



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DIGITÁLNĚ ŘÍZENÝ MULTIFUNKČNÍ FILTR

DIGITALLY CONTROLLED MULTIFUNCTION FILTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PATRIK HUBKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. BŘETISLAV ŠEVČÍK

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Patrik Hubka
Ročník: 3

ID: 120596
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Digitálně řízený multifunkční filtr

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zaměřte se na problematiku elektronického řízení parametrů moderních multifunkčních aktivních filtrů. Diskutujte možná řešení s ohledem na dostupnost a dosažitelné vlastnosti digitálně řízených prvků a zvolte vybraný typ řešení. Pokuste se simulovat nejen reálné vlastnosti zvoleného aktivního filtru, ale také parazitní vlastnosti digitálně řízených prvků. Vyhotovte konstrukční podklady pro tvorbu plošných spojů a případný ovládací software. Realizujte aktivní multifunkční filtr. Vyhotovte výstupní měřicí zprávu, která bude shrnovat dosažitelné parametry zvoleného řešení. Vytvořte vzorovou laboratorní úlohu zaměřenou právě na tuto problematiku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HÁJEK, K., SEDLÁČEK, J. Kmitočtové filtry, Praha: Nakladatelství BEN - technická literatura, 2002. 535 s. ISBN 80-7300-023-7.

[2] BURKHARD, K. Využití rozhraní PC pod Windows, Ostrava-Plesná: Nakladatelství HEL, 2000. 150 s. ISBN 80-86167-13-5.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 27.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Břetislav Ševčík

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Bakalářská práce je zaměřená na problematiku využití digitálně řízených prvků ve formě digitálních potenciometrů v analogových obvodech na frekvencích vyšších než 1 MHz. Cílem práce je vytvořit plně digitálně říditelný elektronický aktivní filtr s možností změny řádu filtru, typu aproximační funkce, mezní frekvence a činitele jakosti. Pro tyto účely je využit integrovaný obvod LT1568 od firmy Linear Technology. Zároveň je nutné zahrnout do analýzy výzkum parazitních projevů digitálně řízených prvků, neboť aplikace na těchto frekvencích vyžaduje lepší konstrukční řešení než je tomu v případě využití standardních pevných rezistorů. Funkčnost obvodu je ověřena pomocí simulací v PSpice. Pro měření byl vytvořen funkční vzorek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Analogový filtr, aproximace, LT1568, digitální potenciometr, parazitní kapacita, I^2C

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the modern design of analog filter where the digital potentiometers to control circuit parameters are used. The main purpose of this thesis is to create a fully digitally controlled filter at frequencies above 1 MHz based on LT1568 integrated circuit. The main circuit parameters such as cut-off frequency, gain, filter order and type of approximation function are digitally controlled. Analysis of parasitic effects of digital potentiometers is included. The integrated circuit functionality is demonstrated by PSpice circuit simulator. Finally, the experimental measurement results for various circuit parameters setting are included.

KEYWORDS

Analog filter, approximation, LT1568, digital potentiometer, parasitic capacity, I²C

HUBKA, P. *Digitálně řízený multifunkční filtr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 36 s., 22 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí diplomové práce Ing. Břetislav Ševčík.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Digitálně řízený multifunkční filtr jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (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

.....
(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce ing. Břetislavovi Šefčíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

OBSAH

Úvod	9
1 POPIS ZÁKLADNÍCH VLASTNOSTÍ Digitálního potenciometru	10
1.1 Základní popis	10
1.2 Omezení rušení digitálního potenciometru	12
1.3 Aplikace digitálního potenciometru	13
2 INTEGROVANÝ OBVOD LT1568	15
2.1 Základní vlastnosti a vnitřní struktura	15
2.2 Funkce jednotlivých pinů	16
2.3 Řízení LT1568	16
2.4 Měření a simulace LT1568	19
3 DIGITÁLNÍ POTENCIOMETR AD5258 a TPL8002-25	22
3.1 Základní struktura digitálního potenciometru	22
3.2 Limitující faktory	24
3.3 Řízení přes sběrnici I ² C	27
4 Programové vybavení	30
4.1 Základní popis vývojového prostředí a prostředků	30
4.1.1 Komunikace s LCD displejem	31
4.1.2 Maticová klávesnice	32
4.1.3 Funkce pro přenos dat po sběrnici I ² C	33
4.1.4 Expandér PCF8574 pro I ² C sběrnici	34
4.2 Ovládání programu	35
5 Měření Laboratorního přípravku	36
5.2 Linearita digitálního potenciometru	36
5.2 Přenos filtru a parazitní vlivy	37
6 ZÁVĚR	40
LITERATURA	41
Seznam symbolů, veličin a zkratk	42
SEZNAM PŘÍLOH	44

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Základní struktura digitálního potenciometru	11
Obr. 1.2: Zvlnění analogového signálu od komunikace na SPI sběrnici.....	12
Obr. 1.3: Oddělení signálů od digitálního potenciometru	12
Obr. 1.4: DAC s elektronickým potenciometrem.....	14
Obr. 2.1: Vnitřní struktura integrovaného obvodu LT1568	15
Obr. 2.2: Celkové zapojení LT1568 pro filtr 2. řádu.....	17
Obr. 3.1: Princip funkce digitálního dvoukanálového potenciometru TPL8002-25	22
Obr. 3.2: Modely parazitních kapacit dvou digitálních potenciometrů	25
Obr. 3.3: Simulační obvod pro testování vlivu par. kapacit digitálního potenciometru.....	25
Obr. 3.4: Citlivostní analýza pro DP 2.řádu, $f_m = 1\text{MHz}$, But. aproximace, $A=1$	27
Obr. 3.5: Citlivostní analýza pro DP 2.řádu, $f_m = 10\text{MHz}$, But. aproximace, $A=1$	27
Obr. 3.6: Přenos dat po sběrnici I2C(převzato z [8]).....	28
Obr. 3.7: Struktura řízení AD5258 na sběrnici I2C.....	28
Obr. 3.8: Příklad použití sběrnice I ² C při zápisu do registru paměti EEPROM.....	29
Obr. 3.9: Bloková struktura komunikačního řetězce.....	29
Obr. 4.1: Základní zapojení ATmega32 s periferiemi.....	31
Obr. 4.2: Maticová klávesnice.....	32
Obr. 4.3: Výběr 6. digitálního potenciometru	35
Obr. 4.4: Zadávání hodnot odporu digitálního potenciometru	35
Obr. 5.1: Zapojení LT1568.....	55
Obr. 5.2: Přenos dat po sběrnici I ² C	56
Obr. 5.3: Výběr 6. digitálního potenciometru	57
Obr. 5.4: Zadávání hodnoty odporu digitálního potenciometru	57

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Hodnoty rezistoru R	18
Tab. 2.2: Naladění jednotlivých obvodů	19
Tab. 2.3: Ohmická hodnota jednotlivých rezistorů[[3]	19
Tab. 3.1: Adresa zařízení AD5258 na sběrnici I2C.....	28
Tab. 3.2: Popis instrukčního bytu AD5258 na sběrnici I2C.....	28
Tab. 4.1: Seznam používaných funkcí.....	32
Tab. 4.2: Seznam používaných funkcí pro I ² C	33

ÚVOD

S kmitočtovými filtry se setkáváme dnes a denně v rozmanitých oblastech elektrotechniky a v mnoha elektronických aplikacích. V radiotechnice se můžeme často setkat s pásmovými propustmi pro výběr přijímaných signálů, dále s dolními a horními propustmi určenými pro rozdělení kmitočtových pásem v anténních obvodech apod. V elektroakustice se velmi často využívají korekční filtry (nastavitelné korektory hloubek, výšek, pásmové korektory, korektory kmitočtových charakteristik dynamických přenosů magnetofonových hlav), různé typy filtrů v systémech omezení šumu (Dolby apod.). Dolní, horní a pásmové propusti tvoří kmitočtové výhybky pro reproduktorové soustavy (pasivní i aktivní). V oblasti elektronické hudby se využívají i různé filtry pro zbarvení zvuku a realizaci zvláštních zvukových efektů. Vzhledem k složitosti a rozmanitosti jednotlivých realizací filtrů není možné se zaměřit na všechny možné typy filtrů. Analogový filtr se nejčastěji popisuje pomocí modulové (amplitudové) kmitočtové charakteristiky (závislost modulu napěťového přenosu na kmitočtu). Dá se ovšem popisovat pomocí jiných charakteristik. A to např. časové zpoždění signálu, což je důsledek fázových posuvů (zpoždění) procházejících harmonických kmitočtových složek signálu.

Hlavním cílem bakalářské práce je vytvořit plně digitálně řízený aktivní filtr v pásmu kmitočtů od 1 MHz do 10 MHz. Hlavním obvodovým prvkem, který bude pro tvorbu multifunkčního filtru využit je integrovaný obvod LT1568 od firmy Linear Technology. Tento umožňuje pomocí externích rezistorů libovolně konfigurovat výslednou přenosovou charakteristiku filtru s ohledem na nastavený mezní kmitočet, požadovaný činitel jakosti či aproximační funkci filtru. Samotný obvod lze konfigurovat jako dva nezávislé filtry 2. řádu či jeden filtr 4. řádu. Realizovat lze filtr typu dolní propust a pásmová propust v rozsahu přeladitelných mezních frekvencí filtru od 200 kHz do 10 MHz. Tato problematika se jeví z pohledu využití pouze pasivních externích součástek jako velmi jednoduchá. Pro konstrukci plně digitálně (elektronicky) řízeného filtru je možné uvážlivě zvolit vhodné typy D/A převodníků, které dosahují poměrně vysokých hodnot rozlišení nejmenšího kroku (více než 12 bitů) ovšem za cenu vyšší celkové obvodové složitosti a často však disponují velmi malou hodnotou parametru určujícího maximální frekvenci (šířku pásma) pro pokles signálu o 3 dB. Často je tento parametr v konstrukčních a katalogových listech označován jako BW_{3dB} . Velmi dobrou alternativou využitou i při řešení tohoto projektu jsou jejich upravené ekvivalenty umožňující přímo číslicově řídit hodnotu odporu na výstupu součástky označované jako digitální potenciometry. Tyto prvky jsou hojně využívány v nízkofrekvenčních aplikacích jakou jsou hudební zesilovače, napájecí zdroje apod. Pro využití na vyšších frekvencích cca nad 1 MHz je nutné uvážlivě zvolit typ digitálního potenciometru a zvolit nejvhodnější implementaci do samotného obvodu. Této problematice bude věnována experimentální část projektu zaměřená na výzkum parazitních kapacit, které se u těchto obvodů objevují. Hlavní výstupní část bakalářské práce tak bude tvořit plně digitálně řízený multifunkční filtr včetně hardwarového a softwarového vybavení. Úvodní část bakalářské práce je zaměřena na rozdělení digitálních potenciometrů, ukázka možné aplikace a na popis zvoleného integrovaného obvodu. Vhodnými simulacemi a experimentálními výsledky jsou ověřeny a diskutovány základní vlastnosti filtračního obvodu v zapojení se standardními pevnými externími rezistory a digitálními potenciometry obsahující parazitní vlivy. Prostřední část bakalářské práce obsahuje rozbor a návrh koncepce pro digitální řízení obvodu pomocí externích digitálních potenciometrů včetně programového vybavení. Poslední část je zaměřena na praktické měření laboratorního přípravku. V příloze projektu lze nalézt konstrukční podklady jak pro tvorbu jednoduchého konstrukčního přípravku k otestování zvoleného integrovaného obvodu, tak i pro tvorbu laboratorního přípravku. Dále tam lze nalézt část programového kódu.

1 POPIS ZÁKLADNÍCH VLASTNOSTÍ DIGITÁLNÍHO POTENCIOMETRU

Tato kapitola je určena pro popis základních vlastností digitálních potenciometrů, rozdělení jak podle odporové dráhy, kontroly a zapouzdření. Bude popsána i metoda omezení rušení digitálních potenciometrů, pokud komunikační sběrnice bude využívána i pro komunikaci s jinými obvody. V neposlední řadě bude ukázána aplikace digitálního potenciometru v převodníku digitálního signálu na analogový.

1.1 Základní popis

Zajímavým prvkem pro elektronické řízení filtru je digitální potenciometr. Hodí pro elektronické systémy, které požadují kontrolu proudu, napětí, odporu, zisku a frekvence. Digitální potenciometr nabízí v současné době několik firem, např. Texas Instrument, Analog Devices, Maxim, Xicor a Microchip. Snahou všech výrobců je přiblížit se vlastnostem běžných mechanických potenciometrů či nastavitelných rezistorů, odstranit nevýhody mechanického řešení a umožnit jejich plnohodnotné nahrazení. Mezi největší výhody digitálních potenciometrů patří digitální nastavování a absence mechanických částí, která zvyšuje spolehlivost a zamezuje vzniku špatného kontaktu mezi odporovou dráhou a jezdcem. Rovněž změna polohy jezdce není doprovázena rušivými vlivy. Náhradou běžných potenciometrů digitálními se ušetří místo, neboť jsou vyráběny v pouzdrech jako integrované obvody. Ovládání digitálních potenciometrů probíhá po komunikační sběrnici, a to pomocí rozhraní SPI, I2C, Up & Down. Digitální potenciometry se dělí podle několika kritérií: odporová dráha – lineární nebo logaritmická,

počet kanálů v jednom pouzdře – jeden až šest

šířka pásma pro pokles o 3dB – nejčastěji desítky KHz a jednotky MHz

rozhraní – nejčastěji SPI, I²C, Up & Down,

paměť odporové dráhy – závislá na napájecím napětí (volatile) nebo nezávislá (non-volatile),

počet kroků jezdce – bývá od 32 do 1024 kroků,

odpor dráhy – je od 1k Ω do 200k Ω (záleží podle výrobce),

tolerance nastaveného odporu – bývá 20 až 30%,

odpor jezdce – bývá od 65 do 5000 Ω ,

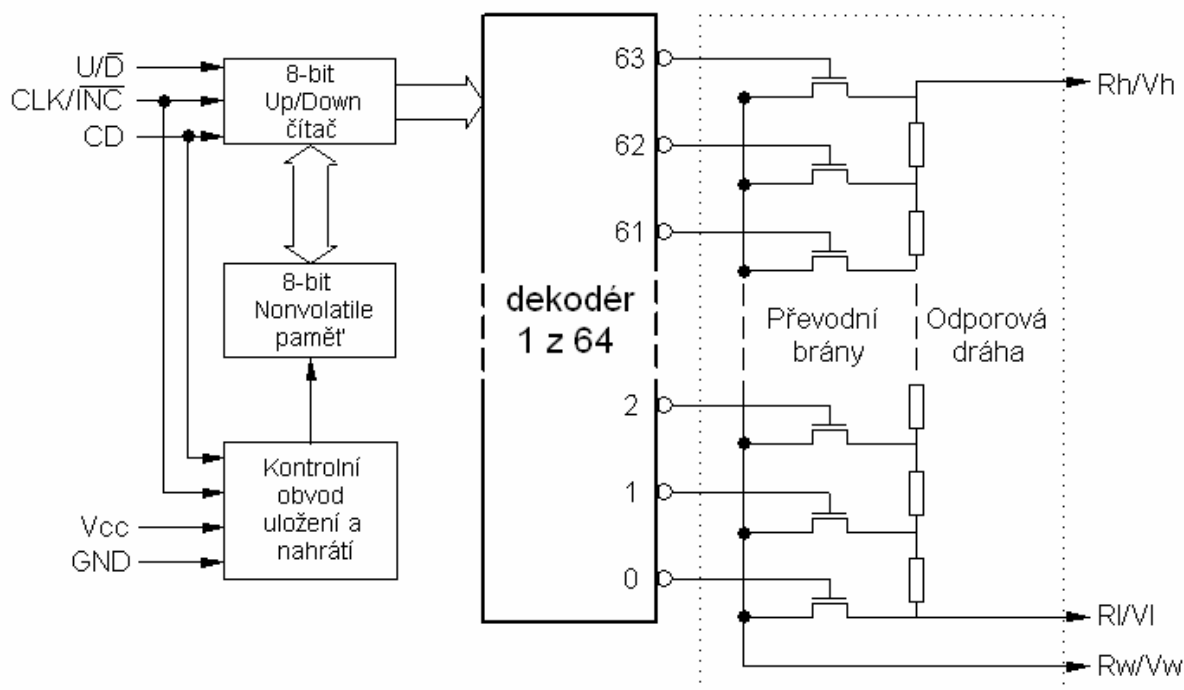
napájecí napětí a proud – od 2,75 až 16V a proud v jednotkách nebo v desítkách μ A,

pouzdro – MSOP, TSSOP, TSOT-23,...

Dnešní digitální potenciometry mají paměť pro uložení pozice jezdce a užitečné funkce, jako například registr obsahující zkrácené příkazy pro jednodušší manipulaci s vícekanálovým potenciometrem. Může být použit v aplikacích pro kalibraci různých zařízení.

Na obr 1.1 je naznačena základní struktura digitálního potenciometru. Tento potenciometr má 64 pozic. Je řízen pomocí rozhraní UP/DOWN [14]. V tomto případě jsou užity tři vstupní kontrolní signály INC, CS a U/D. vstup INC je vstup ovládající polohu jezdce. Přejít z vysoké úrovně (H) do nízké úrovně (L) způsobí zvýšení nebo snížení polohy jezdce v závislosti na stavu CS a U/D. Vstup CS je rozpoznávací vstup při užití více potenciometrů. Zatímco je na L, pozice jezdce může být měněna pomocí INC a U/D. Vstup U/D je kontrolní up/down vstup. Když je na H, přechod vstupu INC z H do L způsobí zvýšení pozice jezdce. A když je na L, přechod vstupu INC z H do L způsobí snížení pozice jezdce.

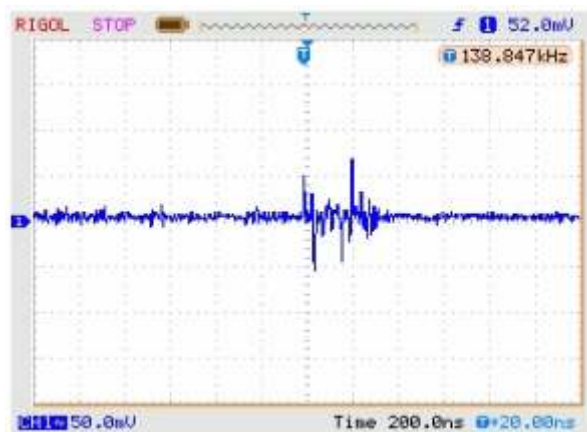
Tento typ digitálního řízení je velmi podobné SPI. Vstup CS vykonává stejnou funkci. Vstup INC je nahrazen vstupem CLK. Ve většině případů je přenesen řídicí byte, který obsahuje číslo pozice jezdce a také výběr kanálu při použití vícekanálového potenciometru. Rozhraní I²C používá dva vodiče – SCL a SDA. SCL je hodinový vstup, který slouží pro synchronizaci vysílajícího zařízení a digitálního potenciometru. Je ekvivalentní se vstupem CLK. Vstup SDA je datový vstup. Základní struktura obsahuje 64-bitový čítač. Výstup čítače je poslán na vstup D/A převodníku (DAC). Výstup DAC je pak použit pro výpočet páru rezistorů. Dvojice rezistorů potenciometru potom použijí výstupní napětí DAC při určování jejich vlastní hodnoty odporu. Dynamické a statické vlastnosti DAC jsou velmi podobné digitálnímu potenciometru. Každý digitální potenciometr obsahuje parazitní vlivy, které mohou ovlivnit vlastnosti celé aplikace, např. přenos filtru. Mezi tyto parazitní vlivy patří parazitní kapacita mezi vývodama Rh, RI, Rw a zemí. Dále je při nastavování hodnoty odporu digitálního potenciometru počítat s nenulovým odporem jezdce a tolerancí nastavené hodnoty. Tyto vlastnosti se mění v závislosti na pozici jezdce. Více o tom bude pojednáno v kapitole 3.



Obr. 1.1: Základní struktura digitálního potenciometru

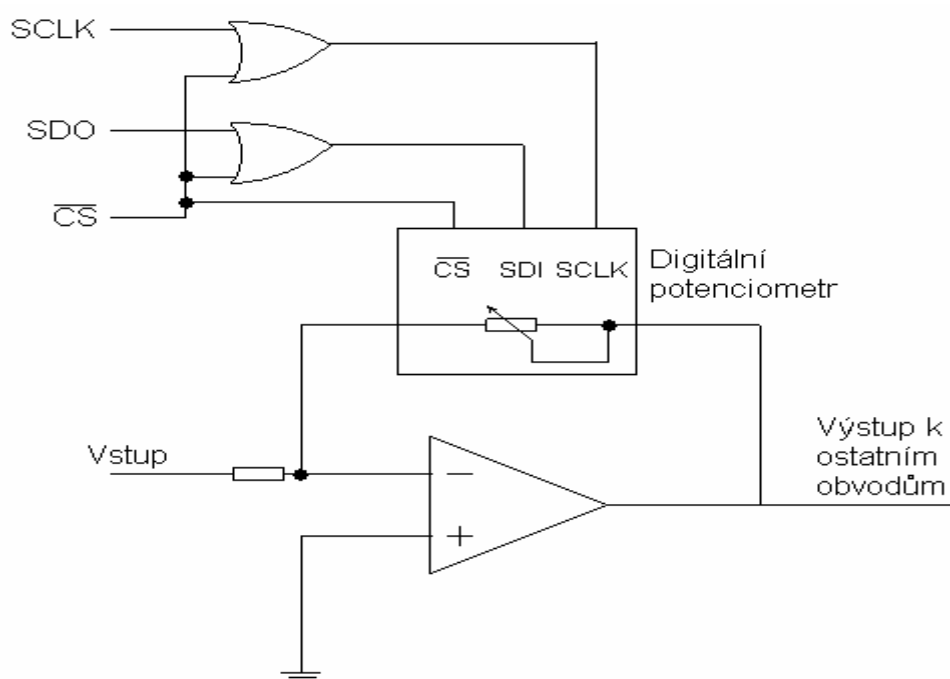
1.2 Omezení rušení digitálního potenciometru

Nejčastěji podporovanou sběrnici je sériové periferní rozhraní - SPI, ale dostupné jsou i obvody s I2C nebo Up & Down. Zde se však může objevit vážný problém, protože uvedené sběrnice se obvykle využívají i pro komunikaci s jinými obvody. Neustále probíhající komunikace se pak vlivem nedokonalosti ochranných prvků na pinech digitálního potenciometru může snadno přenést i do rozvodu napájení a odtud má vzniklý digitální šum jen kousek do analogového signálu. Podobná situace nastává i v případě, kdy se datové signály vedou k potenciometru příliš blízko jeho analogovým pinům. Může nastat situace, která je vyobrazena na obr. 1.3 – převzato z [15].



Obr. 1.2: Zvlnění analogového signálu od komunikace na SPI sběrnici

Řešení uvedeného problému je velice snadné, viz obr.1.2. Spočívá v oddělení signálů SCLK a SDO SPI sběrnice od digitálního potenciometru, k čemuž je možné využít dvě hradla typu OR. Výsledkem je, že k obvodu potenciometru se v tuto chvíli dostanou signály SCLK a SDI pouze tehdy, kdy je výběr obvodu (pin -CS) v nule, tedy aktivní.



Obr. 1.3: Oddělení signálů od digitálního potenciometru

Jednoduchým doplněním dvou hradel tak můžeme rychlé signály sběrnice udržet během normálního provozu stranou od analogových obvodů a potenciál na jejich datových pinech se mění vždy pouze tehdy, kdy s daným obvodem opravdu komunikujeme. Uvedený systém je samozřejmě účinný pouze tehdy, kdy jsou na danou sběrnici připojeny i jiné obvody a komunikace s digitálním potenciometrem probíhá jen občas. Tedy například pouze pro inicializaci systému.

