

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jakostní přepínání audio signálů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš MALOTÍN**
Osobní číslo: **E15B0162P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Jakostní přepínání audio signálů**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte, jaké jsou možnosti přepínání audio signálů.
2. Vyberte vhodné varianty přepínačů s ohledem na co nejlepší předpokládané parametry.
3. Realizujte laboratorní měření vybraných možností přepínání audio signálů.
4. Vyberte z výsledných parametrů vhodnou koncepci přepínání audio signálů, která bude použita v akustických laboratořích FEL.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

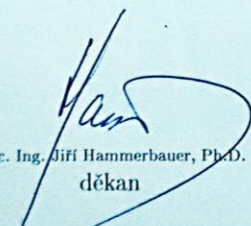
Seznam odborné literatury:

1. Small Signal Audio Design, Self Douglas, ISBN-13: 978-0415709743.
2. Shields and Grounds: Safety, Power Mains, Studio, Cable and Equipment, AES, Jour. Audio Eng. Soc., Vol 43, No 5, June 1995.
3. Audio Power Amplifier Design, Self Douglas, ISBN 978-0-240-52613-3.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ladislav Zuzjak**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

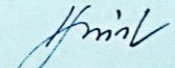
Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan

V Plzni dne 14. října 2016




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na možnosti přepínání audio signálů. Jsou v ní zkoumány faktory ovlivňující kvalitu spínání, zejména s ohledem na zkreslení procházejících signálů a jejich potlačení ve vypnutém stavu. Obsahuje shrnutí možností mechanického i elektronického přepínání, jednotlivá schémata zapojení jsou detailně popsána. Vybraná zapojení byla laboratorně změřena a výsledky měření jsou zaneseny do grafů a tabulek. V koncepci jsou zhodnoceny výsledky měření a s ohledem na požadavky pro přepínač do akustické laboratoře jsou navrženy varianty vhodné k realizaci. V závěru je zhodnocení výsledků práce a návrh další fáze projektu.

Klíčová slova

Přepínání audio signálů, elektronické přepínání, mechanické přepínání, zkreslení, signálové přeslechy, analogová hradla CMOS, tranzistory JFET, akustická laboratoř.

Abstract

This bachelor thesis is focused on switching audio signals. Factors affecting the switching quality are examined, especially with respect to distortion of the passing signals and their suppression in the off state. It contains a summary of the possibilities of mechanical and electronic switching, the individual wiring diagrams are described in detail. Selected connections were measured in laboratory and the results of the measurements are plotted in charts and tables. In the concept, the measurement results are evaluated and, with regard to the requirements for the switch to the acoustic laboratory, suitable designs are chosen for implementation. In conclusion, results are evaluated and the procedure for the next phase of the project is outlined.

Key words

Switching audio signals, electronic switching, mechanical switching, distortion, signal crosstalk, analog CMOS gates, JFET transistors, acoustic laboratory.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2017

Tomáš Malotín

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Ladislavu Zuzjakovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 TEORIE PŘEPÍNÁNÍ AUDIO SIGNÁLŮ	11
1.1 ZKRESLENÍ SIGNÁLU	11
1.2 PŘESLECHY SIGNÁLU	12
2 MOŽNOSTI PŘEPÍNÁNÍ AUDIO SIGNÁLŮ	13
2.1 MECHANICKÉ PŘEPÍNÁNÍ AUDIO SIGNÁLŮ	14
2.1.1 Otočné a tlačítkové přepínače	15
2.1.2 Virtuální kontakt	16
2.1.3 Relé přepínače	17
2.2 ELEKTRONICKÉ PŘEPÍNÁNÍ AUDIO SIGNÁLŮ	17
2.2.1 Spínání CMOS analogovými branami	17
2.2.2 Spínání tranzistory JFET	25
2.2.3 Průmyslově vyráběné audio přepínače	30
3 MĚŘENÍ	33
3.1 OTOČNÝ PŘEPÍNAČ	34
3.2 VIRTUÁLNÍ KONTAKT	36
3.3 RELÉ PŘEPÍNAČ	38
3.4 PŘEPÍNAČ S TRANZISTORY JFET	39
4 KONCEPCE	41
ZÁVĚR	44
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	45
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

Hi-Fi High fidelity

THD Total harmonic distortion

THD+N Total harmonic distortion + noise

CMOS Complementary Metal–Oxide–Semiconductor

FET Field-Effect Transistor

JFET..... Junction gate field-effect transistor

MOSFET..... Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

Úvod

Předkládaná práce se zabývá přepínáním audio signálů. V práci měly být shrnuty možnosti přepínání a popsány varianty přepínačů za účelem návrhu koncepce přepínání audio signálů, která bude použita v akustických laboratořích FEL.

