, R4, R5, R6	220R	R-10	metalizovaný rezistor
P1, P2, P3, P4, P5, P6	4K7	R-10	trimer
C3, C4, C9, C10, C15, C16	100n	RM6,3	elektrolytický kondenzátor
C1, C2, C5, C6, C7, C8, C11, C12, C13, C14, C17, C18	100n	RM5	keramický kondenzátor
D1, D2		R-10	1N4148
+15V, GND, -15V, CON1, CON2, CON3, CON4, CON5, CON6, CON7, CON8, CON9, CON10, CON11, CON12, CON13, CON14, CON15, 16, CON17, CON18, CON19, CON20, CON21, CON22, CON23, CON24		F061.060	FASTON
		AK500	konektor
IO1, IO2, IO5		TO-220	LM337
IO3, IO4, IO6		TO-220	LM317

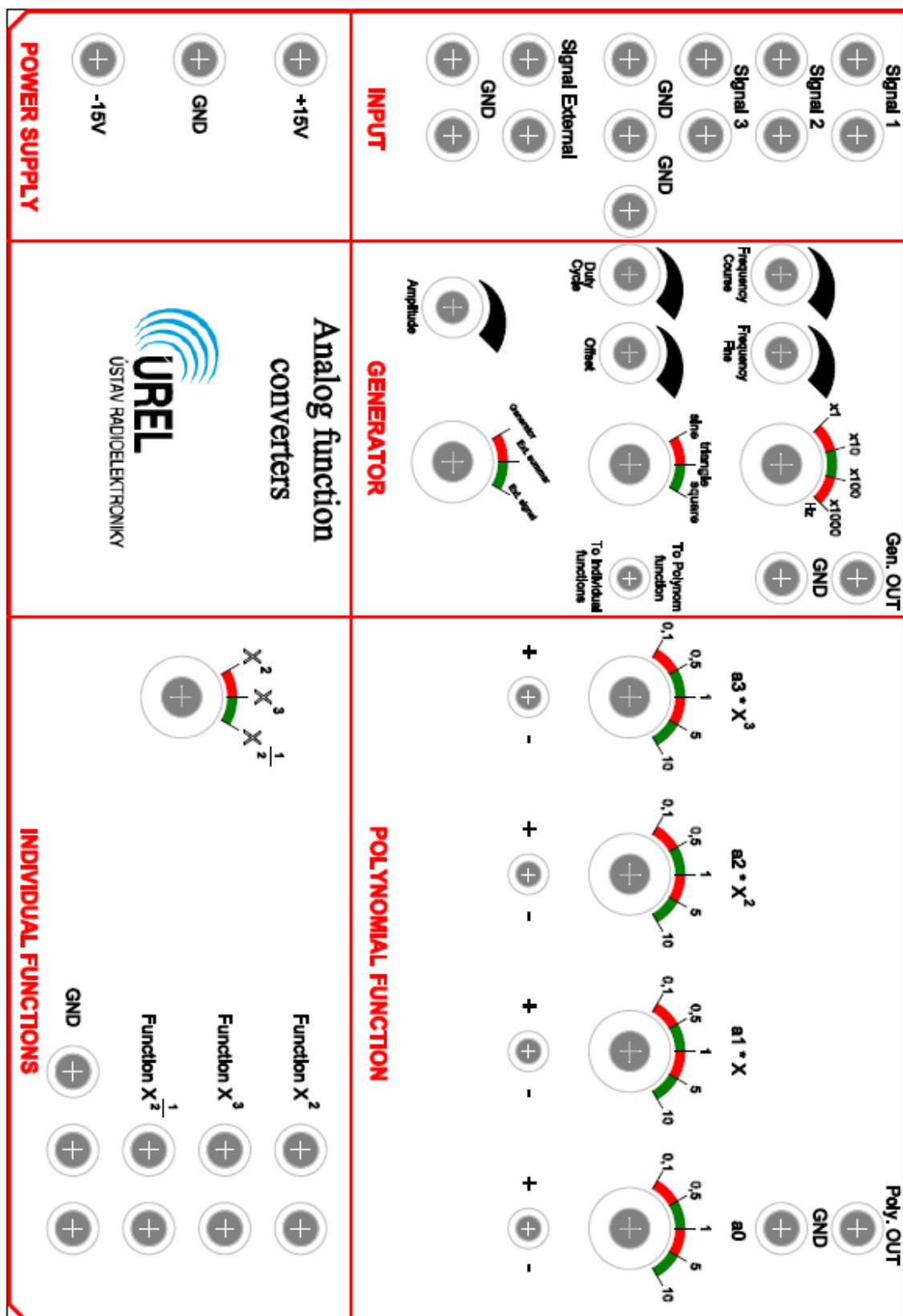
Tabuľka 11 Zoznam súčiastok DPS generátora.

Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
R1, R2, R3, R4	1k	R-10	metalizovaný rezistor
R7, R8, R9	1k5	R-10	metalizovaný rezistor
R6	56k	R-10	metalizovaný rezistor
R10	4k7	R-10	metalizovaný rezistor
C2, C9, C10, C12, C14, C16, C18	10n	RM-5	keramický kondenzátor
C7, C8, C11, C13, C15, C17	4,7μ	RM-3,5	elektrolytický kondenzátor
C1	100n	RM-5	keramický kondenzátor
C3	100p	RM-5	keramický kondenzátor
C5	10u	RM-5	keramický kondenzátor
C6	1n	RM-5	keramický kondenzátor
C4	1u	DIP254p	keramický kondenzátor
XR-8038		DIL14	Waveform generátor
JUM1, JUM3		S2G3	Konektory - kolíky – 2x3
JUM2		S2G4	Konektory - kolíky – 2x4
K10		PSH02-03p	konektory – vidlica-4pin
K8, P2, P4, P5, P1, P3		PSH02-03p	konektory – vidlica-3pin
K2, K9, K11		PSH02-03p	konektory – vidlica-2pin
U1, U3		DIL8	LT1364
U2		DIL16	LT1365

Tabuľka 12 Zoznam súčiastok bloku individuálnych funkcií.

Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
R1	110R	R-10	metalizovaný rezistor
R2	100R	R-10	metalizovaný rezistor
R3	250R	R-10	metalizovaný rezistor
R4	0R	R-10	metalizovaný rezistor
R6, R11	10k	R-10	metalizovaný rezistor
R8	12k	R-10	metalizovaný rezistor
R10	15k	R-10	metalizovaný rezistor
R7	20k	R-10	metalizovaný rezistor
R9	2k	R-10	metalizovaný rezistor
P1, P2, P3, P5, P6	100R	PT6V	trimer
P4	1k	PT6V	trimer
C1, C2, C5, C7	0,1u	RM-5	keramický kondenzátor
C9, C11	10n	RM-5	keramický kondenzátor
C3, C4	10u	RM3,8-8	elektrolytický kondenzátor
C6, C8	2,2u	RM3,8-8	elektrolytický kondenzátor
C10, C12	4,7u	RM3,8-8	elektrolytický kondenzátor
JUM1		S2G3	Konektory - kolíky – 2x3
K3, K4, K5		ARK500/3	Svorkovnica 5mm - trojitá
K1		PSH02-02p	konektory – vidlica-2pin
K2		PSH02-04p	konektory – vidlica-4pin
D1, D2, D3, D4		DO35-10	BAT42 - dióda
DZ1, DZ2, DZ3, DZ4		DO41	D-BZY_W Zenerová dióda
U1		DIL14	LT1365
Q8, Q9, Q10, Q11		SOT54E	BS170 – N-channel MOS
Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7		SOT54E	BS250 – P-channel MOS
AD8130		DIL8	Pätica puzdra DIL8
OPA860		DIL8	Pätica puzdra DIL8
K2, K3		ARK500/3	Svorkovnica 5mm - trojitá

Príloha 6 Riadiaci panel



Obrázok 7 Vizuálny návrh riadiaceho panelu laboratórneho prípravku.