1.3 Aplikace digitálního potenciometru

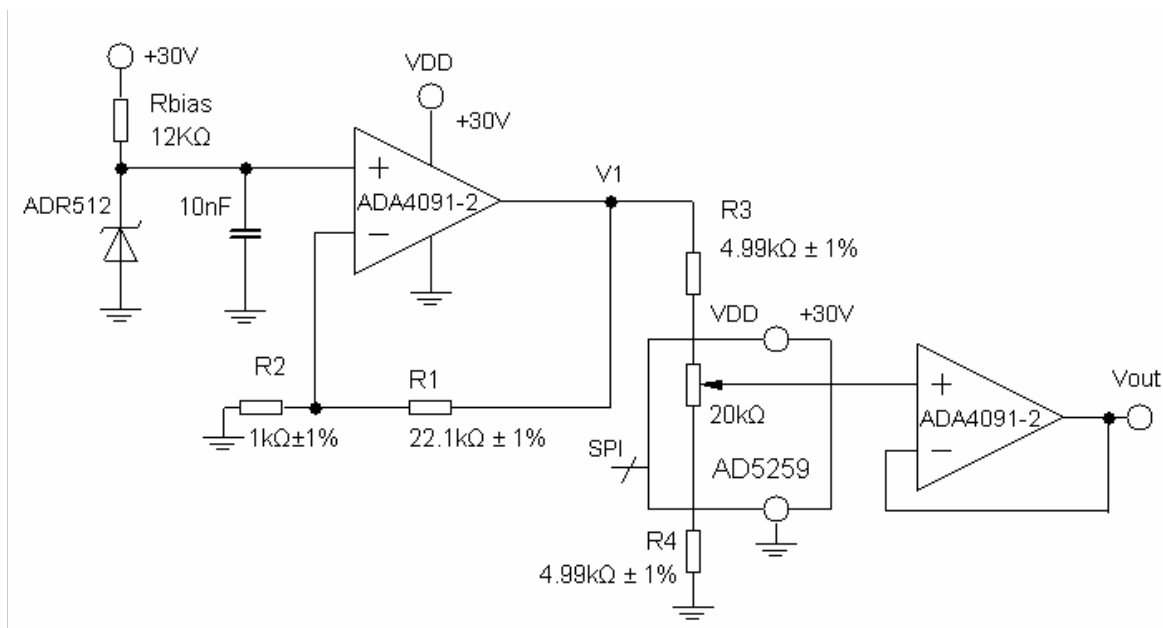
Aplikací digitálního potenciometru je velmi mnoho. V této práci bude zaměření na aplikaci digitálního potenciometru v analogovém filtru 2. nebo 4. řádu. V této kapitole je rozebírána další možnost aplikace, a to jako návrh DAC obvodu pro vysoká napětí s použitím elektronického potenciometru. Obvod využívá součástek Analog Devices pro dosažení přesnosti lepší než 1%.

Schéma [15] na obr. 1.4 nabízí levné řešení vysokonapětového DAC s elektronickým potenciometrem AD5292, členem rodiny digiPOT+ firmy Analog Devices. Dále je zde použit dvojitý operační zesilovač ADA4091-2 a zdroj referenčního napětí od téže výrobce typu ADR512. Uvedené zapojení nabízí rozlišení 10 bitů a rozsah výstupního napětí 0 až 30 V s možností zatížení proudem až ± 20 mA. Obvod AD5292 je konfigurovatelný prostřednictvím rychlého sériového rozhraní SPI. Rozsah výstupního napětí V_{OUT} DAC převodníku je možné libovolně omezit sériovým zařazením 1% rezistorů R_3 a R_4 do série s obvodem AD5292. Tím je dosaženo maximální rozlišení (tedy 10 bitů) pouze v požadovaném rozsahu, obdobně jako i klasických potenciometrů. Krom toho je možné využít 20x programovatelnou interní paměť obvodu AD5292 a definovat tak hodnotu V_{OUT} při zapnutí napájení. Uvedené zapojení poskytuje přesné výstupní napětí s nízkým šumem a nízkou teplotní závislostí, vhodné i pro automatizované digitální kalibrační aplikace apod. Popis obvodu je následující: schématický obvod využívá digitálního potenciometru AD5292 ve spojení s referencí ADR512 a komparátory ADA4091-2 pro vytvoření levného 10-bitového DAC pro vysoké napětí. Obvod zaručuje monotonii, ± 1 LSB DNL a typickou integrální nelinearitu INL ± 2 LSB. Přesné referenční napětí je z vysokého napájecího napětí tvořeno sériovou referencí ADR512, za kterou následuje neinvertující operační zesilovač, jehož zisk je stanoven poměrem hodnot rezistorů R_1 a R_2 . Obvod ADR512 zde vytváří napětí rovné 1,200 V s velice nízkým teplotním driftem, vysokou přesností a ultra nízkým šumem. Maximální hodnota rezistoru R_{BIAS} , který zajišťuje minimální provozní proud ADR512 je definován následující (1.1) rovnicí [15]

$$R_{BIAS} = \frac{V_{DD} - 1,2V}{0,001A}. \quad (1.1)$$

ADA4091-2 je dvojitý operační zesilovač, nabízející kompenzaci nízkého napětí a výstup typu rail-to-rail. ADR512 v kombinaci s ADA4091 poté nabízí nízkou teplotní závislost a šum výstupního napětí. Rezistory R_1 a R_2 nastavují zisk prvního operačního zesilovače U1A. Jeho výstupní napětí V_1 definuje maximální výstupní rozsah V_{OUT} . Rovnice (1.2) je určena pro výpočet hodnot těchto rezistorů.

$$V_1 = 1,2 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right). \quad (1.2)$$



Obr. 1.4: DAC s elektronickým potenciometrem

Jsou použity rezistory pro nastavení zisku s hodnotou 23,1 z čehož plyne hodnota $V_I = 27,72$ V. Toto napětí je možné použít i pro napájení dalších obvodů systému s maximálním celkovým odběrem 17 mA. Pro zlepšení přesnosti obvodu může být referenční napětí pro AD5292 sníženo pomocí již uvedených externích, sériově zařazených rezistorů R3 a R4. Zde obvod poskytuje 10-bitové rozlišení v omezeném rozsahu výstupního napětí (jedná se tedy o posun DAC) a tedy i vyšší absolutní rozlišení. Běžně používané digitální potenciometry mají až ± 20 % toleranci své skutečné hodnoty, což v konečném zapojení naprosto ruší preciznost navazujících prvků. Špičkové elektronické rezistory určené pro průmyslové aplikace jsou však již z výroby kalibrovány a dosahují maximální odchylky hodnoty odporu pouze $\pm 1\%$.

V tomto případě je $V'_1 = 24,85$ V a $V'_2 = 23,11$ V. Ekvivalentní rozlišení, vypočteno podle (1.3) posouvá DAC v poměru k celkovému referenčnímu napětí V_I (bráno v potaz snížení o 1 LSB v čitateli zlomku)

$$\text{Rozlišení} = \log_2 \left(\frac{V_I}{\frac{V'_1 - V'_2}{1024}} \right) = 14 \text{ bitů.} \quad (1.3)$$

V aplikaci lze také využít již zmíněnou, 20x programovatelnou interní paměť pro nastavení výchozí hodnoty DAC při zapnutí napájecího napětí. Pro dosažení uvedených parametrů je samozřejmě potřeba dodržet zásady návrhu kombinovaných, analogově/digitálních obvodů a zajistit dostatečně kvalitní napájení a zem. Jako naprosté minimum je zde samozřejmě uvažováno použití 4-vrstvé desky s plošnými spoji a použití jedné vrstvy jako zemní, druhé pro rozvod napájení a dalších dvou pouze signálních.

2 INTEGROVANÝ OBVOD LT1568

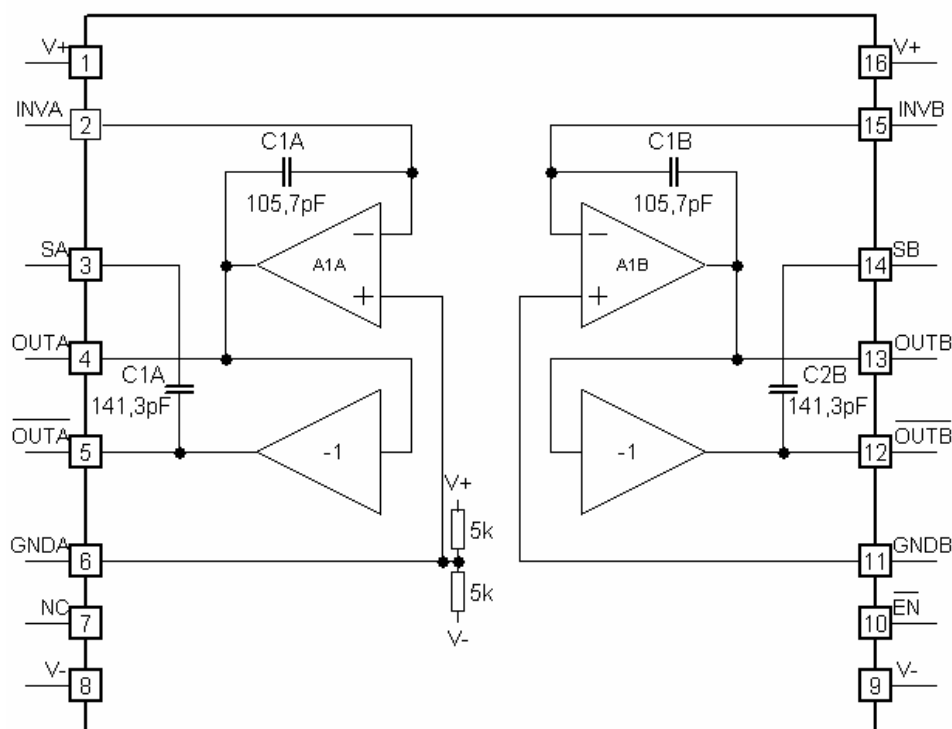
Tato kapitola popisuje základní vlastnosti integrovaného obvodu LT1568 [3] od firmy Linear Technology. Popsány jsou základní parametry obvodu, jeho vnitřní struktura, popis funkce jednotlivých pinů, konfigurace obvodu pomocí vnějších rezistorů využitelná i pro digitální řízení obvodu.

2.1 Základní vlastnosti a vnitřní struktura

Jedná se o ARC filtr, který obsahuje dva libovolně konfigurovatelné aktivní bloky 2. řádu. Mezní frekvence filtru je přeladitelná v rozsahu frekvencí od 200 kHz do 10 MHz. Filtr lze nastavit buď jako DP nebo PP. Dá se použít jako náhrada ARC filtrů s diskretními prvky. Další použití by mohlo být jako antialiasingový/rekonstrukční filtr.

Napájecí napětí je od 2,7V do 11V (napěťový režim single supply), je ale možno zapojení doplnit dvěma Schottkyho diodami, pak napájecí napětí bude $\pm 5V$ (napěťový režim dual supply). Filtr lze velmi snadnou konfigurovat pomocí externích rezistorů, podrobný popis je uveden v kapitole 2.3.

Z vnitřní struktury uvedené na **obr.2.1** je zřejmá konstrukce filtru. Filtr se skládá ze dvou dílčích bloků (**sekce A,B**). Každá sekce se skládá z jednoho operačního zesilovače, invertoru, dvou kapacit a rezistorového děliče – ten se využívá pro nastavení polovičního referenčního napětí v napájecím režimu single.



Obr. 2.1: Vnitřní struktura integrovaného obvodu LT1568

2.2 Funkce jednotlivých pinů

V+ (1,16): Jedná se o kladné napájení. Piny 1 a 16 by měly být spojeny dohromady a spojeny se zemí s $0,1\mu\text{F}$ kondenzátorem. Spoje by měly být co nejkratší.

INVA, INVB (2,15): Jsou to vstupy, který jsou spojeny s invertujícím vstupem daného zesilovače. Každý z těchto vstupů má vysokou impedanci a jsou náchylné k propojení nechtěných signálů. Vnější parazitní kapacity na INVA a INVB uzlech mají vliv na modulovou frekvenční charakteristiku filtru. Proto spoje k INVA a INVB pinům musí být co nejkratší.

SA, SB (3,14): Jsou to sumační piny – sumační uzly pro vstupní signály. Parazitní kapacita na SA a SB pinu mohou opět vyvolat chyby v modulové frekvenční charakteristik. A to hlavně v oblasti f_m nebo f_o . Tři ladící externí rezistory pro každý z dílčích filtrů by měly být co nejblíže k pinu SA a SB, aby parazitní kapacita byla co nejmenší. Jeden pF může vyvolat 0.1% frekvenční chybu.

OUTA, OUTB (4,13): Jsou to výstupy daných OZ. Každý výstup je navržen pro nominální síťovou zátěž 400Ω a 30pF .

$\overline{\text{OUTA}}, \overline{\text{OUTB}}$ (4,13): Jsou to výstupy invertorů, takže je to invertovaná verze OUTA a OUTB. Opět každý výstup je navržen pro nominální síťovou zátěž 400Ω a 30pF .

GNDA (6): Slouží jako referenční napětí pro sekci A. Při duálním napájení měl by být propojen s analogovou zemí. Při single napájení, ve kterém vnitřní dělič vytvoří poloviční referenční napětí, musí být GNDA propojeno s V- s $0,1\mu\text{F}$ kondenzátorem.

NC (7): Tento pin není vnitřně propojen, takže může být propojen se zemí.

V-(8,9): Je to záporné napájení. Piny 8 a 9 by měly být spojeny dohromady. V duálním napájení by měly být spojeny se zemí s $0,1\mu\text{F}$ kondenzátorem. V single napájení by měly být přímo propojeny se zemí.

$\overline{\text{EN}}$ (10): Znamená ENABLE. Když EN přejde na vysokou úroveň nebo je rozpojena propojka, tak LT1568 přejde do vypnutého stavu s redukováným napájecím proudem přibližně $0,5\text{mA}$. Výstupy OUTA, OUTB, $\overline{\text{OUTA}}$ a $\overline{\text{OUTB}}$ přejdou do stavu vysoké impedance. Pokud bude přiveden signál do kompletního obvodu, zatímco LT1568 bude ve vypnutém stavu, tak nějaký signál projde na výstup skrz pasivní součástky kolem neaktivního LT1568.

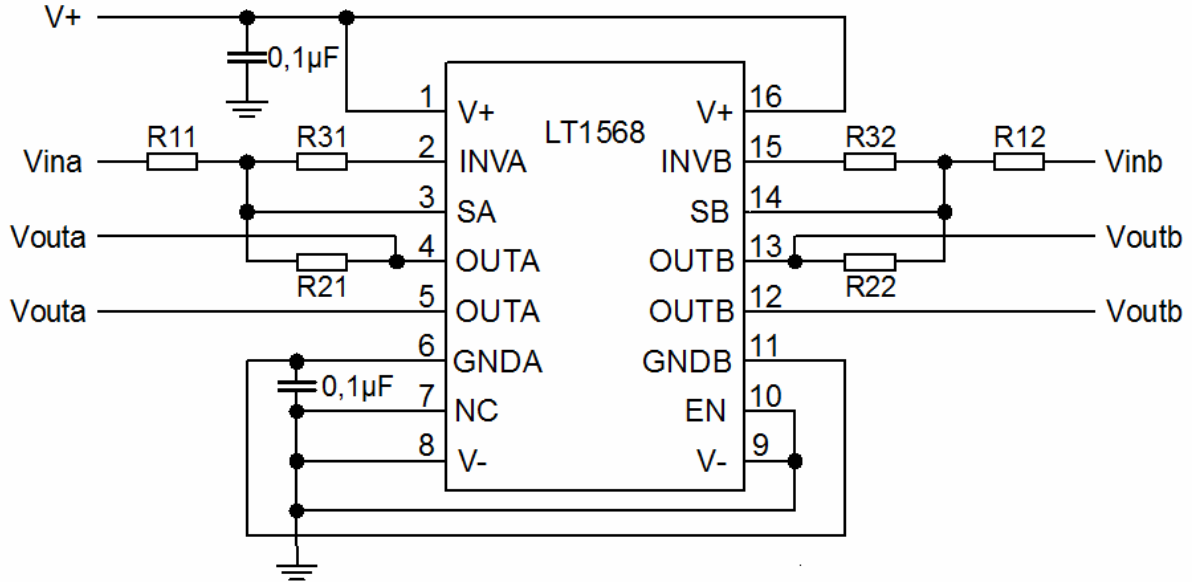
GNDB (11): Slouží jako referenční napětí pro sekci B. Při duálním napájení měl by být propojen s analogovou zemí. Při single napájení může být GNDB spojen s GNDA k nastavení společného poloviční referenční napětí. Se zemí propojeno s $0,1\mu\text{F}$ kondenzátorem.

2.3 Řízení LT1568

U každé sekce se její příslušná mezní frekvence f_m nastavuje pomocí tří vnějších rezistorů. Na základě toho může vzniknout filtr typu DP 2.řádu nebo 4. řádu, je možné přeladit i na PP. Pro vznik DP 4. řádu se musí propojit Vouta s Vinb, výstup filtru je Voutb. Pro vznik PP se ještě musí přidat místo rezistoru $R11$ a $R12$ kondenzátory $C1$ a $C2$ o 39pF . Přenosová funkce se

aproximuje za použití Butterworthovy, Čebyševovy nebo Besselovy aproximace. PP nepoužívá žádnou aproximaci. Celkem lze tedy naladit 7 možností filtrace.

Na **obr. 2.2** je celkové zapojení filtru. Filtr je zapojen v napájecím režimu single. Pro zapojení napájecího režimu dual se využijí dvě Schottkyho diody s sérii zapojené které budou propojovat piny V- a V+. Výstup 1. diody a zároveň vstup 2. diody bude uzemněn.



Obr. 2.2: Celkové zapojení LT1568 pro filtr 2. řádu

Pro jednotlivé sekce se zesílení nastavuje rezistory $R1$ a $R2$, konkrétně záleží na jejich poměru $A=R2/R1$. Dále platí vztahy [3] pro přenos $K(s)$, f_m a jakost Q

$$K(s) = \frac{OUT_{A/B}}{IN_{A/B}} = - \frac{A \cdot (2\pi f_m)^2}{s^2 + \frac{2\pi f_m}{Q} s + (2\pi f_m)^2}, \quad (2.1)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2}}, \quad (2.2)$$

$$Q = \frac{2\pi \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot f_m}{C_1 \cdot (R_1 \cdot (R_2 + R_3) + R_2 R_3) - C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}. \quad (2.3)$$

Kde $OUT_{A/B}$ a $IN_{A/B}$ znamená, jaká sekce se bere v potaz, $C1$ a $C2$ jsou vnitřní kondenzátory a $R1, R2$ a $R3$ jsou vnější nastavující rezistory. Po dosazení (2.2) a (2.3) do (2.1) přejde do

$$K(s) = - \frac{1}{s^2 + s \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 + R_1 \cdot R_3 \cdot C_1 + R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 - R_1 \cdot R_2 \cdot C_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2} + \frac{1}{R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2}}. \quad (2.4)$$

Jedna z možností přeladování je na duální DP 2.řádu podle Butterworthovy aproximace se zesílením 1, hodnoty rezistorů jsou uvedeny v **tab. 2.1**. V tomto případě $R=R_{11}=R_{21}=R_{31}$ a $R=R_{12}=R_{22}=R_{23}$. Hodnota rezistoru R se vypočítá [3]

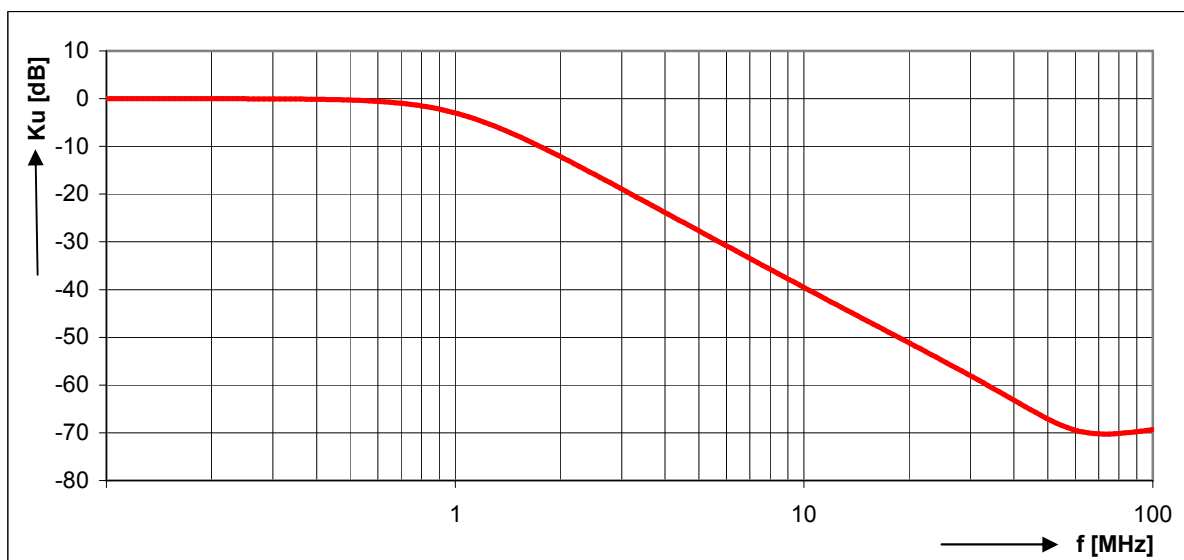
$$R = 128 \cdot \frac{10 \cdot 10^6}{f_m} \quad (2.5)$$

V rovnici číslo 128 značí základní hodnotu rezistoru. Číselník zlomku značí maximální možnou ladící frekvenci, f_m je požadovaná mezní frekvence. Základní hodnota rezistoru je modifikována podle potřeby nastavení f_m . Pro ostatní řízení (pro změnu řádu, aproximace,...) je hodnota základního rezistoru jiná a ani není konstantní jako v tomto případě.

Tab. 2.1: Hodnoty rezistoru R

f_m	$R [\Omega]$
0,2	6340
0,5	2550
1	1270
2	634
3	422
4	324
5	255
6	210
7	182
8	162
9	143
10	128

V **grafu 2.1** je simulace průběhu přenosové funkce pro $f_m=1\text{MHz}$.



Graf 2.1: Průběh přenosové funkce – Butterworthova aproximace, $f_m=1\text{MHz}$

Pokud bude potřeba naladit f_m , která je menší než 1MHz a nenachází se v návrhových tabulkách, tak se použije vztah (2.6),

$$R_{pi} = R_{i1\text{MHz}} \cdot \left(\frac{1 \cdot 10^6}{f_{pm}} \right) \quad (2.6)$$

kde R_{pi} je požadovaná hodnota rezistoru(ů), R_{i1MHz} je hodnota rezistoru(ů) na 1MHz a f_{pm} je požadovaná mezní frekvence. Pokud se f_m nachází mezi jednotlivými tabelovanými f_m , tak se použije vztah (2.7)

$$R_{pi} = R_{ixMHz} \cdot \left(\frac{x \cdot 10^6}{f_{pm}} \right), \quad (2.7)$$

kde R_{ixMHz} je rezistor(y) na nejbližší f_m a číselník zlomku je nejbližší tabelovaná f_m k f_{pm} . Všechny tabulky s hodnotami rezistorů lze nalézt v literatuře[3].

2.4 Měření a simulace LT1568

Byly sestaveny dva testovací obvody. První z nich umožňuje měnit ladící rezistory, jenže vlivem přechodů (krokosvorky) může dojít při měření k nepřesnostem. Druhý byl sestaven s pevnými rezistory, takže se předpokládá dosažení lepších výsledků. **Tab. 2.2** udává naladění jednotlivých rezistorů, **tab. 2.3** udává ohmickou hodnotu rezistorů.