V první řadě byla provedena analýza současného stavu řešení problematiky přepínání audio signálů za použití odborné literatury. Valná část informací byla čerpána z knihy *Small Signal Audio Design*, kde je problematice přepínání audio signálů věnována celá kapitola. V další části postupu byla jednotlivá zapojení softwarově nakreslena a následně byla slovně popsána jejich funkčnost.

Po důkladné analýze možností byly vybrané přepínače laboratorně změřeny, aby byly ověřeny předpokládané parametry spínání. Na základě požadavků a změřených hodnot byla vyhotovena koncepce, ve které jsou uvedeny varianty přepínačů vhodné k realizaci.

1 Teorie přepínání audio signálů

Přepínání audio signálů je fundamentální úkon při jakémkoli zpracování signálu, ať už v profesionálním studiu, nebo v domácích podmínkách, např. ve vstupních obvodech Hi-Fi zesilovačů. Různé aplikace kladou různé nároky na kvalitu spínání a mají-li být signály přeneseny co nejvěrněji, je potřeba možnostem jejich spínání věnovat náležitou pozornost.

Věrnost signálu přímo ovlivňuje věrnost zvukové reprodukce, proto je pro co nejvyšší zachování zvukové integrity zapotřebí zajistit, aby spínání nemělo negativní vliv na procházející signál v podobě zkreslení, ale také aby nedocházelo k přeslechům z jiných kanálů, které nejsou v sepnutém stavu.

1.1 Zkreslení signálu

Obecně se zkreslením signálu rozumí jakákoli odchylka od původního tvaru signálu. V audio aplikacích to znamená rozdílný tvar vlny na výstupu nějakého zařízení, přepínače, nebo třeba jen vodiče, než jaký byl na vstupu. Existují aplikace, ve kterých je zkreslení vyžadováno a je schválně do signálu zaneseno, ovšem zpravidla je při signálovém zpracování vyžadováno co možná nejvyšší zachování věrnosti signálu, a pak se i zdánlivě zanedbatelné zkreslení stává velmi nežádoucím jevem.

Míru harmonického zkreslení signálu určuje veličina označovaná jako THD (z angl. total harmonic distortion) a jak už z názvu vyplývá, zkreslení je měřeno vždy pro harmonické průběhy, aby bylo objektivní. THD je definováno jako poměr výkonů harmonických vyšších řádů ku výkonu harmonické základní a je obvykle vyjádřeno v procentech.

$$THD = \frac{P_{\text{vyšších řádů}}}{P_1} \cdot 100 [\%]$$

THD ale nerespektuje neharmonické zkreslení, tedy šum, který při průchodu signálu vzniká, a proto, chceme-li získat informaci o absolutní míře zkreslení signálu, je nutné do výpočtů zahrnout i vliv šumu a zavádíme tedy novou veličinu vyjadřující poměr výkonů harmonických vyšších řádů a šumu ku harmonické základní, označovanou jako THD+N:

$$THD + N = \frac{P_{\text{vyšších řádů}} + P_{\text{sum}}}{P_1} \cdot 100 [\%]$$

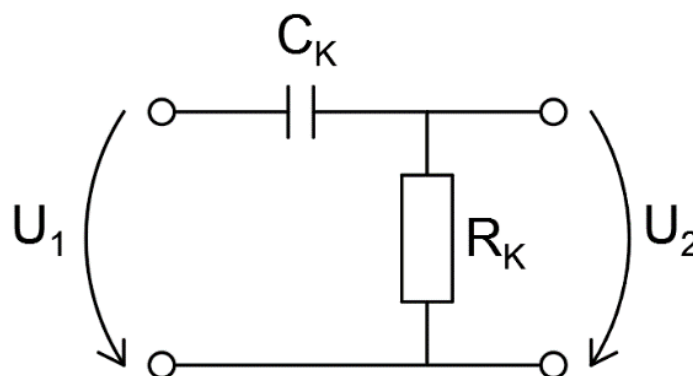
Z uvedených vztahů je patrné, že zkreslení signálu je frekvenčně závislé a proto je měřeno pro různé frekvence.

Při spínání audio signálů dochází ke zkreslení, když je spínač v sepnutém stavu. Snahou je dostat se na co nejnižší úroveň zkreslení, což však může vést na zvyšování vlivu jiného nežádoucího parametru, jímž je přeslech.