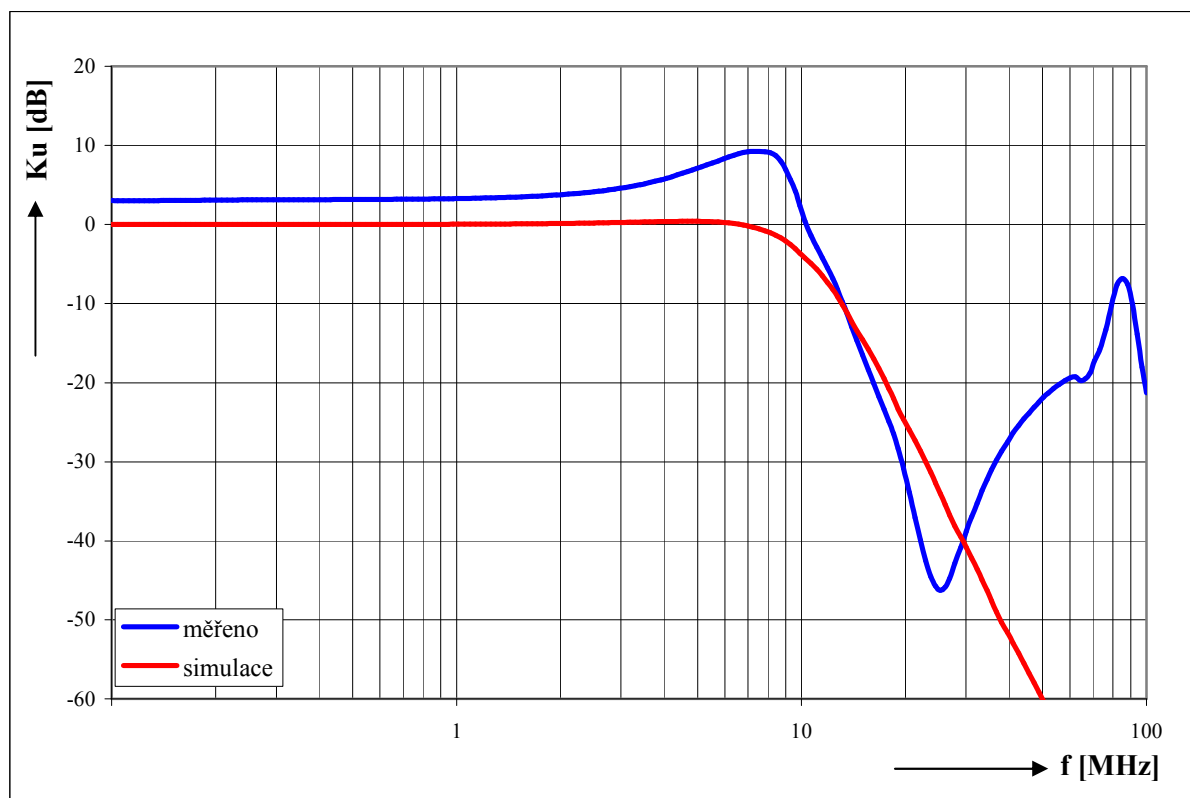
Tab. 2.2: Naladění jednotlivých obvodů

pořadí	obvod	typ	řád	f_m	aproximace	A
1.	1.	DP	2(4)	7	Čebyšev	1
2.	1.	DP	4	1	Butterworth	1
3.	1.	DP	4	5	Butterworth	1
4.	2.	DP	4	5	Butterworth	1

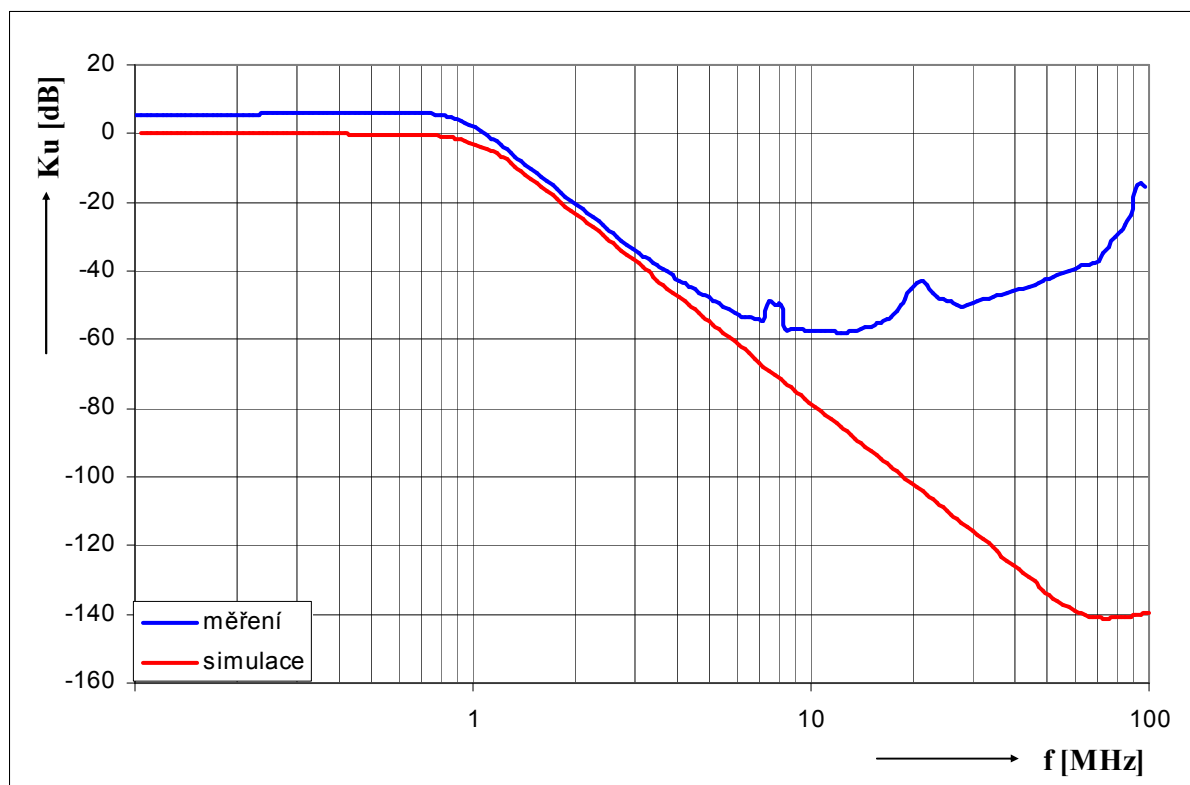
Tab. 2.3: Ohmická hodnota jednotlivých rezistorů[Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.]

pořadí	R11,R21 [Ω]	R31 [Ω]	R12,R22 [Ω]	R32 [Ω]
1.	121	118	121	118
2.	1005	1580	1820	887
3.	205	309	4348	174
4.	205	309	4348	174

Výsledky prvního měření jsou zaznamenány v **grafu 2.2**. V propustném pásmu je přenos navýšen o 4dB, bylo to způsobeno nepřesnou nastavenou hodnotou poměru rezistorů $R11$ a $R21$ (případně $R12$ a $R22$). Byly použity rezistory s tolerancí 5%. V **grafu 2.3** je výsledek druhého měření. Přibližně na 7MHz se nachází zub, který vznikl kvůli přechodům (krokosvorky). Přenos v propustném pásmu je zvýšen 5dB. V **grafu 2.4** je výsledek třetího měření. Měření bylo provedeno při malé hodnotě napájecího napětí. Přibližně při 3V se začaly projevovat parazitní vlivy tím, že útlum v nepropustném pásmu klesl cca na 35 dB v okolí 15MHz. Čtvrté měření bylo provedeno na obvodu sestaveného z pevných rezistorů, aby se eliminovali přechodové vlivy. Výsledek lze vidět **grafu 2.5**. Měření bylo prováděno při vyšším napětí než v předchozích případech, takže lze dostatečně vidět parazitní vlivy v oblasti přechodu. Schéma pro simulaci vychází z **obr 2.2**.

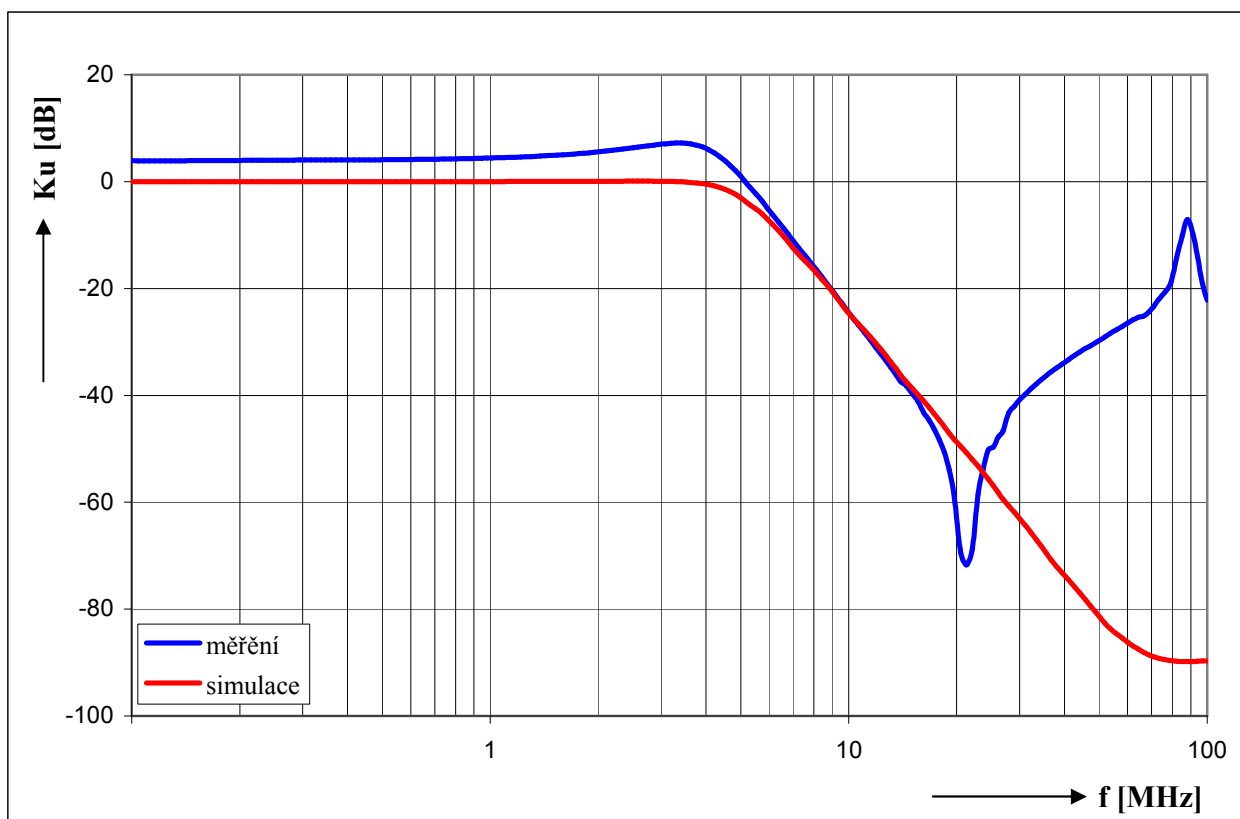


Graf 2.2: Naměřená DP
2

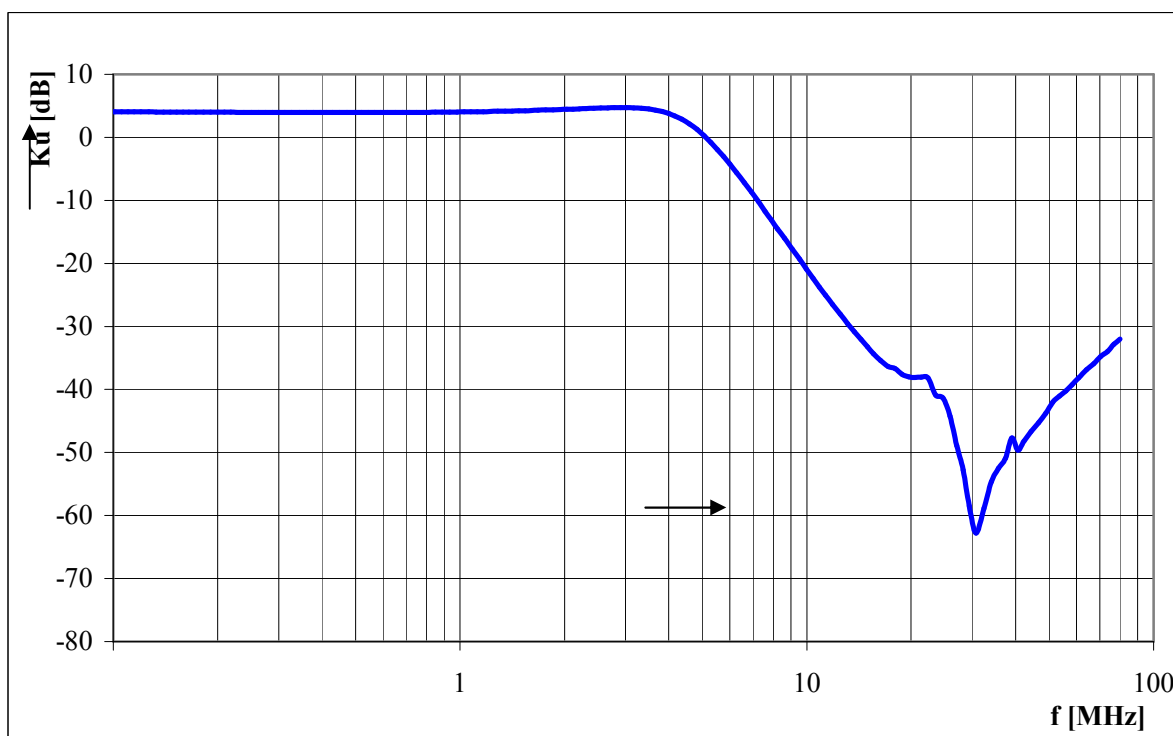


.řádu, $f_m = 7\text{MHz}$, Čebyševova aproximace, $A=1$

Graf 2.3: DP 4.řádu, $f_m = 1\text{MHz}$, Butterworthova aproximace, $A=1$



Graf 2.4: DP 4.řádu, $f_m = 5\text{MHz}$, Butterworthova aproximace, $A=1$



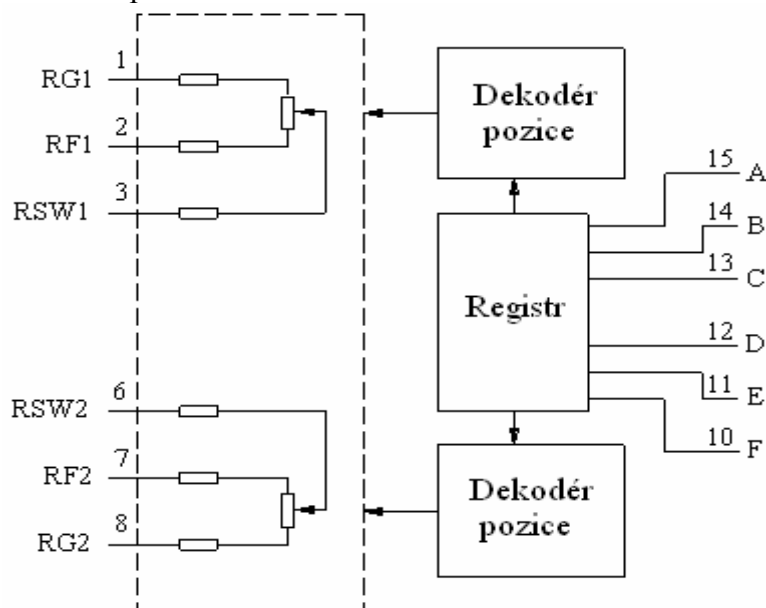
Graf 2.5: DP 4.řádu, $f_m = 5\text{MHz}$, Butterworthova aproximace, $A=1$ – s pevnými rezistory

3 DIGITÁLNÍ POTENCIOMETR AD5258 A TPL8002-25

Tato kapitola je zaměřena na základní všeobecný popis digitálního potenciometru AD5258 a TPL8002-25 a na základě požadavků je udělán výběr digitálních potenciometrů, kterým se bude provádět řízení filtru. Diskutována bude parazitní kapacita, který má nezanedbatelný vliv na správnou funkci filtru.

3.1 Základní struktura digitálního potenciometru

Princip funkce digitálního potenciometru TPL8002-25 je naznačen na **obr. 3.1**. Jestliže N je celkový počet poloh jezdce, pak mezi vývody RG a RF je sériově zapojeno $N-1$ rezistorů, které tvoří rezistorovou dráhu. Jezdec je představován vývodem RSW. Ten je pomocí elektronických spínačů připojován do rezistorové sítě podle řídicího kódu. Pro digitální řízení se používá nejčastěji třívodičová sériová sběrnice SPI, dvouvodičová I²C, méně častá je paralelní sběrnice. Tento digitální vstup je možné obsluhovat např. pomocí mikroprocesoru, ale zajímavou možností k řízení potenciometrů je i využití některého portu počítače. Pro aplikace, v nichž stačí měnit velikost rezistoru jen po nejmenších možných krocích, se vyrábějí potenciometry s řízením "nahoru - dolů". Dvěma tlačítky připojenými přímo k potenciometru se krokově mění poloha jezdce a tak se zvětšuje nebo zmenšuje hodnota rezistoru. Výhodou této metody je, že nevyžaduje přídatné číslicové obvody pro generování a zavádění digitálního slova po sběrnici.



Obr. 3.1: Princip funkce digitálního dvoukanálového potenciometru TPL8002-25

Poloha jezdce (rozlišovací schopnost) bývá mocnina dvou – 32, 64, 128, 256, 512 a 1024 – v dnešní době nejvyšší rozlišovací schopnost. Potenciometry s malou rozlišovací schopností se dají využít např. k řízení kontrastu LCD displeje. S velkou rozlišovací schopností se můžou využít např. v audio aplikacích. Výrobci nabízejí potenciometry s odporem dráhy 1kΩ, 2,5kΩ, 5kΩ, 10kΩ, 25kΩ, 50kΩ, 100kΩ, 200kΩ, 1MΩ. Mezi největší nevýhody je to, že k nastavovanému odporu je nutné i připočíst odpor jezdce a vnitřních přepínačů. Přesnost odporu dráhy se pohybuje mezi 20 - 30 %. To by ale nemělo být na závadu, neboť si lze změřit u každého kusu skutečnou hodnotu odporu dráhy a vzhledem k té

pak s pomocí číslicové korekce nastavovat při řízení příslušné hodnoty. Díky tomu, že výrobci zaručují vysokou linearitu převodu čísla na odpor, lze poměrně přesně vypočítat nastavenou hodnotu odporu. Nelinearita převodu bývá obvykle menší než LSB.

Součástí většiny potenciometrů je i paměť pro uložení poslední pozice jezdce nezávislá na napájecím napětí (Non-Volatile) , která se z této paměti načte při zapnutí napájení nebo při aktivaci k tomu určeného vstupu. Podobně probíhá ukládání do paměti, a to buď při vypnutí nebo na základě signálu z vnějšku.

Při řízení filtrů je často zapotřebí zajistit souběh hodnot odporů u dvou nebo více potenciometrů. V těchto případech je výhodné použít vícenásobné potenciometry v jednom pouzdře. Vyrábí se dvojité, trojitě i čtyřnásobné typy. U nich bývá zaručena vzájemná odchylka velikostí odporů dráhy řádově na desetiny procenta.

Při rozhodování o možnosti použití digitálních potenciometrů ve filtrech jsou důležité jejich frekvenční vlastnosti. Potenciometry mají omezenou šířku propustného pásma způsobenou především parazitními kapacitami rezistorové sítě a elektronických spínačů. Tyto kapacity, dosahující hodnot až 60 pF, mohou při připojení k OZ ve filtru způsobit nežádoucí změny kmitočtové charakteristiky nebo i oscilace obvodu.

Napájení digitálních potenciometrů je možné dvěma způsoby. První způsob je nesymetrické napájení a druhý způsob je symetrické napájení. U nesymetrického napájení může být na jeho třech vývodech pouze kladné napětí od nuly do hodnoty o něco nižší než je velikost napájecího napětí. Bude ale zpracováván signál obojí polarity, tak je potřeba symetrické napájení, který musí mít rozsah napětí přivedeného na potenciometrické svorky o něco nižší, než je rozmezí mezi záporným a kladným napájecím napětím. Následující specifické parametry [] těchto obvodů jsou: – **Absolutní linearita**

– **Relativní linearita**

– **Hodnota nastavovaného odporu**

Absolutní linearita je definována jako rozdíl mezi měřenou hodnotou napětí na běžci potenciometru V_m (měřená) a očekávanou hodnotou tohoto napětí $V_{o\check{c}}$. Je udávána jako část nejmenšího možného kroku (MI). Lze ji vyjádřit jako

$$AL = \frac{(V_m - V_{o\check{c}})}{MI}. \quad (3.1)$$

Relativní linearita je naměřená chyba mezi dvěma sousedními polohami potenciometru vztažená také k minimálnímu možnému kroku potenciometru.

$$RL = \frac{V(n+1) - V(n)}{MI}. \quad (3.2)$$

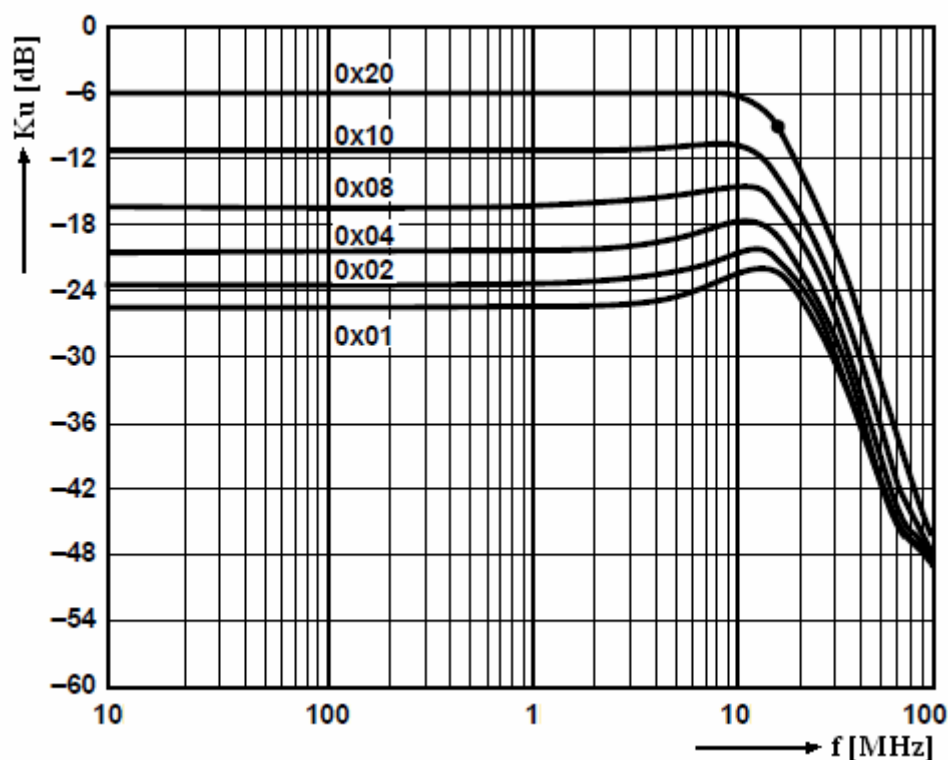
Hodnota nastavovaného odporu se určuje dle následujícího vztahu, který v sobě zahrnuje i nezanedbatelný odpor jezdce R_W

$$R_{WB}(D) = \frac{D}{N} \cdot R_{AB} + R_W, \quad (3.3)$$

kde D je decimální hodnota pozice, která je obvykle udávána v binárním kódu, N je rozlišovací schopnost, R_{AB} nominální odpor mezi koncovými body potenciometru a R_W je odpor jezdcy potenciometru a zároveň zahrnuje i odpor vnitřních přepínačů.

3.2 Limitující faktory

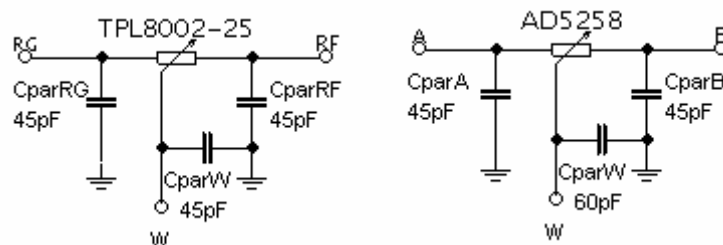
Za hlavní limitující faktor se dá uvažovat u digitálního potenciometru jejich použitelnost s ohledem na maximální dosažitelnou frekvenci určenou při poklesu přenosu o 3dB. Vzhledem k tomu, že obvod pracuje na vyšších frekvencích, tak výběr digitálního potenciometru z nabídky nejrozličnějších výrobců se razantně zužuje. S ohledem na tento požadavek vyhovují digitální potenciometry dvoukanalového TPL8002-25[6] od firmy Texas Instruments a čtyřkanalového AD5258[7] od firmy Analog Device. První má maximální dosažitelnou frekvenci dle datasheetu 8MHz, druhý, jak lze vyčíst z **grafu 3.1**, má cca 10,5 MHz. Bude využit celý kmitočtový rozsah digitálních potenciometrů. Dalším faktorem, který ovlivňuje výsledný maximální frekvenční dosah je také počet kanálů v jednom pouzdře a typ zvolené integrace s ohledem na množství integrovaných prvků jako např. další paměť apod.



Graf 3.1: Frekvenční závislost přenosu při nastaveném dělicím poměru

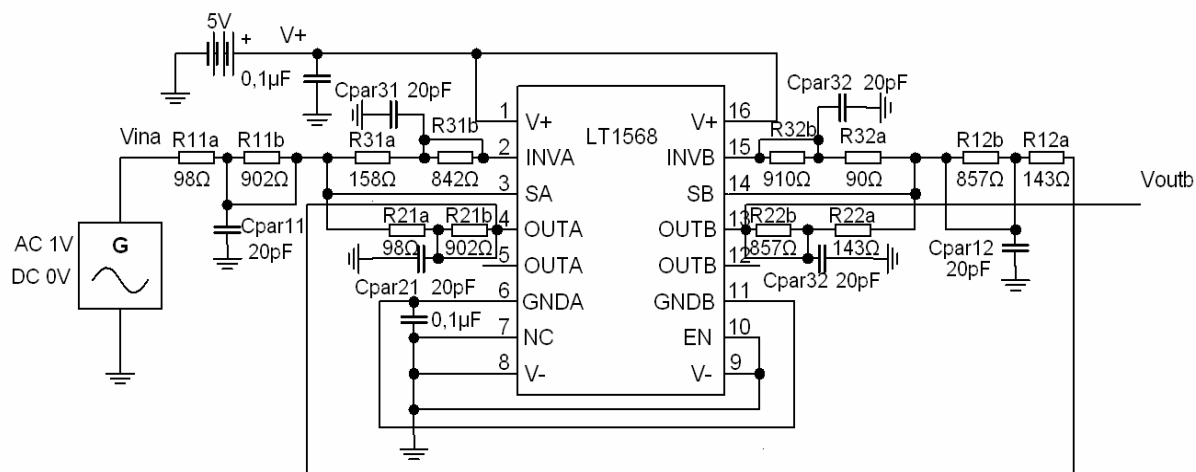
Druhý limitující faktor digitálních potenciometrů je parazitní kapacita. Ta se nachází u vývodu A,B a jezdcy W. Nejzásadnější vliv má kapacita jezdcy. Parazitní kapacita má, jak už bylo řečeno, neblahý vliv na kmitočtovou charakteristiku. Pohybuje se od jednotek pF až po desítky pF. Velikost je závislá na samotné struktuře a na počtu dostupných kroků. Při frekvenci vyšší jak 1MHz se už musí počítat s parazitní kapacitou v řádu desítek pF. Simulace přenosu filtru při přítomnosti parazitní kapacity vychází z modelu na **obr. 3.2**. U TPL8002-25 byly kapacity naměřeny na 10MHz a na polovičním rozsahu, u AD5258 byly naměřeny na

1MHz a taktéž na polovičním rozsahu. Při výběru digitálních potenciometrů dle údajů v datasheetu se musí dát pozor, na jakém kmitočtu, nastaveném rozsahu a jiných parametřů byl potenciometr měřen. Modely uvažují, že potenciometr je využit v „divider módu“, jedná se o napěťový dělič. Kdyby byl potenciometr využíván v „rheostat módu“, tak budou parazitní kapacity menší pro jednotlivé modely.

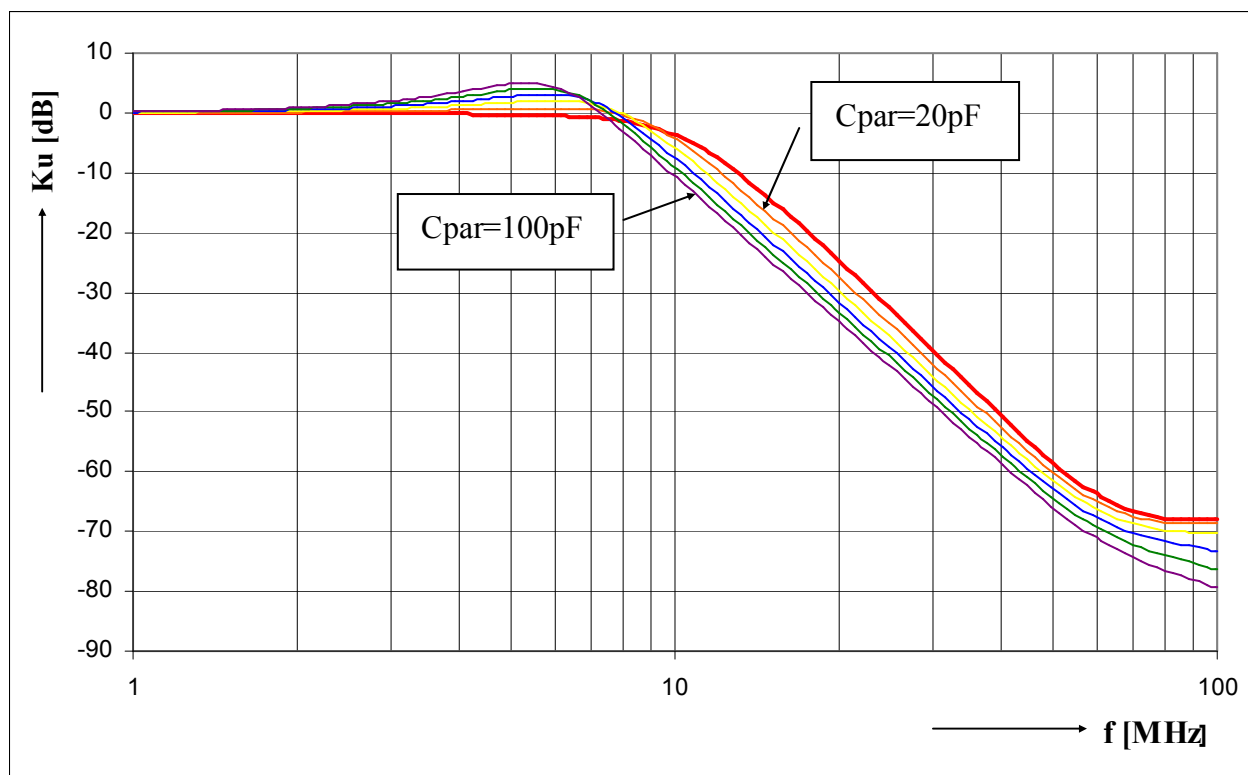


Obr. 3.2 Modely parazitních kapacit dvou digitálních potenciometrů

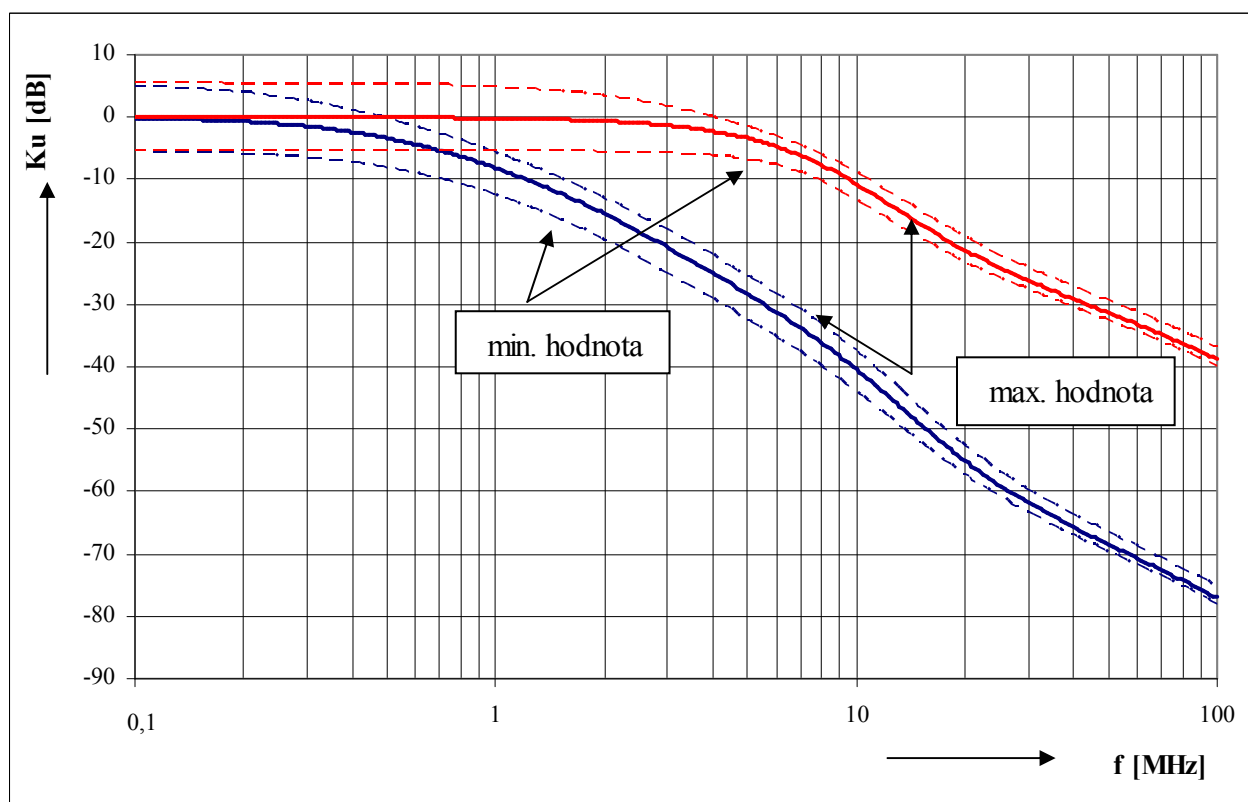
Při řízení filtru od 1MHz do 10MHz se bude dle [3] ohmická hodnota pohybovat od cca 2,2kΩ do cca 60Ω. Potenciometr AD5258 má celkový odpor 1kΩ, jeho uplatnění bude na vyšších frekvencích. Použitelnost je od $f_m=2-3$ MHz, kdy bude využíváno cca 50-90% (záleží na typu aproximace) odporové dráhy. Na nejvyšších možných frekvencích bude využíváno cca 15% odporové dráhy. Takže na těchto frekvencích se předpokládá malá parazitní kapacita, funkčnost filtru by neměla být omezena. Potenciometr TPL8002-25 má odpor dráhy 2,5kΩ, avšak je určen dle [6] do 8MHz. Při využití na 1-2MHz bude využito 60-90% odporové dráhy. Takže se předpokládá vyšší parazitní kapacita a následné ovlivnění funkce filtru. Na **obr. 3.3** je obvod pro simulaci parazitních kapacit vznikajících v digitálních potenciometrech s aktuální parazitní kapacitou 20pF. Na **a** je výsledek simulace pro parazitní kapacitu 20pF, 40pF, 60pF, 80pF a 100pF v porovnání s průběhem nezatíženým těmito parazitními vlivy. Z výsledných průběhů je tedy patrné, že dochází k výraznému snížení mezního kmitočtu a vzniku překmitu v oblasti mezního kmitočtu. V grafu 3.3 je znázorněn průběh přenosu v nejhorším možném případě, kdy na základě [7] je 30% tolerance odporu každé nastavené pozice digitálního potenciometru. Parazitní kapacita byla nastavena na typových 60pF. Obvod byl nastaven na $f_m=1$ a 10MHz, Butterworthova aproximace, $A=1$.



Obr. 3.3: Simulační obvod pro testování vlivu parazitních kapacit digitálního potenciometru s aktuálním nastavením $C_{par}=20$ pF)



Graf 3.2: Vliv parazitních kapacit pro DP 4.řádu, $f_m=10\text{MHz}$, Butterworthova aproximace, $A=1$ na průběh modulu charakteristiky filtru v porovnání s průběhem nezatíženým parazitními vlivy, je tučně vyznačen



Graf 3.3: Simulace nejhoršího průběhu přenosu při 30% toleranci a parazitní kapacitě 60pF pro DP 2.řádu, $f_m=1$ a 10MHz, Butterworthova aproximace, $A=1$

Na obr. 3.4 a 3.5 je znázorněn výsledek citlivostní analýzy pro . V seznamu parametrů představují sloupce @Max a @Min hranice tolerančního pásu daného prvku. Hodnoty *Min* a *Max* v seznamu specifických charakteristik jsou vypočítané toleranční meze sledované funkce ve smyslu nejhorší možné kombinace. Hodnoty *Min* a *Max* se počítají z tolerancí specifikovaných ve schématu, ze kterých se zároveň provádí odvání pro výpočet numerické derivace. Při zadání vysoké tolerance, byť odpovídající reálnému prvku, je nepřesně vypočítaná derivace (citlivost). To je důvod, proč jsou u všech prvků ve schématu nastavené tolerance 1%, i když potenciometry mají ve skutečnosti tolerance 30%.

Parameters						
Component	Parameter	Original	@Min	@Max	Rel Sensitivity	Linear
R1	VALUE	1270	1.2827k	1.2573k	-6.2644k	100
R3	VALUE	1270	1.2573k	1.2827k	4.9504k	79
R2	VALUE	1270	1.2827k	1.2573k	-3.6221k	57
C3	VALUE	60p	59.4000p	60.6000p	293.8025	4
C2	VALUE	60p	59.4000p	60.6000p	96.4485	1

Specifications						
On/Off	Profile	Measurement	Original	Min	Max	
☒	simulujeme.sim	XatNthY(db(v(outa)/v(vin)), -3,1) ...	492.7669k	477.3055k	507.8635k	

Obr. 3.4: Citlivostní analýza pro DP 2.řádu, $f_m = 1\text{MHz}$, Butterworthova aproximace, $A=1$

Parameters						
Component	Parameter	Original	@Min	@Max	Rel Sensitivity	Linear
R5	VALUE	127	128.2700	125.7300	-40.3096k	100
R6	VALUE	127	125.7300	128.2700	30.4726k	75
R4	VALUE	127	128.2700	125.7300	-27.7200k	68
C4	VALUE	60p	59.4000p	60.6000p	2.4133k	5
C6	VALUE	60p	59.4000p	60.6000p	890.0158	2

Specifications						
On/Off	Profile	Measurement	Original	Min	Max	
☒	simulujeme.sim	XatNthY(db(v(outb)/v(vin)), -3,1) ...	4.3239meg	4.2196meg	4.4241meg	

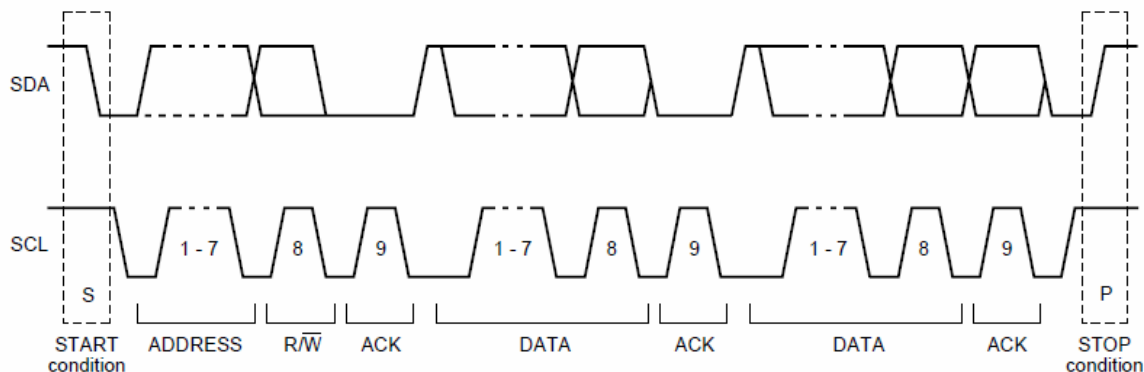
Obr. 3.5: Citlivostní analýza pro DP 2.řádu, $f_m = 10\text{MHz}$, Butterworthova aproximace, $A=1$

3.3 Řízení přes sběrnici I²C

Digitální potenciometr TPL8002-25 bude řízen pomocí paralelní sběrnice a AD5258 bude řízen pomocí sběrnice I²C [8]. Tuto sběrnici vyvinula firma Philips Semikonduktor pro komunikaci mezi dílčími bloky uvnitř jednoho zařízení. Komunikační protokol umožňuje připojit až 128 zařízení. Sběrnice používá sériovou datovou linku SDA a hodinovou datovou linku SCL. Je možné je použít pro přenos dat a adres v obou směrech. Data a adresy se přenášejí společně jedním hodinovým taktem. Je potřeba zajistit vysokou úroveň v klidovém stavu, to zajišťují pull-up rezistory připojené k napájecímu napětí a k jednotlivé lince. Po celou dobu trvání kladného impulsu je nutné, aby data přivedená na linku SDA zůstala neměnná. Mohlo by se totiž stát, že tato případná změna bude vyhodnocena jako řídicí impuls. Komunikační protokol rozlišuje I²C rozlišuje dvojí typ zařízení a to master a slave. Master zahajuje a ukončuje komunikaci na sběrnici, generuje hodinový signál SCL a vysílá adresy a data. Slave je podřízené zařízení, které je řízeno a adresováno masterem.

Klidový stav je indikován pokud jsou obě linky SDA i SCL nastaveny na vysokou úroveň, viz **obr.3.4**. Zahájení přenosu (start condition) je oznámeno nastavením SDA na nízkou úroveň, přičemž SCL zůstává na vysoké úrovni. Konec přenosu (stop condition) je

indikován přejitím SDA z nízké na vysokou úroveň přičemž SCL je nastavené na vysoké úrovni. Komunikační protokol I²C definuje dvojí typ rámců a to adresní a datový. Adresní rámec má 9 bitů. Prvních 7 bitů je adresa zařízení (slave). 8. bit je R/W (zápis=0, čtení=1) a 9. bit je potvrzovací bit ACK (Acknowledge) – ten vysílá zařízení slave, pokud rozpoznalo svoji adresu (ACK=0), pokud je zaneprázdněné, tak ACK=1 → NACK – Not Acknowledge a master ukončí komunikaci ukončovací podmínkou stop.



Obr. 3.6: Přenos dat po sběrnici I2C(převzato z [8])

[8]Komunikace s digitálním potenciometrem, AD5258 je tedy zahájena vysláním adresního bytu, viz obr. 3.5. Bit 2., 5. a 7. je fixně stanoven. Kompletní adresa zařízení slave vychází z tab. 3.1. Následuje instrukční byt, který rozhoduje o tom, zda-li se bude komunikovat mezi digitálním potenciometrem nebo pamětí EEPROM, zda-li bude zápis / čtení z / do EEPROM aj., více v tab. 3.2. Bity A0 až A4 jdou nulové. Datový byt má úlohu předat informaci o nastavení jezdce digitálnímu potenciometru. To se děje pomocí bitů D0 až D5. Binární hodnota bitů D6 a D7 nemá při nastavování žádný vliv z důvodu, že AD5258 má rozlišovací schopnost 64 (0-63) → 5 bitové binární číslo.

S	AD0	0	AD0	1	AD0	AD1	0	R/W	A/A	C2	C1	C0	A4	A3	A2	A1	A0	A/A	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	A/A	P
adresní byt										instrukční byt										datový byt								

Obr. 3.7: Struktura řízení AD5258 na sběrnici I2C

Tab. 3.1: Adresa zařízení AD5258 na sběrnici I2C

Adresní byt AD1	Adresní byt AD0	I2C adresa zařízení
0	0	0011000
1	0	0011010
0	1	1001100
1	1	1001110

Tab. 3.2: Popis instrukčního bytu AD5258 na sběrnici I2C

C2	C1	C0	Popis instrukce
0	0	0	operace mezi I2C a digitálním potenciometrem
0	0	1	operace mezi I2C a pamětí EEPROM
0	1	0	operace mezi I2C a aktivace ochrany proti zápisu do registru paměti EEPROM
1	0	0	návrat zařízení do klidového stavu
1	0	1	čtení polohy jezdce z paměti EEPROM do digitálního potenciometru
1	1	0	zápis polohy jezdce registru digitálního potenciometru do registru paměti EEPROM

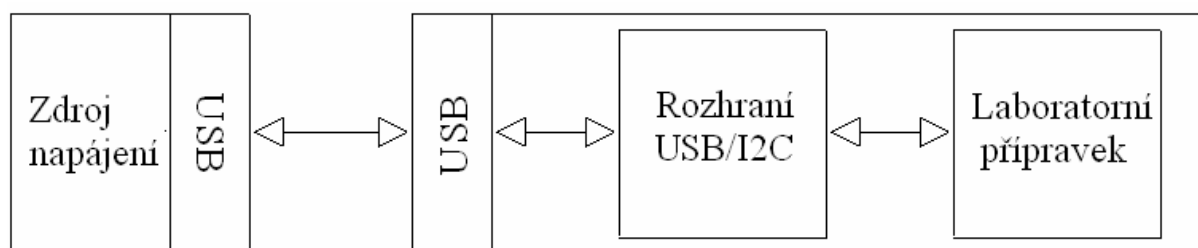
Pro aktivaci ochrany zápisu do registru paměti EEPROM musí $C=1$ a poslední datový bit $D0=1$, ostatní datové byty musí být nulové. Deaktivace se provádí bitem $C1=1$ a $D0=0$, ostatní datové byty taktéž nulové. Doporučuje se po vydání instrukce „čtení polohy jezdce z paměti EEPROM do digitálního potenciometru“ vydat instrukci „návrat zařízení do klidového stavu“ z důvodu minimalizace napájecího proudu. Při čtení z registru digitálního potenciometru nebo registru paměti EEPROM se nejdříve vydá náležitá instrukce (1. nebo 2. řádek předcházející tabulky), zopakuje se startovací podmínka, a pak následuje adresa řízeného zařízení a čtení=1. Pro čtení / zápis pozice jezdce z / do EEPROM stačí pouze instrukční byt zakončený ukončovací podmínkou.

Na obr. 3.6 je naznačen příklad přenosu po sběrnici I^2C do digitálního potenciometru AD5258. Adresa řízeného zařízení (slave) je 0011000, bude se zapisovat do registru paměti EEPROM poloviční rozsah odporové dráhy – 31. pozice.

S	AD0	0	AD0	1	AD0	AD1	0	R/W	A/A	C2	C1	C0	A4	A3	A2	A1	A0	A/A	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	A/A	P
0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
adresní byt									instrukční byt									datový byt										

Obr. 3.8: Příklad použití sběrnice I^2C při zápisu do registru paměti EEPROM

Na obr. 3.9 se nachází bloková struktura komunikačního řetězce. PC/zdroj bude napájet vývojový kit EvB 4.3, který bude řídit digitální potenciometry na laboratorním přípravku. Uživatel bude ovládat kit pomocí maticové klávesnice a LCD displeje.



Obr. 3.9: Bloková struktura komunikačního řetězce

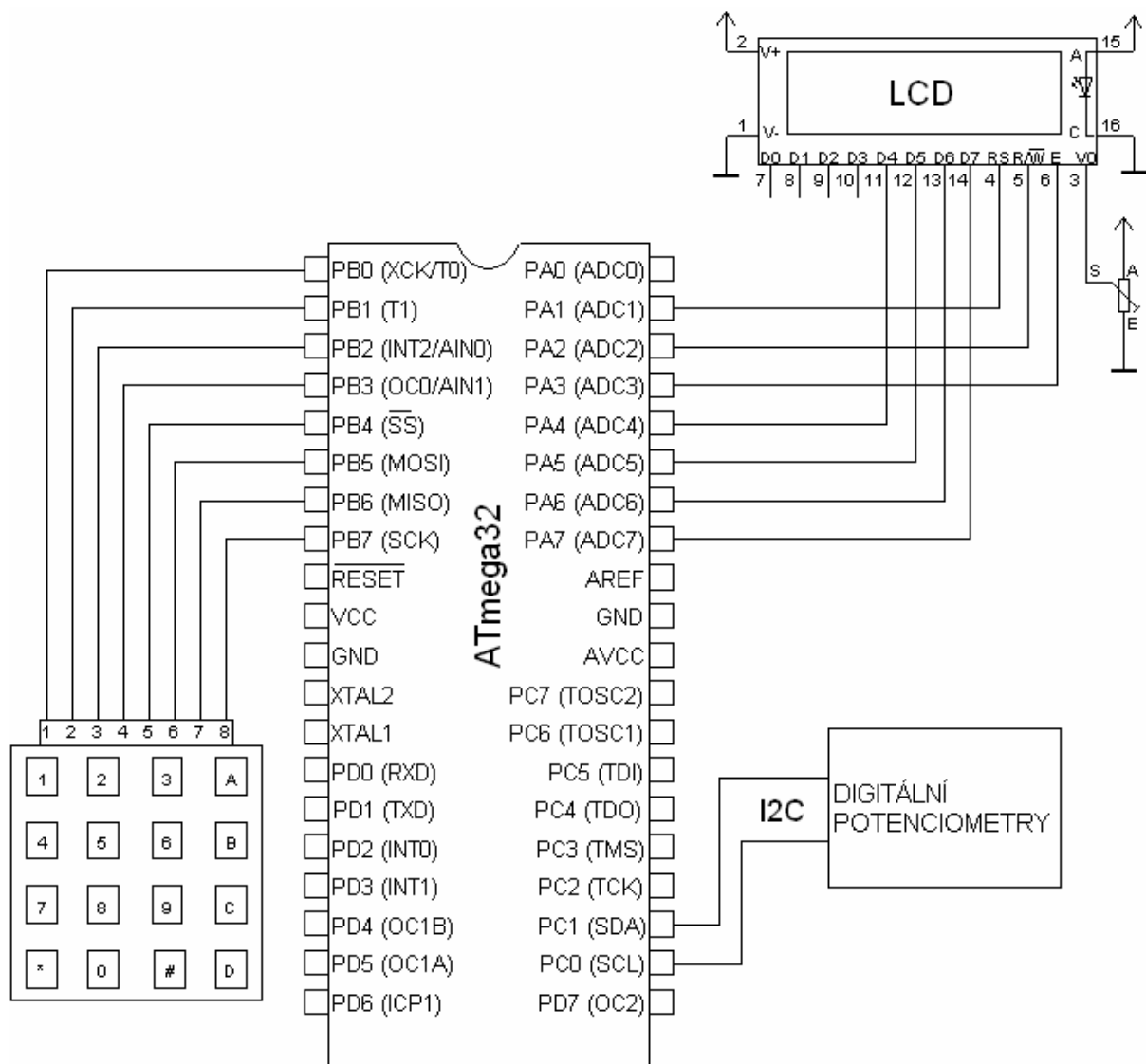
4 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

Tato kapitola je zaměřená na programovací část práce. Bude zde popisováno vývojové prostředí a prostředky. Dále bude popsána komunikace s LCD displejem 16x2 a budou představeny ovládací funkce displeje. V neposlední řadě bude popsána komunikace s maticovou klávesnicí 4x4 a popis funkcí pro vysílání dat po sběrnici I²C. Ve druhé části kapitoly bude popisován hlavní program, který bude řídit za pomoci mikrokontroléru ATmega32 digitální potenciometry AD5258 a to pomocí sériového portu a sběrnice I²C. Výběr programového kódu, konkrétně část kódu, který řídí maticovou klávesnici, se nachází v příloze H.