1.2 Přeslechy signálu

Přeslech v elektronice je jev, projevující se nežádoucí přítomností signálu v neaktivní (nesepnuté) části obvodu nebo kanálu. V audio aplikacích přeslech znamená průsak části signálu z jednoho kanálu do druhého, nebo přes vypnutý přepínač.

Obvykle je nechtěný přenos signálu způsoben kapacitním, induktivním nebo vodivým spojením částí obvodů nebo kanálů. U signálového přepínání má přeslech kapacitní charakter, ať už vlivem kapacity kontaktu u mechanických přepínačů, nebo vlivem vnitřní kapacity analogových hradel a tranzistorů u spínání elektronického. Parazitní kapacita ovlivňuje míru přeslechů a také z ní plyne jejich frekvenční závislost. Pro velmi vysoké frekvence se kapacita svým chováním blíží ke zkratu, proto jsou přeslechy markantnější se zvyšující se frekvencí signálu. Vypnutý přepínač se chová podobně jako filtr horní propust, odtud plyne nárůst přeslechů o 6dB/oktávu s rostoucí frekvencí.



Obr. 1: Náhradní schéma rozepnutého přepínače – filtr horní propust

Přenos filtru horní propust je popsán rovnicí:

$$A = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_K}{R_K + \frac{1}{j\omega C_K}} = \frac{j\omega C_K R_K}{1 + j\omega C_K R_K} [-]$$

Přenos, resp. přeslech, je obvykle vyjádřen v decibelech a je popsán rovnicí:

$$A = 10 \cdot \log \frac{U_2}{U_1} [\text{dB}]$$

Přeslech je možné změřit tak, že jeden kanál je připojen k napěťovému generátoru se známou hladinou generovaného signálu a ke kanálu, u kterého chceme přeslech stanovit, je připojen dostatečně citlivý voltmetr. Jakýkoli signál, který se objeví v testovaném kanálu (nebo na druhém konci vypnutého přepínače) je zaznamenán a přeslech bývá vyjádřen jako poměr signálu přeneseného do testovaného kanálu ku signálu původnímu. Tento poměr je vždy menší než jedna, proto při vyjádření v decibelech dostaneme záporné číslo. Měření probíhá pro různé frekvence nastavované na generátoru napětí.

Rovnice, ze které lze přeslech, resp. přenos stanovit, má tvar:

$$A = 10 \cdot \log \frac{U_2}{U_1} [\text{dB}]$$

2 Možnosti přepínání audio signálů

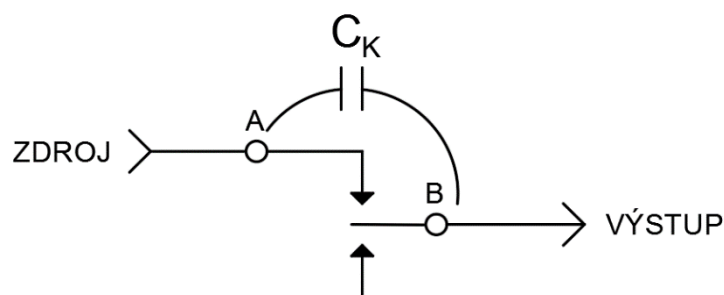
Existují dva základní způsoby, jak přepínání audio signálů realizovat, a to mechanicky nebo elektronicky. Všechny způsoby mechanického spínání jsou jen různými obměnami nejelementárnějšího způsobu elektrického spínání - mechanického spojení a rozpojení elektrického kontaktu. U elektronických přepínačů je spínání realizováno prostřednictvím polovodičových součástek, které jsou řízeny tak, aby u nich docházelo ke střídání mezi vodivým a nevodivým stavem v závislosti na řídicím signálu. Nejčastěji jsou k těmto účelům

využívány tranzistory ovládané elektrickým polem (MOSFET nebo JFET) kvůli dobrým vlastnostem pro přenos audio signálů.