4.1 Základní popis vývojového prostředí a prostředků

Programování probíhalo ve vývojovém prostředí AVR Studio 4 za použití překladače GGC. Jako hlavní řídicí jednotka byl zvolen mikrokontrolér ATmega32 [10] od firmy Atmel. ATmega32 má za úlohu jak provádět vlastní řízení digitálních potenciometrů, tak zajišťuje komunikaci s uživatelem pomocí LCD displeje a maticovou klávesnicí. Mikrokontrolér se nalézá na vývojovém kitu EvB 4.3. Dále se na ni nachází LCD displej s klasickým řadičem HD44780 od firmy Hitachi, čtyřmístný 7-segmentový displej, 5x pin +5VDC a 5x pin GND kvůli napájení periferních zařízení (v tomto případě digitálních potenciometrů), teplotní senzor, IR přijímač a další, viz literatura [11]. Napájení desky lze vyřešit dvěma způsoby. První způsob je přes vestavěný USB port - v tomto případě musí být zkratovací propojka USB-Vcc osazena. Nebo z externího napájecího zdroje o minimálním napětí +9VDC, který musí být připojen k napájecí svorkovnici v levém horním rohu označené „POWER“ ve správné polaritě, propojka USB-Vcc musí být rozpojena. Programování a napájení desky bude řešeno přes USB kabel. V ATmega32 je v paměti nahrán bootloader, který umožňuje do mikrokontroléru pomocí sériového rozhraní, v tomto případě emulovaného pomocí převodníku USB / UART FT232RL (virtuální sériový port -COMx), nahrát vytvořený program. Vytvořený program – soubor .hex vygenerovaný AVR Studio 4 - se nahrává pomocí programu AND-Load. Programování je ovšem možné i přes rozhraní ISP.

Na obr 4.1 je naznačeno zapojení ATmega32 s digitálními potenciometry pomocí sběrnice I²C, LCD displejem a maticovou klávesnicí. LCD display je zapojen na portu A. Maticová klávesnice je zapojena na portu B. Řízení digitálních potenciometrů je zapojeno na portu C, konkrétně piny PC0 (SCL) a PC1 (SDA). Není zde naznačeno napájení ATmega32 a digitálních potenciometrů z důvodu lepší přehlednosti. Digitální potenciometry a filtr LT1568 jsou napájeny přímo z kitu z důvodu společné zemi.



Obr. 4.1: Základní zapojení ATmega32 s periferiemi

4.1.1 Komunikace s LCD displejem

Komunikace s LCD displejem je řešena pomocí osmi datových pinů, které slouží pro přenos dat a instrukcí, dále třech řídicích pinů a pinů pro napájení, nastavení kontrastu a podsvícení. Přestože komunikace LCD displeje při přijímání nebo vyslání dat a instrukcí je 8-bitová, může být řešena i jako 4-bitová – takže budou potřeba jen 4 datové piny. 8-bitové slovo se rozdělí na 2x4-bitové slovo. A to na vyšší a nižší nibl. Nejdříve se vysílá vyšší nibl, pak se odvysílá nižší nibl. V konečném stádiu byl zredukován potřebný počet vodičů z jedenácti na sedm. Řídicí signál RS slouží k identifikaci, zda-li jsou přenášeny data či instrukce. Pokud je $RS=0$ jedná se o instrukce, v opačném případě $RS=1$ a jedná se o data. Řídicí signál R/W identifikuje, zda-li dochází ke čtení nebo zápisu z nebo do LCD displeje. Je-li $R/W=0$, tak se jedná o zápis, v opačném případě je $R/W=1$ a jedná se o čtení. Proces 4-bitové komunikace k LCD displeji se provádí v několika krocích. Nejdříve je nutné nastavit řídicí signály RS a R/W . Následně se na datové piny D7 až D4 (na ATmega32 je to PA7 až PA4) vyšší nibl zapisovaných dat. Příjem těchto dat v LCD displeji je spuštěn kladným pulsem signálu E , který musí trvat několik hodinových cyklů. Následně se vše opakuje pro nižší nibl. Formát instrukcí je pevně dán. Výčet všech instrukcí pro řadič HD44780 se nachází v [12]. Funkce

pro ovládání LCD displeje byly převzaty z [13]. **Tab. 4.1** obsahuje seznam všech používaných funkcí v hlavním programu.

Tab. 4.1: Seznam používaných funkcí

Název funkce	Popis funkce
lcd_init()	inicializace LCD displeje
lcd_clrscr()	vymazání obsahu LCD displeje
lcd_gotoxy(x,y)	přesun kurzoru na pozici x,y - počátek je v 0,0
lcd_puts("AHOJ")	vypsání řetězce "AHOJ"

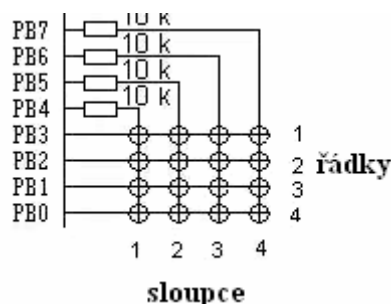
4.1.2 Maticová klávesnice

Princip funkce maticové klávesnice vychází z **obr.4.2**. Maticová klávesnice je zapojená na port B ATmega32. Port lze samozřejmě libovolně měnit. Port B je rozdělen na dva nibly. První nibl je PINB0 – PINB3 jako vstup (řádky) a druhý nibl je PINB4 – PINB7 jako výstup (sloupce). Všechny řádkové vodiče jsou udržovány na úrovni H pomocí odporů R. Budicí obvod postupně připojuje na jednotlivé sloupcové vodiče úroveň L. Na této úrovni je vždy jeden sloupcový vodič, ostatní jsou na úrovni H. Je-li stisknuta některá z kláves připojených na právě buzený (tj. na úrovni L) vodič, je tato úroveň klávesnicovým spínačem připojena i na příslušný řádkový vodič. Struktura kódu pro rozpoznání stisknuté klávesy v prvním sloupci je následující.

```
#include <avr/io.h>

int main() {
    DDRB=0xF0; // vyšší nibl pro výstup(sloupce), nižší nibl pro vstup(řádky)
    PORTB=0xF0; // pull-up na PINB0 – PINB3
    while (1) // nekonečná smyčka
    {
        PORTB = 0b01111111
        if (bit_is_clear(PINB, 3)) {};
        if (bit_is_clear(PINB, 2)) {};
        if (bit_is_clear(PINB, 1)) {};
        if (bit_is_clear(PINB, 0)) {};
    }
}
```

Podmínkou bit_is_clear se kontroluje L úroveň na PINB0 až PINB3. Pokud tato podmínka bude splněna (stisknutá klávesa), tak se vykonají příkazy ve složené závorce. Rezistory 10kΩ slouží jako ochrana proti přímému zkratu.



Obr. 4.2.: Maticová klávesnice

4.1.3 Funkce pro přenos dat po sběrnici I²C

Pro komunikaci Atmega32 s digitálními potenciometry se využívá sběrnice I²C. Po ní se posílají adresní byt, instrukční byt a datový byt. Nejdříve je potřeba určit frekvenci hodinového signálu SCL. Ta se nastavuje podle 4.1 [10]. A to

$$f_{SCL} = \frac{f_{CPU}}{16 + 2.TWBR + 4.TWPS}, \quad (4.1)$$

kde f_{CPU} je frekvence mikrokontroléru, TWBR je hodnota v registru a TWPS jsou spodní 2 bity v registru TWSR. Z toho vyplývá, že nejlepší je nechat TWPS bity nastavené na 0, protože cokoliv na nultou je 1, pak se vzorec (4.1) zjednoduší na

$$f_{SCL} = \frac{f_{CPU}}{16 + 2.TWBR} = \frac{16.10^6}{16 + 2.72} = 100kHz, \quad (4.2)$$

frekvence hodinového signálu SCL je 100kHz. Z pohledu funkce se bude na instrukční byt pohlížet jako na datový byt. Seznam používaných funkcí je v **tab. 4.2**.

Tab. 4.2: Seznam používaných funkcí pro I²C

Název funkce	Popis funkce
startujeme_twi(void)	vyslání startovací podmínky
adresa(char slave)	načtení adresy a write bitu do datového registru
instrukce_data(char ins_data)	načtení instrukčního nebo datového paketu do datového registru
konec(void)	vyslání ukončovací podmínky

Struktura kódu pro jednotlivé funkce je následující:

-startujeme_twi(void)

```
void startujeme_twi(void)
{
    TWCR=(1<<TWINT) | (1<<TWSTA) | (1<<TWEN);
    while(!( TWCR & (1<<TWINT)));
}
```

Funkce nemá žádnou vstupní a výstupní hodnotu. V kontrolním registru TWCR se nastaví bity TWINT - příznak přerušení, TWSTA - podmínkový bit a TWEN – zapnutí TWI. Bit TWINT je nastaven hardwarem po té, co TWI dokončí aktuální funkci a očekává odpověď od aplikačního softwaru. Bit TWEN zapíná TWI operace a aktivuje TWI rozhraní. Když je nastaven, přebírá kontrolu nad piny SDA a SCL (PINC1 a PINC0). Pokud nastaven není, veškerý TWI přenos je ukončen bez ohledu na probíhající operace. Po dokončení nastavování jednotlivých bitů se odešle startovací podmínka. Poslední řádek funkce čeká na dokončení operace, to znamená TWINT=1. Tento řádek se nachází ve všech funkcích kromě konce().

- adresa(char slave)

```
void adresa(char slave)
{
    TWDR=slave<<1;
    TWCR=(1<<TWINT) | (1<<TWEN);
```

```
    while(!( TWCR & (1<<TWINT)));  
}
```

Funkce má vstupní hodnotu 7-bitovou adresu řízeného zařízení a žádnou výstupní hodnotu. Do datového registru TWDR se zapíše adresa řízeného zařízení a zapisující bit. Posléze se adresa a zapisující bit vyšlou po sběrnici k cílovému zařízení.

- instrukce_data(char ins_data)

```
void instrukce_data(char ins_data)  
{  
    TWDR=ins_data ;  
    TWCR=(1<<TWINT) | (1<<TWEN);  
    while(!( TWCR & (1<<TWINT)));  
}
```

Funkce má vstupní hodnotu 8-bitovou instrukci nebo data a žádnou výstupní hodnotu. Proveďte se načtení do datového registru TWDR instrukce či data. Posléze se vyšlou po sběrnici.

- konec(void)

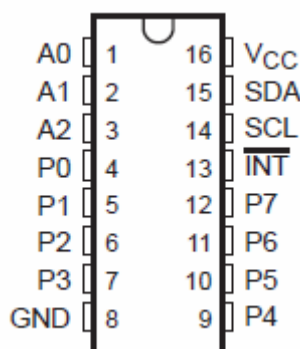
```
void konec(void)  
{  
    TWCR=(1<<TWINT) | (1<<TWSTO) | (1<<TWEN);  
}
```

Funkce nemá žádnou vstupní a výstupní hodnotu. V kontrolním registru se mimo jiné nastaví bit TWSTO – ukončovací podmínka. Po provedení ukončovací podmínky se bit TWSTO vynuluje automaticky.

Funkce `startujeme_twi(void)` musí být umístěna na začátku pro inicializaci komunikace po I²C sběrnici. Posléze následuje funkce `adresa(char slave)` pro vyslání adresy řízeného zařízení. Následuje dvakrát funkce `instrukce_data(char ins_data)` pro vyslání instrukce a dat. Pokud řízené zařízení instrukční byte nevyžaduje, tak se funkce použije jen jednou, a to jen pro data. Komunikace se posléze ukončí funkcí `konec(void)`.

4.1.4 Expandér PCF8574 pro I²C sběrnici

Vzhledem k tomu, že digitálních potenciometrů je na měřicím přípravku 6, tak signál SDA musí směřovat vždy jen k jednomu z nich. Signál SCL směřuje jak ke všem digitálním potenciometrům, tak i k expandéru. Expandér má až 8 portů pro jednotlivá zařízení, viz obr 4.2. Sběrniceová adresa je 0100xxx0 pro zápis a 0100xxx1 pro čtení, přičemž tři proměnné bity xxx je možno stanovit externími adresními vstupy A0 až A2. Adresní vstupy A0-A3 v tomto případě jsou uzemněny. P0 až P7 jsou jednotlivé vstupní/výstupní porty. Napájení je 5V z vývojového kitu. Pin 13 – přerušení – nebude využit. Zobrazení součástky je na obr. 4.3.



Obr. 4.3: Zobrazení PCF8574

4.2 Ovládání programu

Ovládání programu je jednoduché. Po zapnutí desky se asi 5s inicializuje displej. Po inicializaci je uživatel vyzván, ať zadá pořadové číslo digitálního potenciometru. Zadávání se provádí klávesami 1-6. Volba se potvrdí klávesou *. Na obr. 4.3. je názorná ukázka výběru 6. digitálního potenciometru.



Obr. 4.4.: Výběr 6. digitálního potenciometru

Po volbě digitálního potenciometru následuje nastavení požadované ohmické hodnoty potenciometru. Rozsah nastavované hodnoty byl upraven o 2.75Ω dle vzorce (3.3). Hodnota 75Ω představuje odpor jezdce dle datasheetu [7]. Nastavování se provádí klávesami 1-9 a potvrzuje opět klávesou *. Po potvrzení zadání se zadaná hodnota zaokrouhlí podle výše zmiňovaného vzorce a vypíše se nastavovaná pozice digitálního potenciometru. Při změně hodnoty vybraného potenciometru má uživatel možnost vidět již zadanou hodnotu dříve, viz. Obr 4.4., kde „R“ značí zadávanou hodnotu, „RZ“ je aktuální hodnota, „RO“ značí zaokrouhlenou hodnotu a „POZICE“ je pozice jezdce. Při stisknutí klávesy # se provede restart ohmické hodnoty vybraného digitálního potenciometru. To znamená nastavení nulové pozice – bude brána pouze teoretická ohmická hodnota jezdce - 150Ω .



Obr. 4.5.: Zadávání hodnot odporu digitálního potenciometru

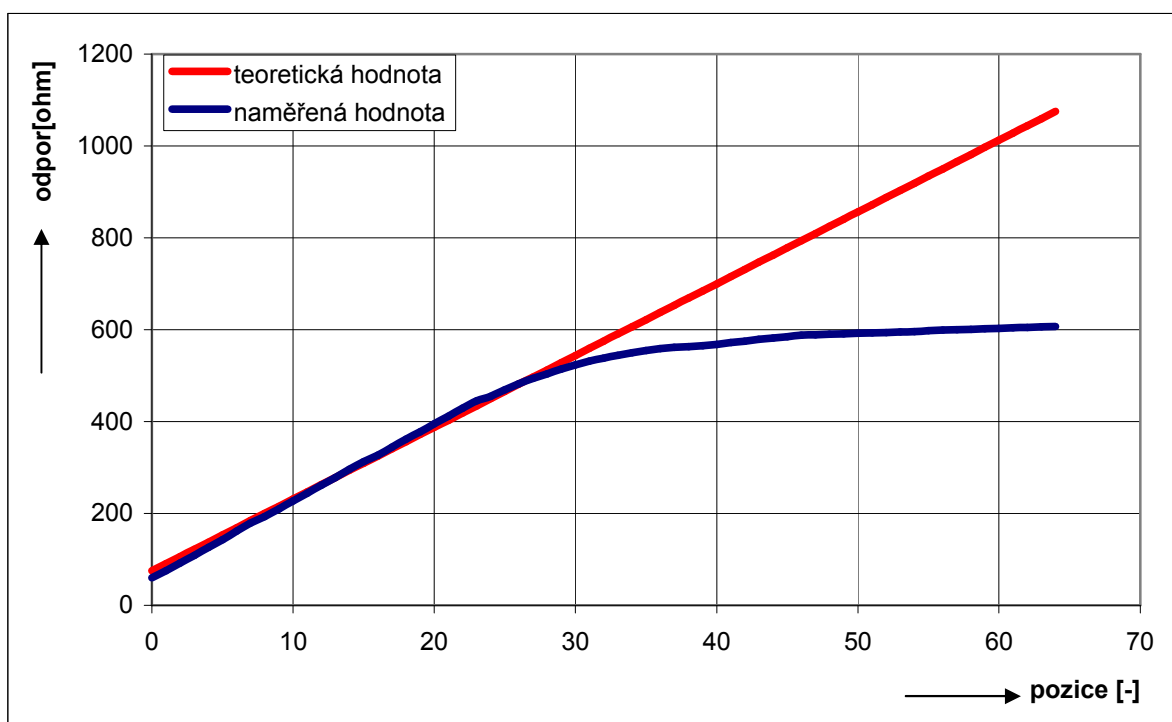
Při stisku klávesy D se provede celkový restart všech digitálních potenciometrů.

5 MĚŘENÍ LABORATORNÍHO PŘÍPRAVKU

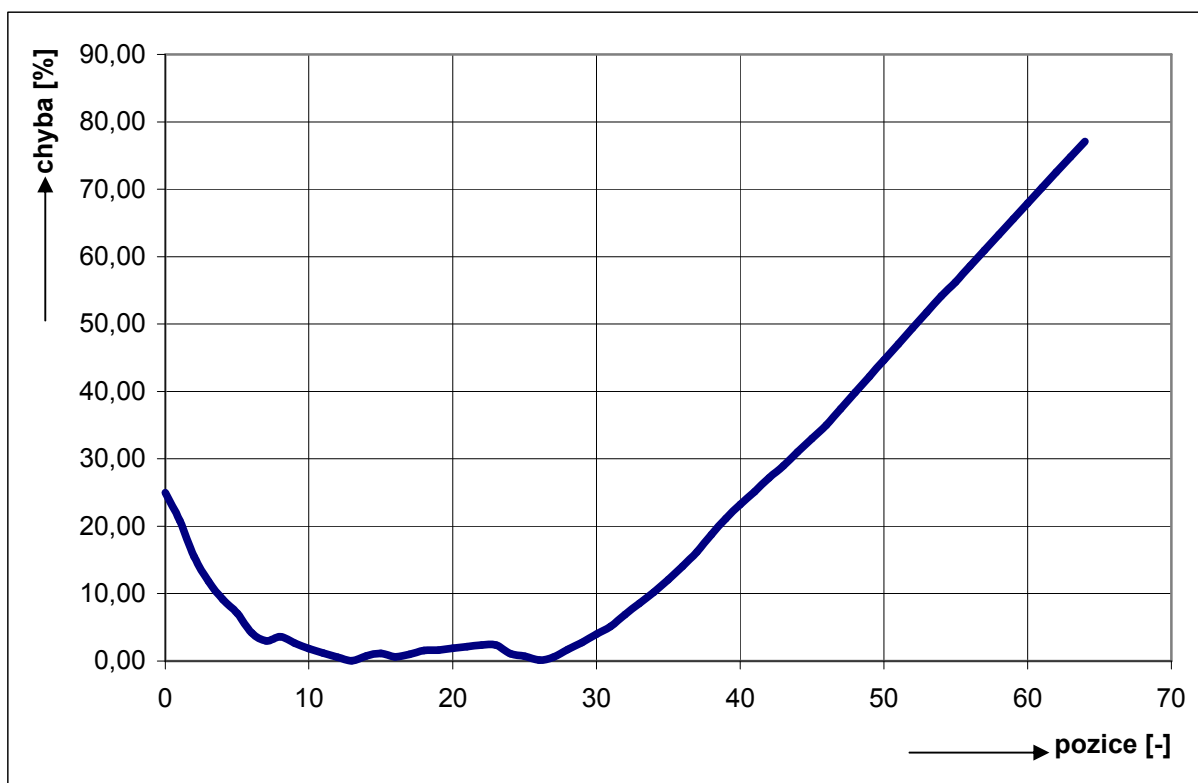
Obsah této kapitoly je zaměřen na praktické měření navrženého laboratorního přípravku, který tak tvoří s výše představenou komunikační strukturou celek laboratorní úlohy. Praktické měření nebylo zaměřené jen na výsledky dokumentující funkčnost laboratorního přípravku, ale také na problémy vznikající v oblasti kritických kmitočtů, které jsou pro digitálně řízené prvky zdrojem nežádoucích parazit.

5.2 Linearita digitálního potenciometru

V grafu 5.1 lze vidět teoretickou křivku nastavovaného odporu digitálního potenciometru. Teoretická hodnota je vypočítána podle vzorce (3.3). Z naměřené hodnoty lze vyčíst, že maximální nastavitelná hodnota odporu digitálního potenciometru je přibližně 600Ω . Přibližně od 45. pozice odpor potenciometru zůstal neměnný, či se zvyšoval $1-2\Omega/\text{pozice}$. Můžou za to parazitní vlivy, které se zvyšují s nastavenou pozicí. V grafu 5.2 je vyobrazena chyba neměřené a nastavované hodnoty digitálního potenciometru. Chyba dosahuje na konci odporové dráhy až 70%.



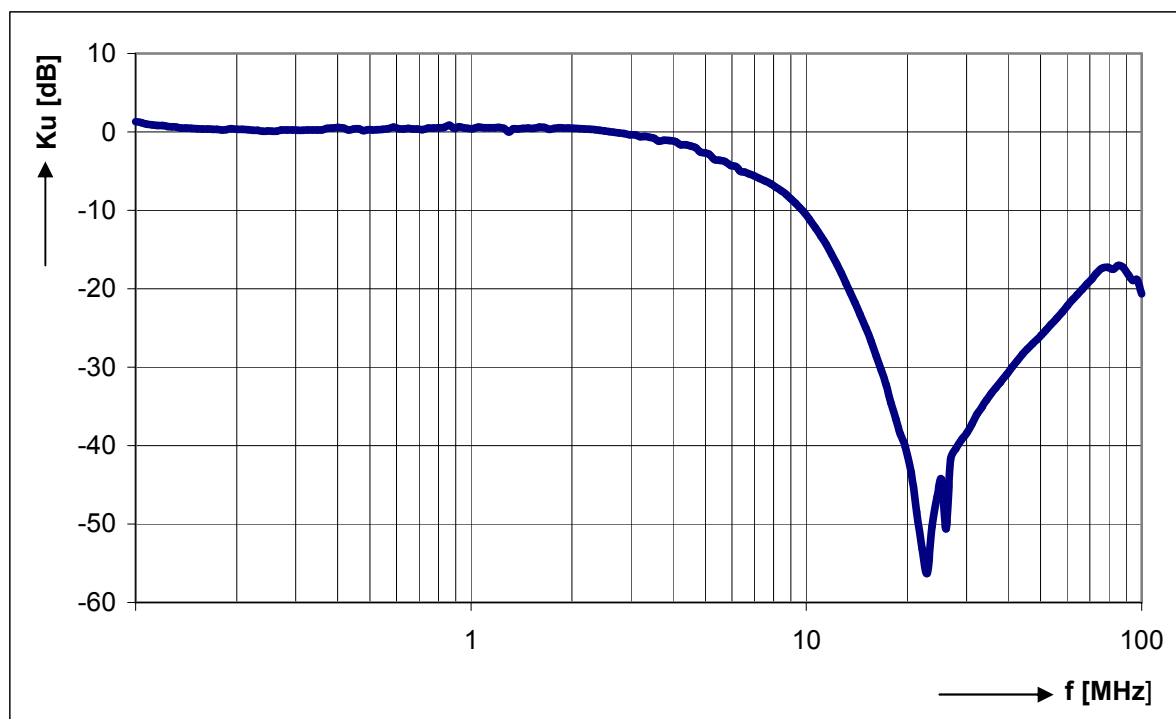
Graf 5.1: Linearita digitálního potenciometru