2.1 Mechanické přepínání audio signálů

Mechanický přepínač v sepnuté poloze obvykle realizuje solidní kontakt o nízké rezistivitě, která obecně v přepínání audio signálů nepředstavuje problém. Signál prochází téměř nezkrácen, pouze se zanedbatelně malým úbytkem způsobeným přechodovým odporem kontaktů. Ani při rozepnutém stavu nepředstavují hodnoty rezistivity mechanických přepínačů problém, jejich velikost se pohybuje v řádech petaohmů a byla by tedy dostatečně vysoká na potlačení výskytu nežádoucího signálu, pokud by jeho průchod neumožňovala imaginární složka impedance – reaktance. Mezi rozepnutými kontakty se nevyhnutelně objevuje parazitní kapacita, která sice bývá obvykle malá (v řádu pF), je ale dost velká, aby dokázala přenést audiosignály vyšších frekvencí na druhou stranu rozepnutého kontaktu.

Velikost přeslechu je kromě frekvence signálu ovlivněna jednak velikostí kapacity kontaktu, což je parametr, který nelze zcela eliminovat, a jednak velikostí vstupní impedance zařízení, které je připojeno na výstup. Kapacitu mezi kontakty lze částečně ovlivnit zmenšením plochy kontaktu, ale obvykle přepínače s menší plochou kontaktů mají kontakty umístěny blíže u sebe, což způsobí opětovný nárůst kapacity. Obecně je tedy důležitým parametrem pro potlačení přeslechů vysoká impedance zařízení připojeného na výstup přepínače, která dokáže potlačit vliv parazitní kapacity kontaktu.



Obr.2: Přeslechová dráha rozepnutého mechanického kontaktu

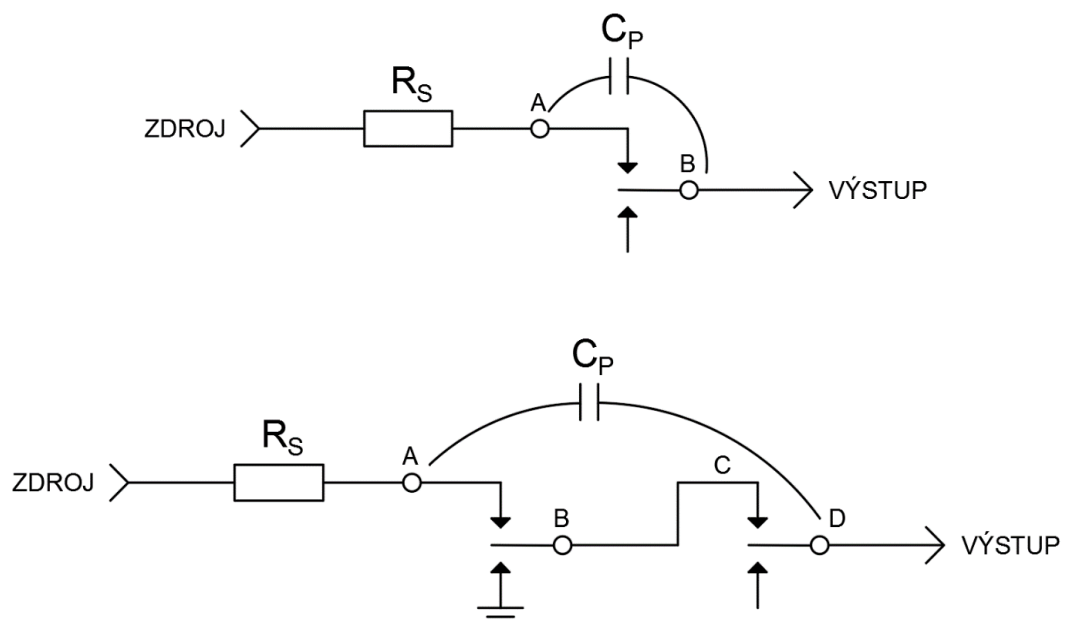
Kapacitu mezi kontakty C_K je poměrně snadné stanovit, pokud známe velikost přeslechů. Změřením přeslechu stanovíme přenos energie přes kombinaci RC, a pokud známe i velikost odporu, kapacitu můžeme dopočítat z uvedeného vzorce pro přenos. Jakmile stanovíme

velikost kapacity, můžeme dopočítat přeslechy pro různá zařízení na výstupu s různými velikostmi vstupní impedance.

2.1.1 Otočné a tlačítkové přepínače

Mechanické přepínače pro výběr vstupu, které nalezneme např. ve vstupních obvodech Hi-Fi zesilovačů, mohou být provedeny trojím způsobem – jako otočné, posuvné nebo tlačítkové. Ze shodnosti fyzikálního principu plyne shodnost jejich parametrů, proto je výběr spíše otázkou preferencí, než kvality spínání.