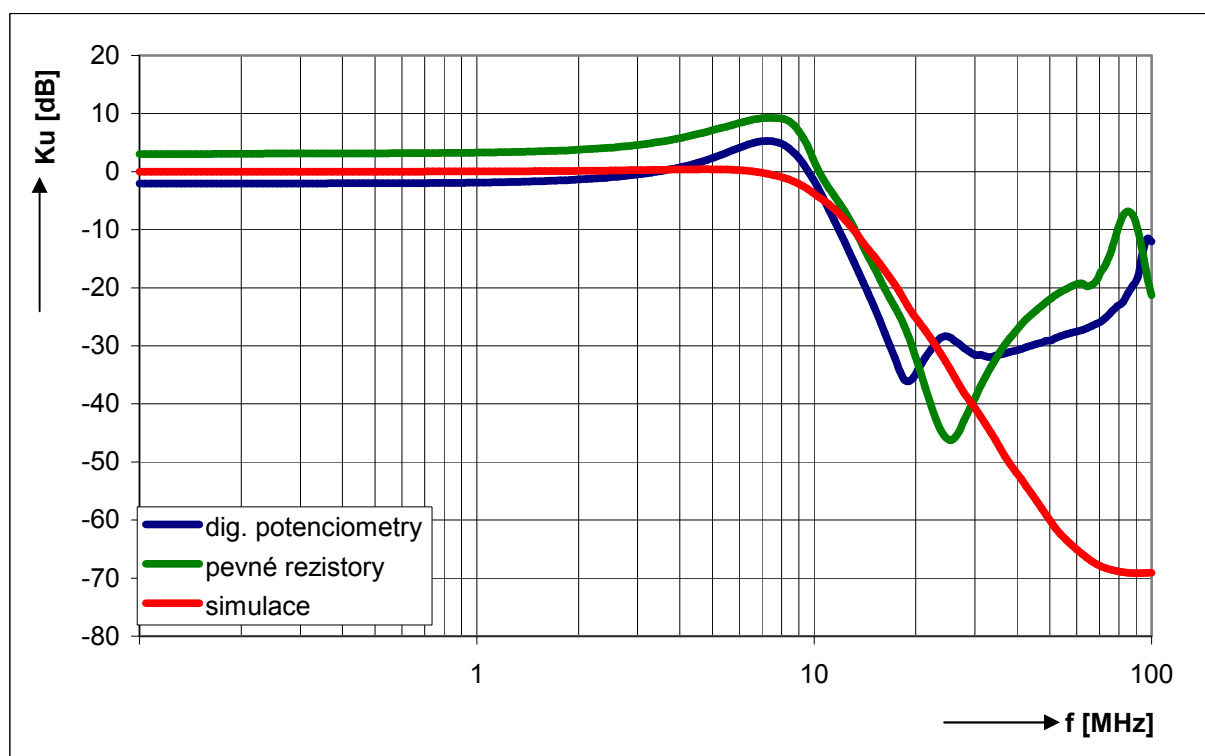
Graf 5.2 Chyba nastavovaného odporu digitálního potenciometru

5.2 Přenos filtru a parazitní vlivy

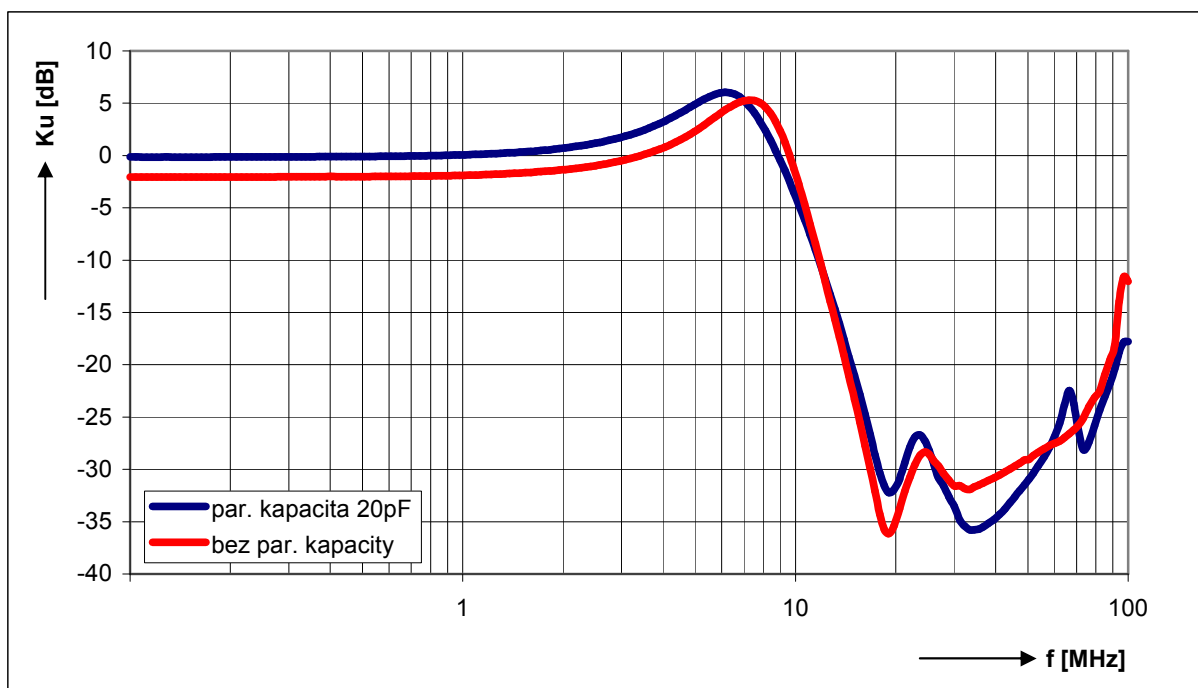
V grafu 5.3 je naměřena charakteristika filtru naladěném na DP 4.řádu, $f_m = 5$ MHz, Butterworthova aproximace a $A=1$. Od 10 MHz nastává zlom z důvodu překročení šířky pásma digitálních potenciometrů. Maximální útlum je 55 dB. V grafu 5.4 je naměřena charakteristika filtru naladěném na DP 2.řádu, $f_m = 7$ MHz, Čebyševova aproximace a $A=1$. Je zde možnost porovnání s přenosem filtru realizovaného pomocí pevných odporů a simulace. Rozdíl naměřené charakteristiky s digitálními potenciometry oproti charakteristice s pevnými odpory je zvýšení strmosti v přechodovém pásmu z důvodu překročení šířky pásma digitálních potenciometrů. Další je rozdíl úrovní v propustném pásmu, to je z důvodu nepřesnosti digitálních potenciometrů při nastavování poměrů zesílení $A=R_2/R_1$. Ke každému digitálnímu potenciometru byla mezi jezdec a zem vložena parazitní kapacita 22pF. Graf 5.5 zobrazuje naměřené charakteristiky, filtr zůstává naladěný jako v předchozím případě. Jak bylo dříve simulováno, dochází k posunu mezní frekvence a k nepatrnému snížení strmosti přechodové charakteristiky. Graf 5.6 zobrazuje přenos filtru při změně poměru A . V prvním případě je $A=0,625$, ve druhém je $A=1,666$ a ve třetím je $A=2,083$. Ve třetím případě už dochází ke zkreslení celé charakteristiky a velmi výraznému zmenšení mezní frekvence přibližně o 4MHz.



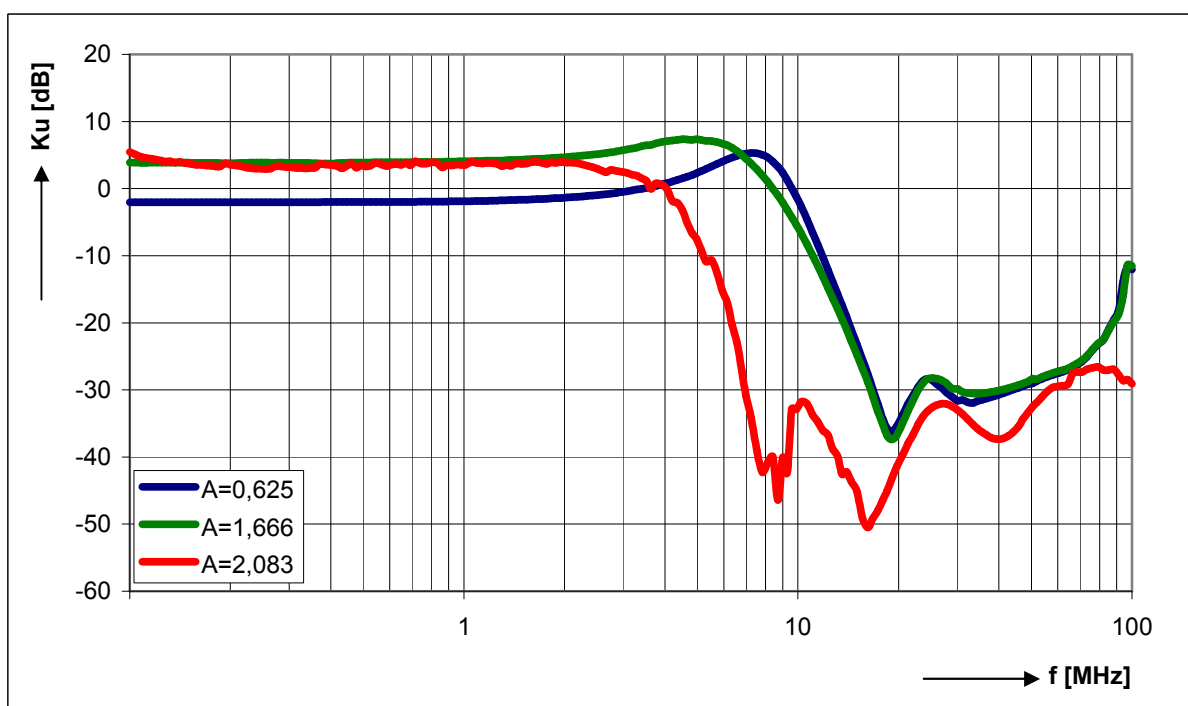
Graf 5.3: Dolní propust s digitálními potenciometry



Graf 5.4: Dolní propusti v porovnáním se simulací



Graf 5.5: Přidaná parazitní kapacita 22pF na jeden potenciometr



Graf 5.6: Přenos filtru s různým poměrem zesílení A

Závěr:

S ohledem na výše uvedené praktické výsledky je možné učinit pro použití digitálních potenciometrů ve filtračních aplikacích několik důležitých závěrů. Potenciometr AD5258 má maximální nastavitelnou hodnotu odporu 600Ω . Přidaná parazitní kapacita rovna 22pF snižuje mezní frekvenci filtru přibližně o 1MHz. Maximální zesílení může dosahovat cca 1,7, při vyšší hodnotě dochází ke zkreslení charakteristiky a ke snížení mezní frekvence o cca 4MHz.

6 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo seznámení se základními obvodovými principy pro konstrukci analogových filtrů s možností přeladování jejich základních parametrů. Na základě těchto poznatků byla vytvořena koncepce plně digitálně řízeného filtru s integrovaným obvodem LT1568. Ze simulací parazitních vlivů a experimentálního měření přenosu filtru na testovacím přípravku je zřejmé, že pro obvod s pevnými externími rezistory je možné uvažovat parazitní kapacity uzlů přibližně kolem hodnot 10 až 40 pF. Nezanedbatelný vliv na naměřené přenosové charakteristiky má také dosažená celková přesnost nastavení vypočtených hodnot odporů. S ohledem na využití dostupných odporů s tolerancí 5% a jejich celkový vliv na přesnost měřené charakteristiky, lze uvažovat spíše dolní hranici uvažovaných parazit. Tato oblast analýzy bude v závěrečném projektu rozšířena o měření parazitních kapacit samotných digitálních potenciometrů. Za tímto účelem byl pro možnost verifikace vytvořen makromodel integrovaného obvodu LT1568 také v prostředí PSpice. Tato součástka není v běžných knihovnách PSpice v grafické podobě k dispozici. Výrobce integrovaného obvodu poskytuje na svých stránkách jen textovou verzi obvodu. Tato verze sloužila jako podklad pro vytvoření plně funkčního makromodelu. Díky pomuto makromodelu mohly být vytvořeny pokročilé simulace, a to citlivostní a toleranční analýzy.

Na základě možností řízení LT1568 byly náhodně vybrány tři sady hodnot rezistorů, pomocí nichž se realizuje měření. Posléze byly sestaveny dva obvody. Výhoda prvního obvodu bylo, že umožňoval změnu hodnot rezistorů, ale na druhou stranu vznikaly přechody díky krokosvorkám. Druhý obvod byl sestaven s pevně danými hodnotami rezistorů, ale na druhou stranu byly minimalizovány přechody, které by mohly navyšovat vliv parazitních efektů v obvodu. Měření prokázalo, že filtr dosahuje uspokojivých funkcí, které byly představeny výrobcem. Na základě těchto poznatků je možné samostatně specifikovat vliv pevných odporů a digitálně řízených odporů na výsledné vlastnosti přenosových charakteristik filtru.

Při výběru digitálních potenciometrů, pomocí kterých bude prováděno řízení LT1568, byly brány do úvahy firmy Analog Device, Texas Instruments, Dallas Semikonduktor a Microchip. Byly brány v úvahu digitální potenciometry TPL8002-25 od firmy Texas Instruments a AD5258 od firmy Analog Devices. Ze specifikací uváděných jednotlivými výrobci lze vyčíst poměrně dobré vlastnosti obvodů na frekvencích významně přesahujících 1 MHz. Nicméně nelze předpokládat, že bez speciálních obvodových úprav jako je ukázáno např. v [9], bude dosaženo lepšího výsledku než asi poloviny udávané hodnoty v katalogovém listech. Dosažené výsledky jsou podrobně shrnuty v závěrečné části mé práce.

Ve druhé části bakalářské práce je filtr realizován s digitálními potenciometry řízeným mikrokontrolérem ATmega32. Hlavní výstupní celek mé práce je plně digitálně řízený filtr a ovládací software. Funkčnost celého kompletu je realizována na ukázkové laboratorní měřicí úloze s kompletně vypracovaným vzorovým řešením.

Příloha projektu obsahuje veškeré konstrukční podklady pro výrobu digitálně řízeného filtru pro komunikaci pomocí rozhraní I²C. Dále je zde uveden program, který komunikuje s digitálními potenciometry.

LITERATURA

- [1] HÁJEK, K.; SEDLÁČEK, J. *Kmitočtové filtry*. 1. Praha : BEN – technická literatura, 2002. 536 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [2] DOSTAL, T. *Elektrické filtry*. Skripta FEKT VUT UREL, Brno, 2004/2007. 144 s. ISBN 80-214-2561-X.
- [3] Linear Technology, *Very Low Noise, High Frequency Active RC, Filter Building Block* Datasheet, 16 s., 2007. Dostupné na [www: <http://www.linear.com>](http://www.linear.com).
- [4] VRBA, K., KUBÁNEK, D. Použití digitálních potenciometrů k řízení parametrů kmitočtových filtrů. *Elektrorevue* [online]. 2002, č. 50 [cit. 2010-26-12]. Dostupné na [www: <http://www.elektrorevue.cz>](http://www.elektrorevue.cz).
- [5] ŠEVČÍK, B. *Elektronicky říditelný aktivní filtr 2.řádu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2009. 54 s., 24 s. příloh. Diplomová práce.
- [6] Texas Instruments Inc. Dallas, Texas 75243-1108 USA. *Tandem 64-tap digital potentiometer TPL-8002-25* [online]. Datasheet, 13 s., 2009. Dostupné na [www: <http://www.ti.com>](http://www.ti.com).
- [7] Analog Devices, P. O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, USA. *Nonvolatile, I2C-Compatible 64-Position, Digital Potentiometer AD5258* [online]. Datasheet, 28 s., 2009. Dostupné na [www: <http://www.analog.com/>](http://www.analog.com).
- [8] Philips Semiconductors. *I²C Bus Specification* [online]. Datasheet, 50 s., 2007. Dostupné na [www: <http://www.nxp.com>](http://www.nxp.com).
- [9] ŠEVČÍK, B. Modeling and Signal Integrity Testing of Digital Potentiometers. In *Proceedings of the 17th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES 2010*. 2010. s. 570-575. ISBN: 978-83-928756-3-5.
- [10] Atmel, 2325 Orchard Parkway San Jose, 95131 United States, *8-bit Microcontroller with 32KBytes In-System Programmable Flash* [online], Datasheet, 346 s., 2011. Dostupné na [www: <http://www.atmel.com>](http://www.atmel.com).
- [11] AND-TECH, *Návod na obsluhu vývojové desky EvB 4.3 rev. 3*, [online]. Datasheet, 26 s., 2010. Dostupné na [www: <http://shop.onpa.cz/>](http://shop.onpa.cz).
- [12] *Doveda* [online]. 25.2.2007 [cit. 2011-05-26]. Znakové LCD displeje. Dostupné z [www: <http://doveda.byl.cz/>](http://doveda.byl.cz).
- [13] FRÝZA, T. *TOMAS FRYZA* [online]. 2007 [cit. 2011-05-26]. LCD knihovna. Dostupné WWW: [<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~fryza/>](http://www.urel.feec.vutbr.cz/~fryza/).
- [14] ŠEVČÍK, B.; BRANČÍK, L. Application of Digital Potentiometers in Multifunctional Active Filters at Frequencies above 1 MHz. *Multistage Architectures for High Resolution Digital Potentiometers*. 2009, no. 1, s. 1-7.
- [15] GAMBUZZA, M. *Pandatron* [online]. 2011 [cit. 2011-05-26]. Omezení rušení digitálních potenciometrů. Dostupné z WWW: [<http://pandatron.cz/>](http://pandatron.cz).

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

zkratky

ACK	Acknowledge – potvrzovací bit
AL	absolutní nelinearita (hodnocený parametr u digit. potenciometrů)
ARC	aktivní filtr RC
DP	dolní propust
EEPROM	electrically erasable programmable read-only memory – elektricky mazatelnou nevolatilní paměť typu ROM
I ² C	dvouvodičové komunikační sériové rozhraní
LCD	liquid crystal display – displej z tekutých krystalů
LSB	least significant bit – nejméně významný bit
OZ	operační zesilovač
PP	pásmová propust
RL	relativní nelinearita (hodnocený parametr u digit. potenciometrů)
SCL	synchronous clock – synchronní hodiny
SDA	synchronous data – synchronní data
SPI	čtyřvodičové komunikační sériové rozhraní
MI	nejmenší možný krok potenciometru
MSB	most significant bit – nejvíce významný bit
A0-A3	adresní vstupy
P0-P7	vstupní/výstupní piny
NIBL	polovina bytu
MSOP-10	10-Lead Mini Small Outline Package - pouzdro
TSSOP	Thin-Shrink Small Outline Package - pouzdro
TSOT-23	Thin Small Outline Transistor Plastic Package - pouzdro
INC	vstup ovládající polohu jezdce
CS	rozpoznávací vstup
U/D	up/down – ovládání jezdce dig. potenciometru
H	high – vysoká úroveň signálu
L	low – nízká úroveň signálu
R/W	read/write – čtení nebo zápis z/do LCD displeje

symbols

A	zesílení zesilovače
B	šířka pásma
f_m	mezní kmitočet dolní propusti
f_n	parazitní přenos
f_o	střední kmitočet
f_{pm}	požadovaná mezní frekvence
$K(s)$	komplexní funkce přenosu napětí
Q	činitel kvality
R	základní hodnota odporu
R_{AB}	nominální odpor mezi koncovými body potenciometru
R_{i1MHz}	hodnota rezistoru při 1MHz
R_0	hodnota výstupního odporu

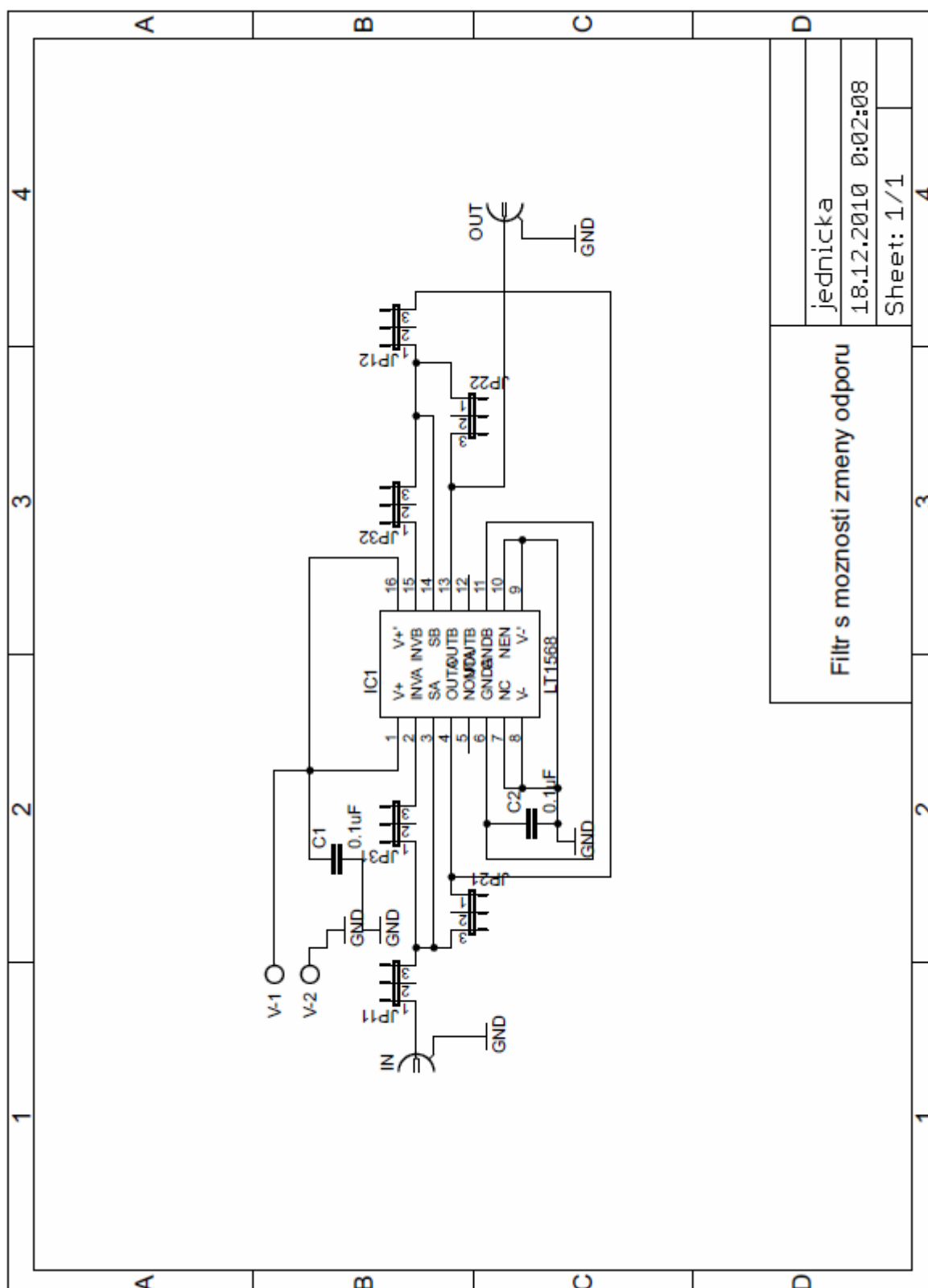
R_{pi}	požadovaná hodnota rezistoru
R_W	odpor jezdcy potenciometru a zároveň zahrnuje i odpor vnitřních přepínačů
$V_{oč}$	očekávaná hodnota napětí
Ω_0	úhlový kmitočet
BW_{3dB}	šířka pásma pro pokles 3dB
Max	maximální mez toleranční funkce
Min	minimální mez toleranční funkce

SEZNAM PŘÍLOH

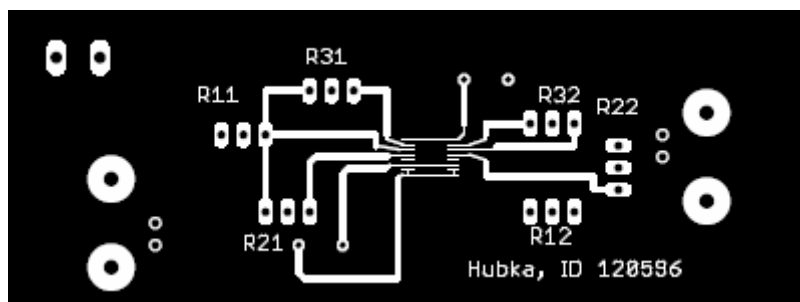
A	FILTR S UMOŽNĚNOU ZMĚNOU HODNOT REZISTORŮ.....	45
A.1	Obvodové zapojení	45
A.2	Deska plošného spoje – top (strana součástek)	46
A.3	Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)	46
A.4	Osazovací plán plošného spoje	46
B	SEZNAM SOUČÁSTEK	47
C	FILTR S PEVNÝMI REZISTORY	48
C.1	Obvodové zapojení	48
C.2	Deska plošného spoje – top (strana součástek)	49
C.3	Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)	49
C.4	Osazovací plán plošného spoje	49
D	SEZNAM SOUČÁSTEK	50
E	Digitálně řízený filtr	51
E.1	Obvodové zapojení	51
E.2	Deska plošného spoje – top (strana součástek)	52
E.3	Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)	52
E.4	Osazovací plán plošného spoje	53
F	SEZNAM SOUČÁSTEK	54
G	VZOROVÁ LABORATORNÍ ÚLOHA.....	55
H	PROGRAMOVÁ ČÁST.....	62
H.1	Výběr z programového kódu.....	62
I	OBSAH CD	66