Velikost přeslechů je závislá na kapacitě kontaktu a impedancích připojených zařízení. Pokud bude impedance zařízení na vstupu vysoká, mohou být přeslechy významné. Uzemněním ostatních (neaktivních) vstupů dojde k mírnému zlepšení, ale pouze v jednotkách decibelů. Významnějšího potlačení přeslechů dosáhneme použitím dvou sériově řazených kontaktů pro jednu signálovou dráhu. Pokud spojovací část mezi kontakty uzemníme, přeslechová vzdálenost vzroste a parazitní kapacita bude mnohem nižší. Tímto způsobem lze dosáhnout snížení hladiny přeslechů na frekvenci 10kHz při zatěžovací impedanci 10k Ω o asi 20 dB.



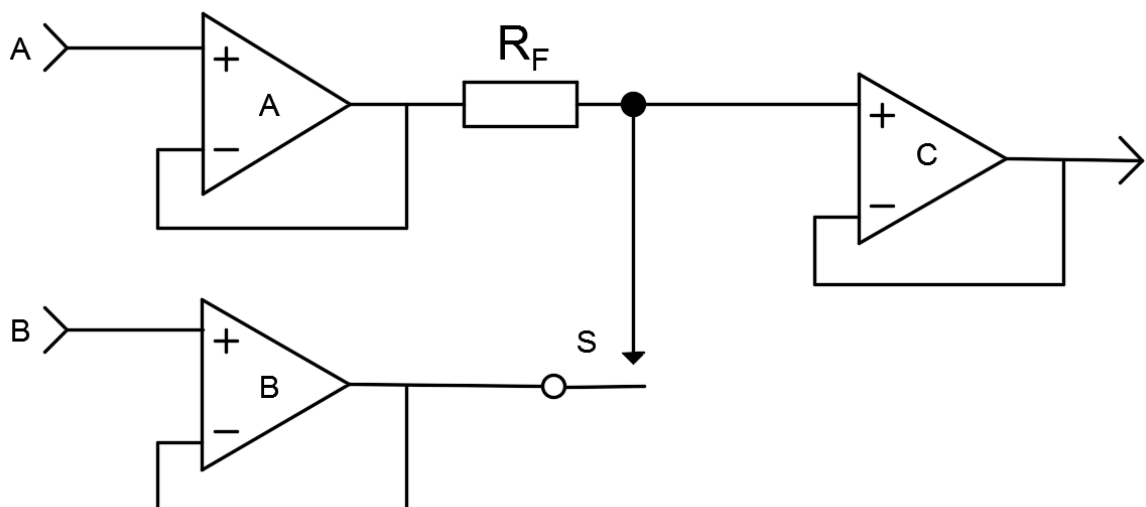
Obr.3: Dvoupolohový a čtyřpolohový mechanický přepínač

2.1.2 Virtuální kontakt

Ačkoli obsahuje zapojení s virtuálním kontaktem elektronické prvky, spínání je realizováno mechanicky. Slouží k přepínání dvou zdrojů signálu za použití pouze jednoho mechanického přepínače a napěťových sledovačů.

Pokud je spínač rozeprt, prochází signál zdroje A skrze napěťový sledovač A a odpor R_F na výstupní napěťový sledovač. Signál B je odpojen, ale přes rozeprtý kontakt dochází ke kapacitním přeslechům – ty budou významnější s rostoucím odporem R_F . Při sepnutí spínače jsou na vstupu napěťového sledovače C signály z obou zdrojů, ale poměr signálů na výstupu je určen poměrem impedancí na vstupu. Proto, má-li být příspěvek jednoho ze signálů natolik malý, aby bylo možné jej označit za zanedbatelný, musí jeho impedance značně převážet impedanci sepnutého signálu. Impedanci potlačovaného signálu A zvyšuje odpor R_F a napěťový sledovač B slouží pouze ke snížení impedance signálu B. Jestliže zařízení na tomto vstupu bude mít dostatečně nízkou výstupní impedanci samo o sobě, je možné jej připojit přímo ke kontaktu mechanického přepínače. Totéž platí pro napěťový sledovač C, pokud bude mít zařízení připojené na výstup dostatečně vysokou impedanci.

S rostoucí velikostí odporu R_F narůstá poměr signálů při sepnutém stavu a s ním se snižuje hladina přeslechů z kanálu A, ale zároveň narůstá vliv kapacitních přeslechů signálu B, když je vypínač rozeprt. Velikost použitého rezistoru R_F je tedy otázkou kompromisu, hodnoty použitých rezistorů se pohybují obvykle v hodnotách 2 až 10 k Ω v závislosti na tom, u kterého ze vstupů jsou přeslechy více nežádoucí.