A FILTR S UMOŽNĚNOU ZMĚNOU HODNOT REZISTORŮ

A.1 Obvodové zapojení

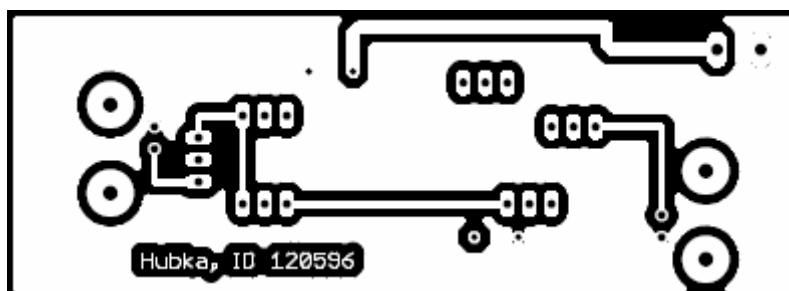


A.2 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



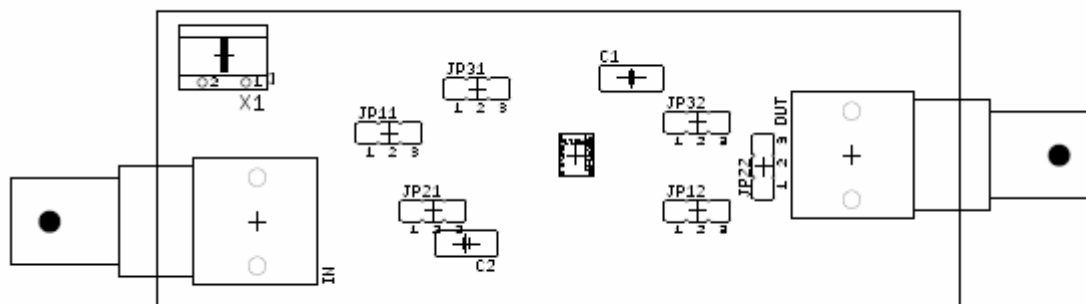
Rozměr desky 92,4 x 34,3 [mm], měřítko M1:1

A.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 92,4 x 34,3 [mm], měřítko M1:1

A.4 Osazovací plán plošného spoje

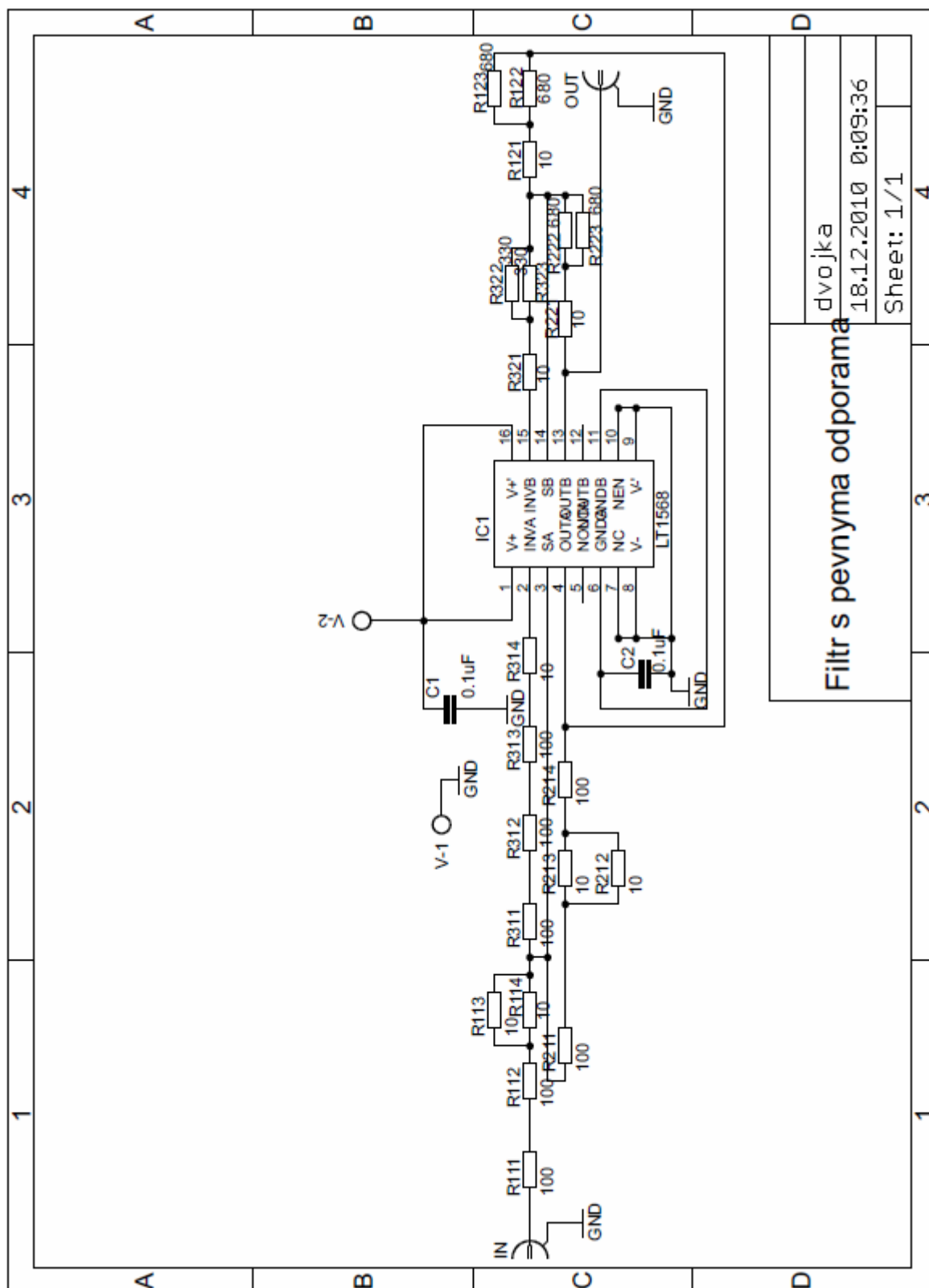


B SEZNAM SOUČÁSTEK

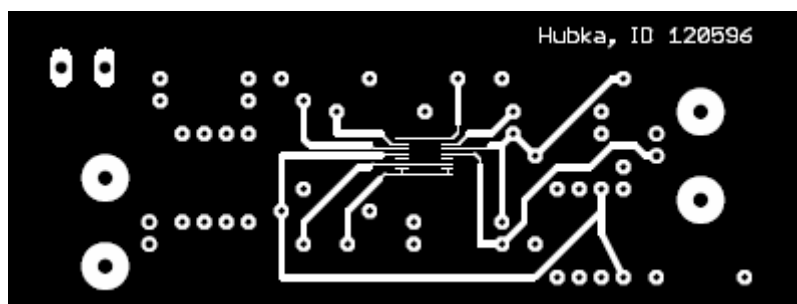
Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
IC1	LT1568	16-lead SSOP	Analogový filtr
C1, C2	10 μ F/50V	BL	Keramický kondenzátor
BNC1, BNC2			BNC konektor (50 Ω)
JP11, JP21, JP31, JP12, JP22, JP32			Lišta kontaktová- jednořadá 1 x 3 kontaktů
V1,2			Lišta kontaktová napájecí-jednořadá 1 x 2 kontaktů

C FILTR S PEVNÝMI REZISTORY

C.1 Obvodové zapojení

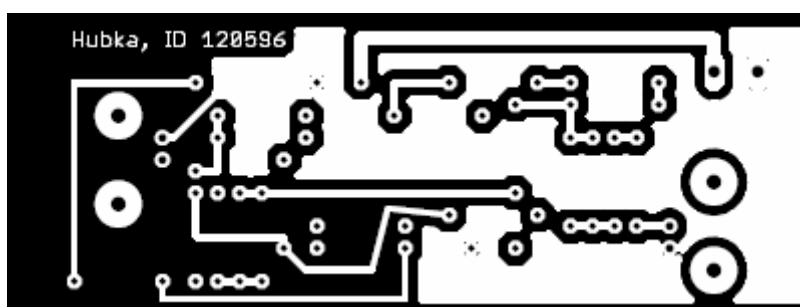


C.2 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



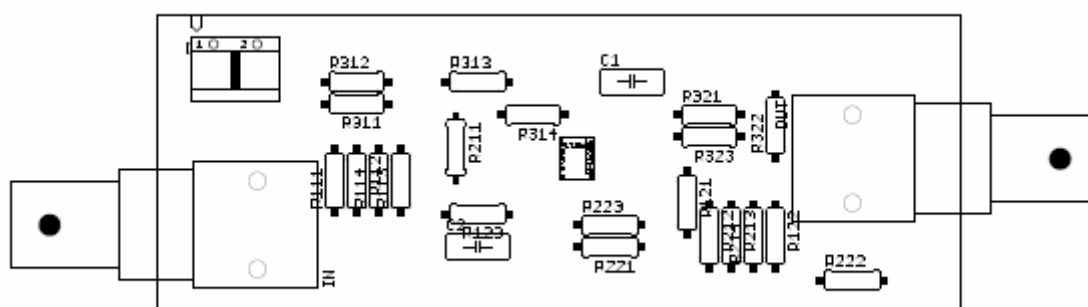
Rozměr desky 92,4 x 34,3 [mm], měřítko M1:1

C.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 92,4 x 34,3 [mm], měřítko M1:1

C.4 Osazovací plán plošného spoje

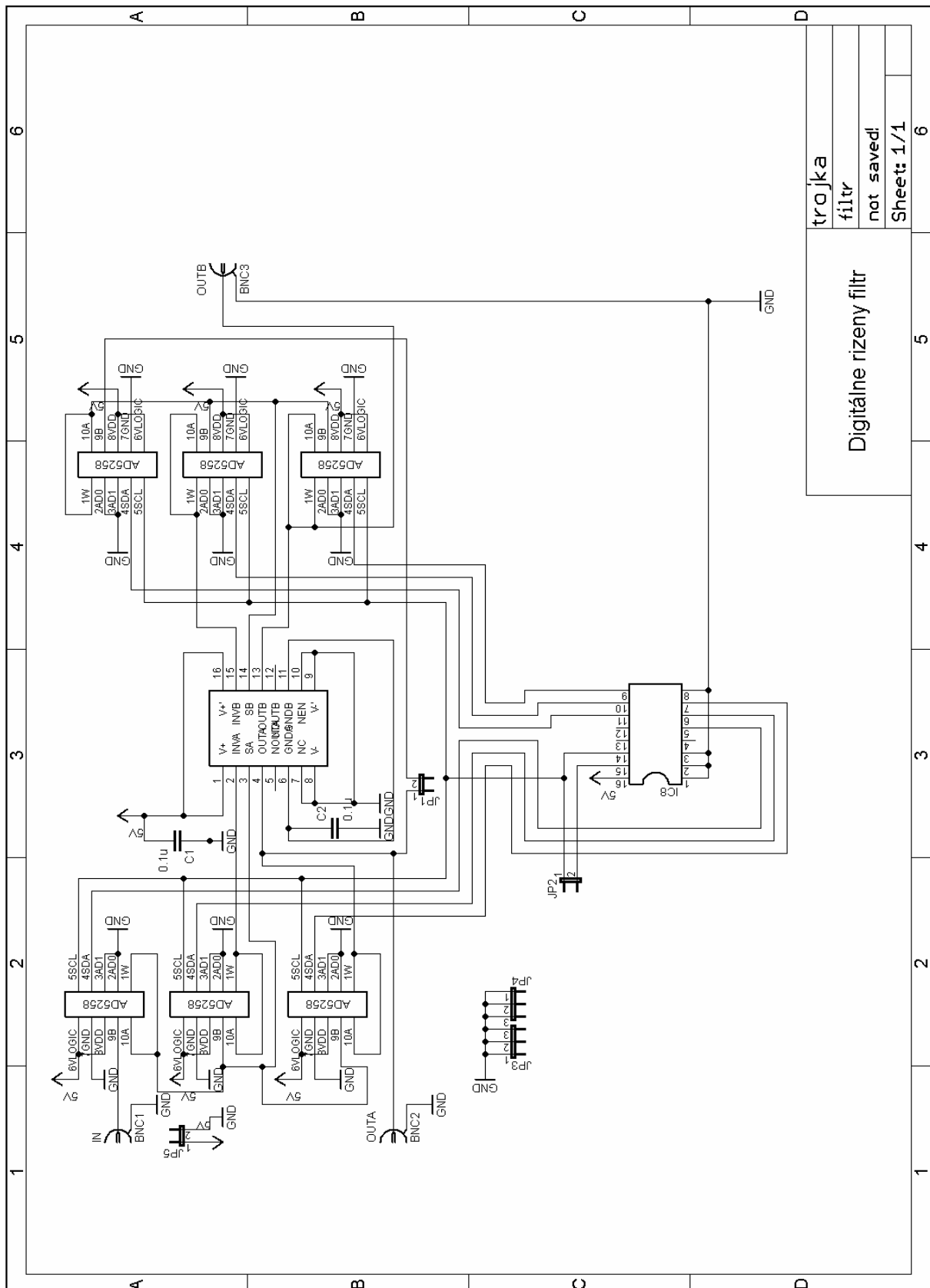


D SEZNAM SOUČÁSTEK

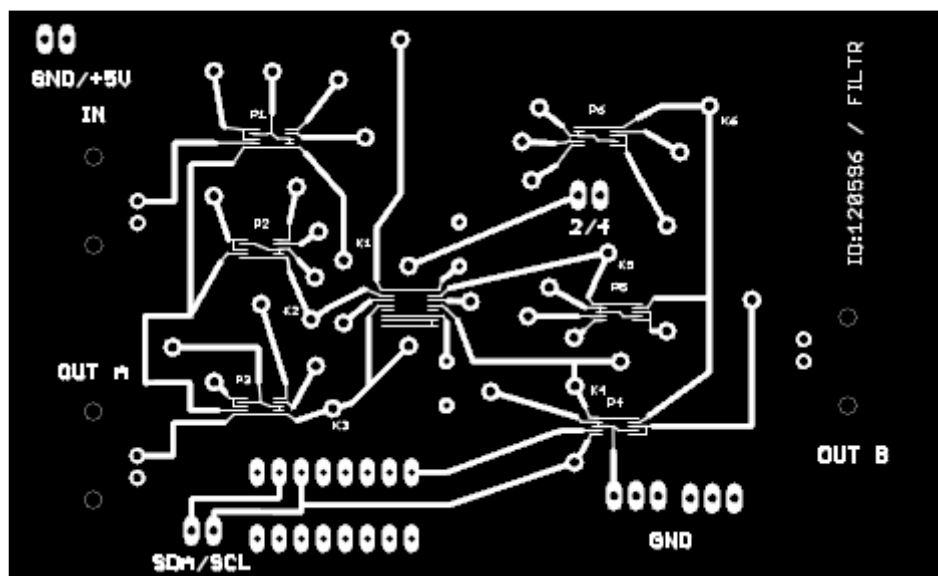
Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
IC1	LT1568	16-lead SSOP	Analogový filtr
C1, C2	10 μ F/50V	BL	Keramický kondenzátor
R113, R114, R121, R212, R213, R221, R314, R321,	10 Ω	0207	Rezistor metaloxidový
R111, R114, R211, R214, R311, R312, R313	100 Ω		
R322, R323	330 Ω	0207	Rezistor metaloxidový
R122, R123, R222, R223	680 Ω	0207	Rezistor metaloxidový
BNC1, BNC2			BNC konektor (50 Ω)
V1,2			Lišta kontaktní napájecí-jednořadá 1 x 2 kontaktů

E DIGITÁLNĚ ŘÍZENÝ FILTR

E.1 Obvodové zapojení

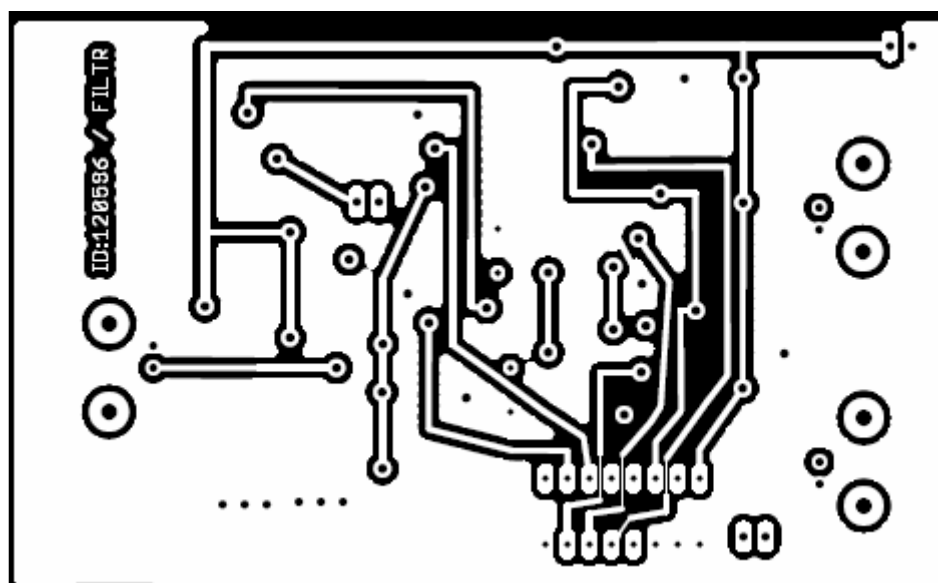


E.2 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



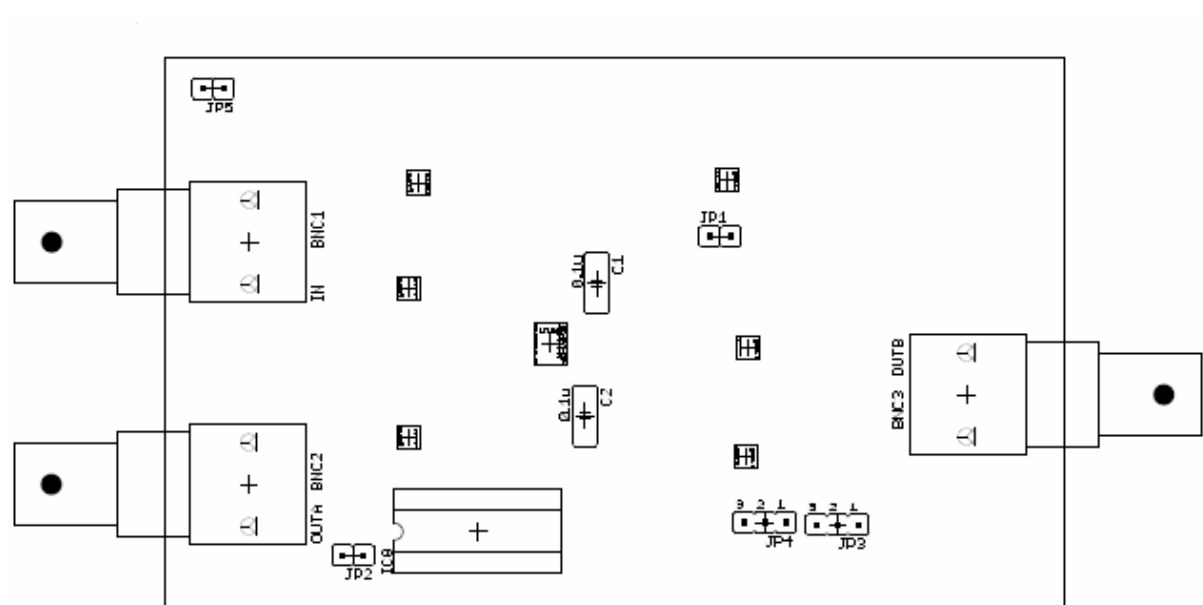
Rozměr desky 108,9 x 66,7 [mm], měřítko M1:1

E.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 108,9 x 66,7 [mm], měřítko M1:1

E.4 Osazovací plán plošného spoje



Rozměr desky 108,9 x 66,7 [mm], měřítko M1:1

F SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
IC1	LT1568	16-lead SSOP	Analogový filtr
IC2, IC31 IC4, IC5, IC6	AD5258	10-lead MSOP	Digitální potenciometr
IC8	PCF8574	N	expandér
C1, C2	10 μ F/50V	BL	Keramický kondenzátor
BNC1, BNC2, BNC 3			BNC konektor (50W)
JP1			Lišta kontaktová přepínající 2./4. řád filtru, jednořadá 1 x 2 kontaktů
JP2			Lišta kontaktová přivádějící TWI komunikaci, jednořadá 1 x 2 kontaktů
JP3, JP4			Lišta kontaktová připjující parazitní kapacity, jednořadá 1 x 6 kontaktů
JP5			Lišta kontaktová napájecí, jednořadá 1 x 2 kontaktů

G VZOROVÁ LABORATORNÍ ÚLOHA

Název úlohy:

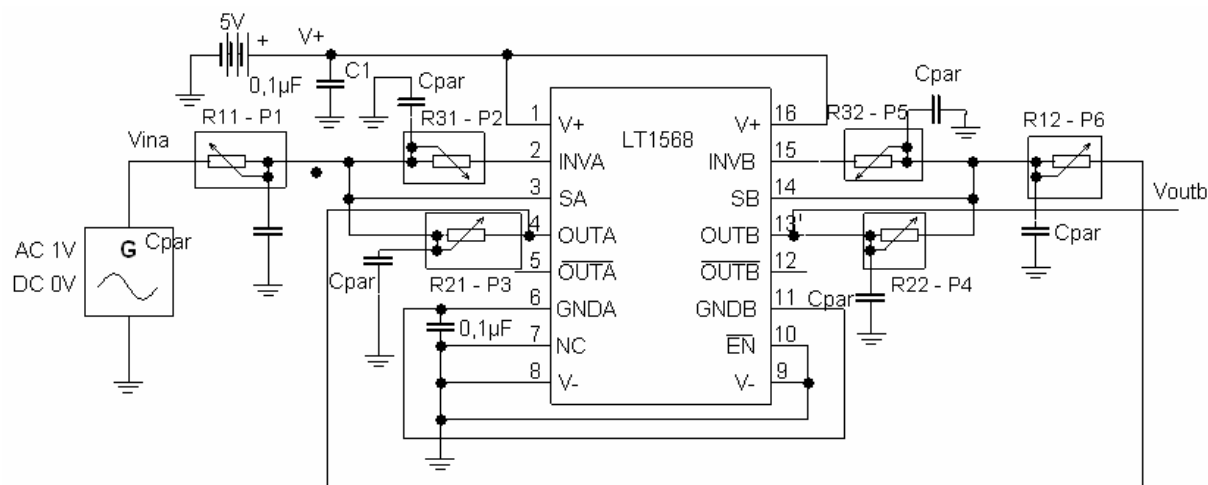
ANALOGOVÝ FILTR 2. NEBO 4. ŘÁDU ŘÍZEN DIGITÁLNÍMI POTENCIOMETRY

Následující laboratorní úloha je zaměřená na problematiku chování digitálních potenciometrů řídící analogový filtr. Na přípravku, který představuje digitálně řízený integrovaný filtr LT1568 typu dolní propust 2. nebo 4. řádu, se studenti seznámí nejen s vlastnostmi tohoto filtru, ale osvojí si také základní dovednosti spojené s řízením digitálních potenciometrů.

Teoretický úvod

Integrovaný aktivní filtr LT1568 představuje dolní propust 2. nebo 4. řádu, která patří mezi základní obvody používané v mnoha různorodých aplikacích. Často o něm můžeme slyšet v souvislosti s jevem zvaným aliasing, ke kterému může docházet v situacích, kdy se spojitá informace převádí na diskretní (nespojitou). V současné technice se s aliasingem nejčastěji setkáváme při převodu analogového signálu na digitální pomocí A/D převodníků (například analogový záznam hudby je pro uložení na CD vzorkován frekvencí 44,1kHz, aby CD mohlo přenést kmitočty do 22kHz bez aliasingu). Je tedy nutné před převodník spojitého signálu na diskretní ve většině případů zařadit tzv. antialiasingový filtr, který má za úkol odfiltrovat frekvence vyšší než odpovídají Shannonovu teorému.

Na obr. 1. se nachází zapojení filtru LT1568 s digitálními potenciometry AD5258 od firmy Analog devices. Každý má odporovou dráhu 1k Ω . Je naznačena i parazitní kapacitní kapacita mezi jezdcem potenciometru a zemí. Dle výrobce je typová parazitní kapacita $C_{PAR}=45\text{pF}$. Vysoká parazitní kapacita snižuje hodnotu f_m a má i za následek změnu aproximace. Při řízení filtru se s ní musí počítat.



Obr. 6.1.: Zapojení LT1568

Mezní frekvence filtru se vypočítá dle vztahu (1)

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2}}, \quad (1)$$

kde R_2 a R_3 představují rezistory na levé či pravé straně filtru a kapacity C_1 a C_2 jsou interní kapacity, kde $C_1=105,7\text{pF}$ a $C_2=141,3\text{pF}$. Zesílení filtru se dá spočítat dle (2)

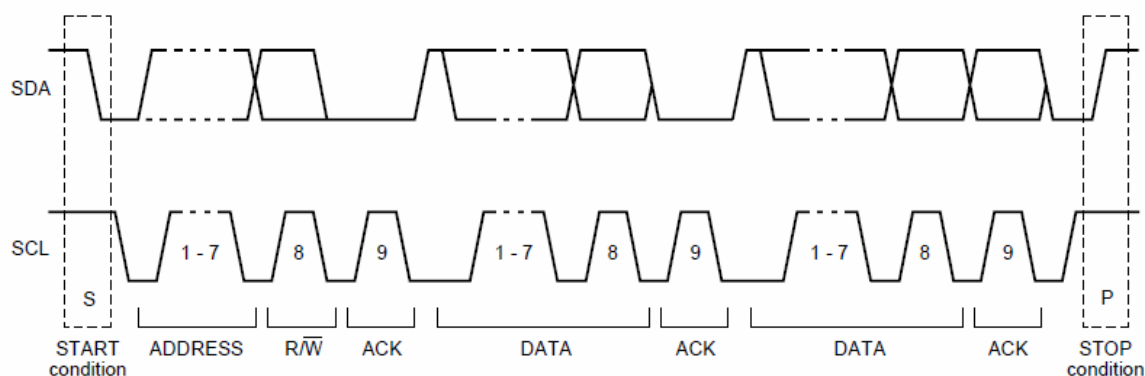
$$A = \frac{R_2}{R_1}. \quad (2)$$

Přenos filtru se vypočítá podle vztahu (3)

$$K_u = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right), \quad (3)$$

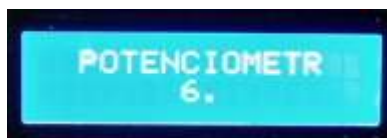
kde U_2 je výstupní napětí a U_1 je vstupní napětí.

Pro řízení digitálních potenciometrů se využívá sběrnice I²C, je naznačena na obr 5.2. Využíván bude datový vodič SDA a synchronizační SCL.



Obr. 6.2.: Přenos dat po sběrnici I²C – převzato z [8]

K dispozici je ovládací deska EvB 4.3, na které je mikrokontrolér Atmega32 s nahráním programem. Ovládání programu je jednoduché, ovládá se pomocí maticové klávesnice a LCD displeje. Po zapnutí desky se asi 5s inicializuje displej. Po inicializaci je uživatel vyzván, ať zadá pořadové číslo digitálního potenciometru. Zadávání se provádí klávesami 1-6. Volba se potvrdí klávesou *. Na obr. 3. je názorná ukázka výběru 6. digitálního potenciometru.



Obr. 6.3.: Výběr 6. digitálního potenciometru

Po volbě digitálního potenciometru následuje nastavení požadované ohmické hodnoty potenciometru. Rozsah nastavované hodnoty byl upraven o odpor jezdce - 150Ω . Nastavování se provádí klávesami 1-9 a potvrzuje opět klávesou *. Po potvrzení zadání se zadaná hodnota zaokrouhlí k ohmické hodnotě nejbližší možné pozice a vypíše se nastavovaná pozice digitálního potenciometru. Při změně hodnoty vybraného potenciometru má uživatel možnost vidět již zadanou hodnotu dříve, viz. obr 4., kde „R“ značí zadávanou hodnotu, „RZ“ je aktuální hodnota, „RO“ značí zaokrouhlenou hodnotu a „POZICE“ je pozice jezdce. Při stisknutí klávesy # se provede restart ohmické hodnoty vybraného digitálního potenciometru. To znamená nastavení nulové pozice – bude brána pouze ohmická hodnota jezdce.



Obr. 6.4.: Zadávání hodnoty odporu digitálního potenciometru

Při stisku klávesy D se provede celkový restart všech digitálních potenciometrů.

Zadání

1. Seznamte se s pracovištěm a proveďte zapojení přípravku.
2. Proměřte přenos filtru na 2. nebo 4 řadu, volte jednu ze tří možných aproximací.
3. Proměřte zesílení či útlum filtru na základě vztahu (3).
4. Proměřte přesnost nastavování hodnot odporu digitálního potenciometru.
5. Proměřte přenos filtru 2. nebo 4. řádu při připojených „parazitních“ kapacit.
6. Na základě požadavků stanovených učitelem vyberte z nabídky výrobců 3 digitální potenciometry.
7. U jednoho vámi zvoleného digitálního potenciometru sestavte komunikační řetězec pro zápis libovolné pozice.
8. Výsledky měření sestavte do přehledné laboratorní zprávy.

Postup měření

1. Seznamte se na pracovišti s přípravkem a ovládací deskou. Přípravek obsahuje zapojení filtru LT1568, šesti digitálních potenciometrů AD5258 a potřebných konektorů. Propojte pomocí vodičů SDA a SCL desku s přípravkem. Na přípravku jsou potřebné konektory označeny. 1. kanál připojte na konektor „IN“ na přípravku. 2. kanál připojte na „OUTA“ nebo na „OUTB“ – podle řádu. Propojte přípravek a desku napájecími vodiči. Zkontrolujte, zda-li jumper, který se nachází nad mikrokontrolérem, je rozpojen! Na zdroji nastavte 9V a připojte je k napájecí svorkovnici v levém horním rohu označené „POWER“ ve správné polaritě.

2. Dle datasheetu LT1568, který se nalézá na pracovišti, si vyberte z dostupných aproximací aproximaci přenosové funkce pro 2. nebo pro 4. řád. Pod aproximací se nalézá tabulka mezních frekvencí a hodnot jednotlivých odporů. Pomocí programu nastavujte během měření tyto hodnoty odporů do digitálních potenciometrů. Před měřením rozpojte nebo zapojte jumper „2/4“ v pravé části přípravku – podle řádu. Když budete měřit 4. řád, tak ale s tím, že jumper „2/4“ bude spojen a druhý kanál vektorového analyzátoru bude připojen na konektoru „OUT B“. Změřené hodnoty přenosu si zapisujte do přehledných tabulek.

3. Vyberte si aproximaci a mezní frekvenci - nejlépe z prostředku tabulky - pro 2. řád a nastavte přípravek na měření 2. řádu. Do digitálních potenciometrů запиšte hodnoty odporů. Na potenciometru P1 snižujte hodnotu po krocích na 50%. Krok můžete volit např. 10%. Změřené hodnoty přenosu si zapisujte do přehledné tabulky. Pak запиšte do P1 výchozí tabulkovou hodnotu a zvyšujte hodnotu odporu na 150% opět po krocích např. 10%. Změřené hodnoty přenosu si opět zapisujte do přehledné tabulky.

4. Odpojte od přípravku vektorový analyzátor, napájení zůstává. U vámi vybraného potenciometru, např. P1, nastavte programem minimální odpor. Zapište si nastavovanou hodnotu odporu a změřenou hodnotu odpor. Zvětšete odpor potenciometru o vámi vybraný krok, např. 100Ω. Opět si zapište nastavovanou hodnotu a změřenou hodnotu. Opakujte až do maximální hodnoty odporu potenciometru. Porovnejte vámi nastavované hodnoty odporu a naměřené hodnoty odporu potenciometru.

5. Připojte vektorový analyzátor. Zvolte aproximaci pro 4. řád a nastavte přípravek pro měření 4. řádu. Vyberte si z tabulky mezní frekvenci a hodnoty odporů zapište do potenciometrů. Mezi svorky „K1“ až „K6“ a „GND“ připojujte „parazitní“ kapacitu 22pF. Změřené hodnoty přenosu si zapište do přehledné tabulky.

6. Digitální potenciometry můžete vyhledávat u firem Analog devices, Texas instrument, Microchip, aj.

7. Pokud si zvolíte sestavení komunikačního řetězce po sběrnici I²C, můžete mít základní inspiraci z obr. 3..

8. U každého naměřeného přenosu sestavte graf a popište osy. V závěru vhodně okomentujte naměřené výsledky a zjištěné poznatky. Bod zadání 6. a 7. můžete vypracovat doma.

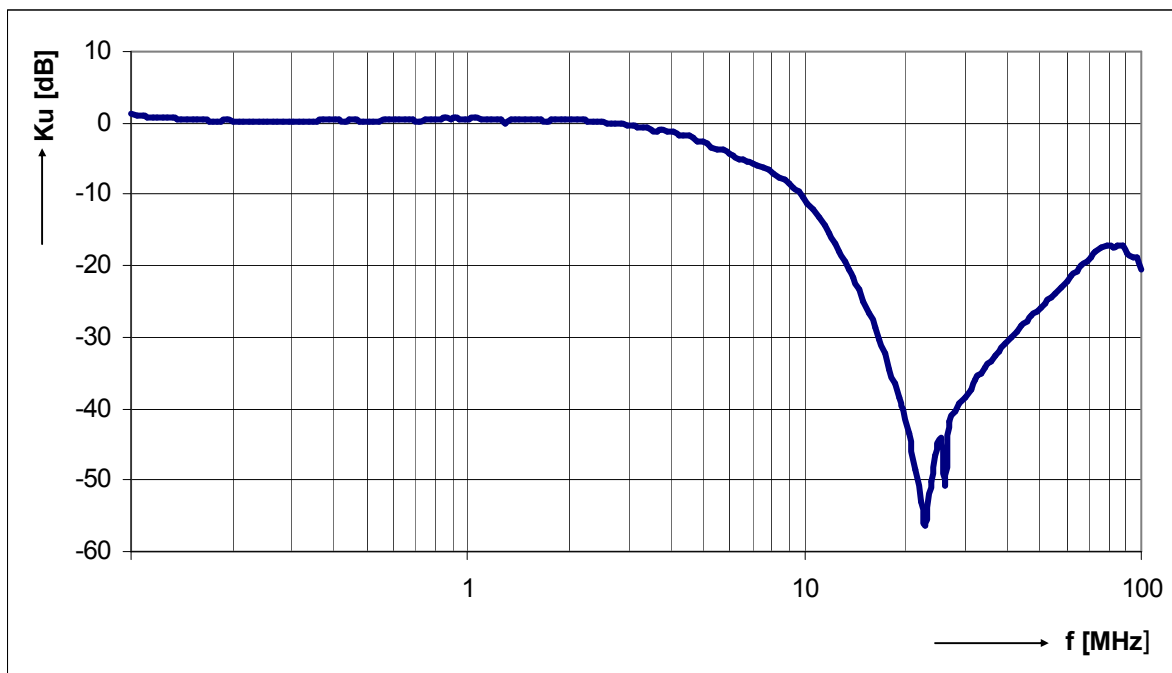
Měřicí pomůcky

Vektorový analyzátor Agilent E5071C

Laboratorní zdroj diametral P230R51D

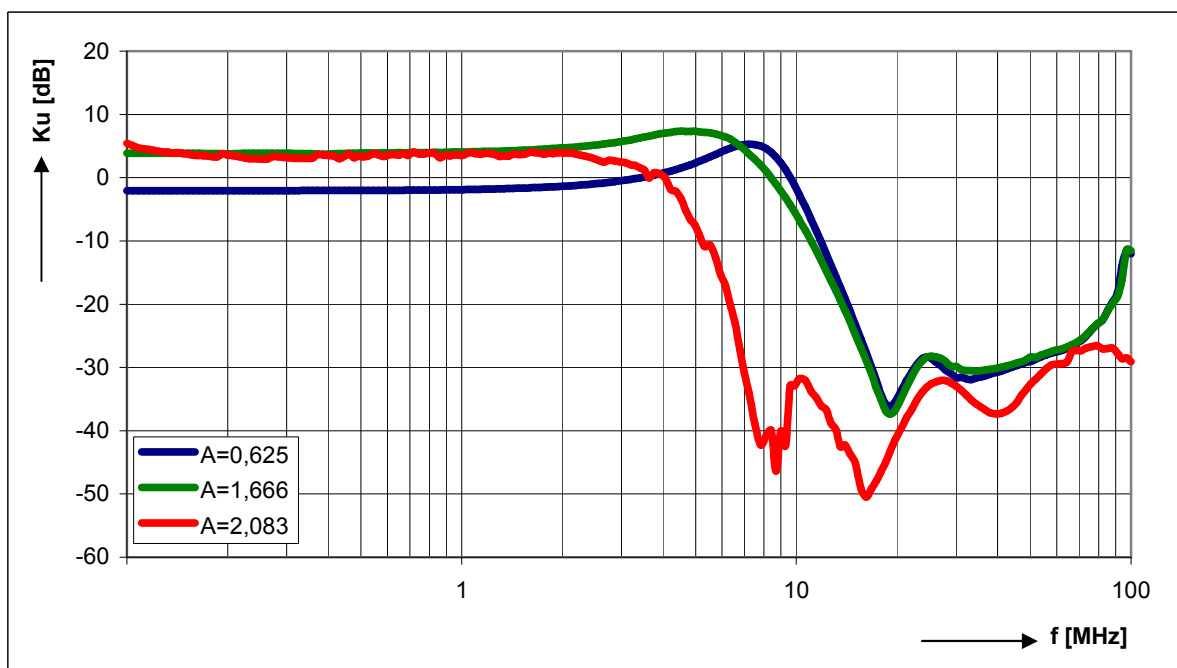
Vypracování

Ad 2.



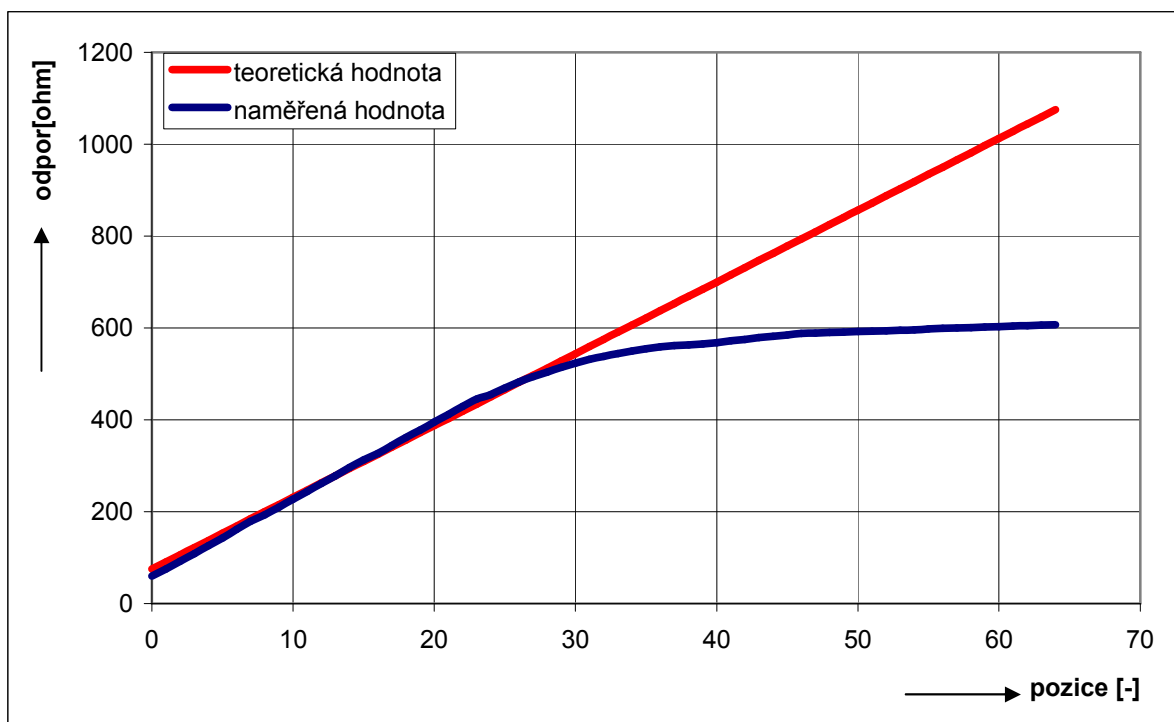
Graf 1: Dolní propust s digitálními potenciometry

Ad 3.



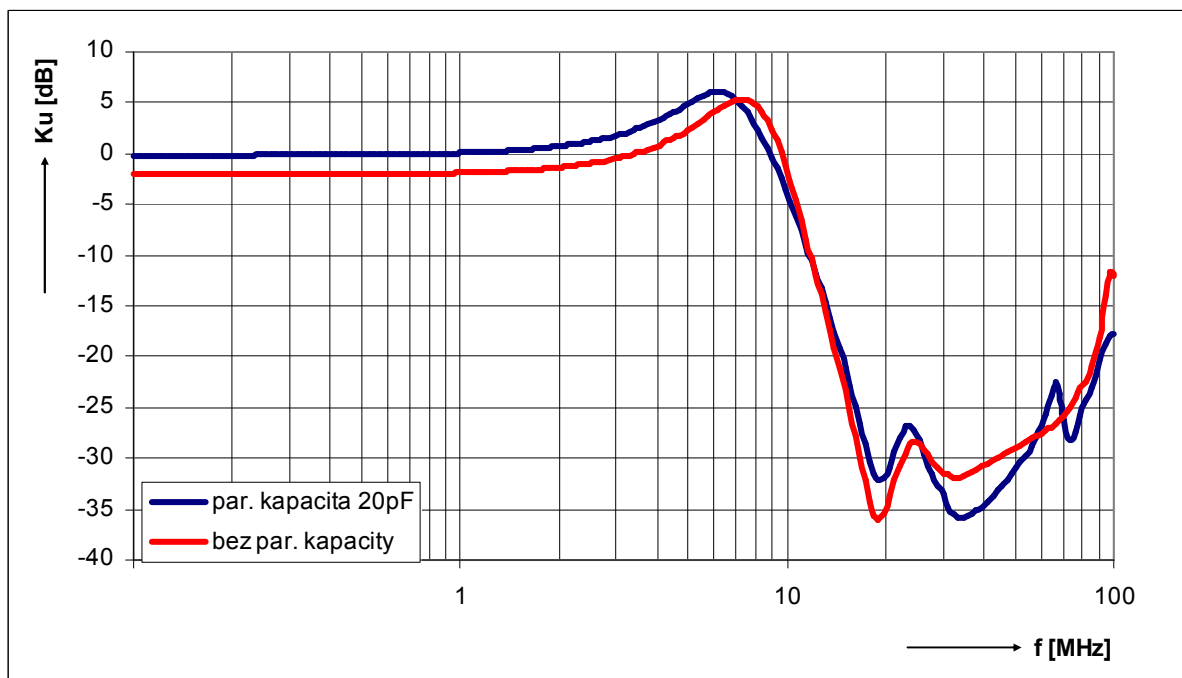
Graf 2: Přenos filtru s různým poměrem zesílení A

Ad 4.



Graf 3: Linearita digitálního potenciometru

Ad 5.



Graf 4: Přidaná parazitní kapacita 20pF na jeden potenciometr

Ad 6.

Např.: Minimální $f_m=500\text{kHz}$, odpor dráhy minimálně $R=5\text{k}\Omega$, řízení pomocí sběrnice I²C nebo SPI, rozlišovací schopnost minimálně 512 pozic.

Tomuto vyhovují digitální potenciometry od firmy Analog Devices: AD5175, AD5291, AD5174

Ad 7.

Byl vybrán digitální potenciometr AD5175. Adresní byte je 0b0101111, instrukční byte je 0b00000001, zápis 10. pozice je 0b00001010.

Závěr:

Cvičením jsem si ověřil měření přenosů filtru řízeném digitálními potenciometry. Od 10 MHz nastává zlom z důvodu překročení šířky pásma digitálních potenciometrů. Maximální útlum je 55 dB. Graf 2 zobrazuje přenos filtru při změně poměru A. V prvním případě je $A=0,625$, ve druhém je $A=1,666$ a ve třetím je $A=2,083$. Ve třetím případě už dochází ke zkreslení celé charakteristiky a velmi výraznému zmenšení mezní frekvence přibližně o 4MHz. Z grafu 3. lze vyčíst, že maximální nastavitelná hodnota odporu digitálního potenciometru je přibližně 600Ω . Přibližně od 45. pozice odpor potenciometru zůstal neměnný, či se zvyšoval 1-2 Ω /pozice. Můžou za to parazitní vlivy, které se zvyšují s nastavenou pozicí. V grafu 5.2 je vyobrazena chyba neměřené a nastavované hodnoty digitálního potenciometru. Graf 4. - Ke každému digitálnímu potenciometru byla mezi jezdec a zem vložena parazitní kapacita 22pF. Dochází k posunu mezní frekvence a k nepatrnému snížení strmosti přechodové charakteristiky. Na základě požadavků byly vybrány 3 digitální potenciometry, a to AD5172, AD5291 a AD5174. Byl vybrán digitální potenciometr AD5175. Adresní byte je 0b0101111, instrukční byte je 0b00000001, zápis 10. pozice je 0b00001010.

H PROGRAMOVÁ ČÁST

H.1 Výběr z programového kódu

```
while (1)
{
    PORTB =0b01111111;
    if (bit_is_clear(PINB, 3))
    {
        _delay_ms(300);
        lcd_gotoxy(1,0);
    }
    if (bit_is_clear(PINB, 2))
    {
        if (volba_potenciometru!=-1)
        {
            _delay_ms(300);
            for (i=0;i<4;i++)
            {
                cislo_zadane_uzivatelem[i]=-1;
            }
            startujeme_twi();
            adresa(0b0101000);
            instrukce_data(0b10100001);
            instrukce_data(0b00000000);
            konec();
            n=0;
            lcd_clrscr();
            lcd_gotoxy(5,0);
            lcd_puts("RESET");
            lcd_gotoxy(0,1);
            lcd_puts("RO:");
            lcd_gotoxy(8,1);
            lcd_puts("00000000");
            _delay_ms(2000);
            lcd_clrscr();
            lcd_gotoxy(0,0);
            lcd_puts("R:");
        }
    }
    if (bit_is_clear(PINB, 1))
    {
        _delay_ms(300);
        if (volba_potenciometru!=-1)
        {
            help=1;
            lcd_gotoxy(n+2,0);
            lcd_puts("0");
            cislo_zadane_uzivatelem[n]=0;
            if (n==3)
            goto konec_zadavani;
            else
            n=n+1;
        }
    }
    if (bit_is_clear(PINB, 0))
    {
        if (hilfe!=0)
        goto konec_zadavani;
```

```
    }
PORTB = 0b11011111;
    if (bit_is_clear(PINB, 3))
    {
        _delay_ms(300);
        lcd_gotoxy(n,0);
    }
    if (bit_is_clear(PINB, 2))
    {
        _delay_ms(300);
        if (volba_potenciometru== -1)
        {
           hilfe=6;
            lcd_gotoxy(7,1);
            lcd_puts("6");
        }
        else
        {
            help=1;
            lcd_gotoxy(n+2,0);
            lcd_puts("6");
            cislo_zadane_uzivatelem[n]=6;
            if (n==3)
                goto konec_zadavani;
            else
            {
                n=n+1;
            }
        }
    }
    if (bit_is_clear(PINB, 1))
    {
        _delay_ms(300);
        if (volba_potenciometru== -1)
        {
           hilfe=5;
            lcd_gotoxy(7,1);
            lcd_puts("5");
        }
        else
        {
            help=1;
            lcd_gotoxy(n+2,0);
            lcd_puts("5");
            cislo_zadane_uzivatelem[n]=5;
            if (n==3)
                goto konec_zadavani;
            else
            {
                n=n+1;
            }
        }
    }
    if (bit_is_clear(PINB, 0))
    {
        _delay_ms(300);
        if (volba_potenciometru== -1)
        {
           hilfe=4;
            lcd_gotoxy(7,1);
            lcd_puts("4");
        }
        else
        {
            help=1;
```

```

        lcd_gotoxy(n+2,0);
        lcd_puts("4");
        cislo_zadane_uzivatelem[n]=4;
        if (n==3)
            goto konec_zadavani;
        else
            n=n+1;
    }
}
PORTB =0b11101111;
if (bit_is_clear(PINB, 3))
{
    _delay_ms(300);
    lcd_gotoxy(1,0);
}
if (bit_is_clear(PINB, 2))
{
    _delay_ms(300);
    if (volba_potenciometru== -1)
    {
        hilfe=3;
        lcd_gotoxy(7,1);
        lcd_puts("3");
    }
    else
    {
        help=1;
        lcd_gotoxy(n+2,0);
        lcd_puts("3");
        cislo_zadane_uzivatelem[n]=3;
        if (n==3)
            goto konec_zadavani;
        else
            n=n+1;
    }
}
if (bit_is_clear(PINB, 1))
{
    _delay_ms(300);
    if (volba_potenciometru== -1)
    {
        hilfe=2;
        lcd_gotoxy(7,1);
        lcd_puts("2");
    }
    else
    {
        help=1;
        lcd_gotoxy(n+2,0);
        lcd_puts("2");
        cislo_zadane_uzivatelem[n]=2;
        if (n==3)
            goto konec_zadavani;
        else
            n=n+1;
    }
}
if (bit_is_clear(PINB, 0))
{
    _delay_ms(300);
    if (volba_potenciometru== -1)

```

```
        {
        hilfe=1;
        lcd_gotoxy(7,1);
        lcd_puts("1");
        }
        else
        {
        help=1;
        lcd_gotoxy(n+2,0);
        lcd_puts("1");
        cislo_zadane_uzivatelem[n]=1;
        if (n==3)
        goto konec_zadavani;
        else
        n=n+1;
        }
    }
}
```

I OBSAH CD

- bakalářská práce ve verzi pdf a doc
- zdrojový soubor pro ovládání digitálních potenciometrů včetně LCD knihovny
- podklady pro výrobu plošných spojů