Obr.4: Schéma zapojení virtuálního kontaktu

2.1.3 Relé přepínače

Relé přepínače poskytují výhodu galvanického oddělení mezi ovládacím obvodem a signálem, nulové zkreslení na kontaktu a prakticky neomezené možnosti manipulace se signálem. Sériová rezistivita je zanedbatelná a zkratové úniky na zem jsou obvykle také zanedbatelné. Potlačení signálu při vypnutém stavu může dosahovat velmi příznivých hodnot, ale jako u jiných druhů mechanického přepínání se i zde mezi otevřenými kontakty vyskytuje kapacita. Pokud bude signálu umožněno vytvářet přeslechy, odstup signálu od šumu nebude lepší, než u jiných druhů mechanických kontaktů.

Kromě nevyhnutelné parazitní kapacity mají relé další nevýhody, jako je velikost, cena a někdy také spolehlivost. Jejich odebíraný provozní výkon je značný, ale může být snížen použitím obvodů, které plné napětí použít pouze k sepnutí relé a k jeho podržení bude použito napětí nižší, tzv. přídržné napětí.

Některé druhy výkonových relé mohou vytvářet katastrofální zkreslení, pokud jsou použita pro přepínání zvuku, protože signál prochází rámem z magneticky měkkého železa, nicméně tyto problémy bývají omezeny ve výstupních obvodech velkých výkonových zesilovačů. Pro přepínání malých signálů lze linearitu relé kontaktů za normálních okolností považovat za perfektní.

2.2 Elektronické přepínání audio signálů

Elektronické spínání je obvykle realizováno CMOS analogovými branami, z nichž je nejčastěji využívána brána CMOS 4016. Nicméně, existuje mnoho speciálních aplikací, kde prokazují diskrétní JFET tranzistory lepší výsledky, proto i jim bude věnována pozornost.

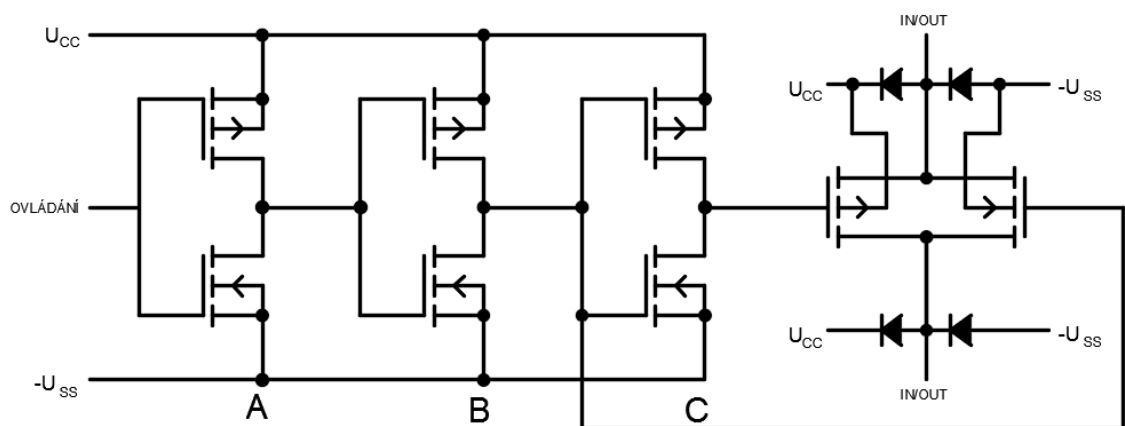
2.2.1 Spínání CMOS analogovými branami

Analogové brány jsou pro účely elektronického spínání používány po dlouhou dobu a jsou v některých ohledech elementárním způsobem elektronického spínání. CMOS analogové brány, známé také jako přenosové brány, jsou zcela odlišné od CMOS logických hradel řady 4000, i když technologický proces výroby je stejný. Analogová hradla jsou bilaterální, tedy vstupy lze libovolně zaměňovat za výstupy bez vlivu na funkčnost, což důrazně neplatí pro logická hradla. Označení „analogové“ z názvu zdůrazňuje, že hradla nejsou omezena na

pevné logické úrovně, ale mohou jimi procházet signály s různými amplitudami s nízkým zkreslením.

Princip spínání audio signálů je totožný s principem jakéhokoli jiného spínání realizovaného tranzistorem MOSFET. Pro zapnutí je potřeba na elektrodu GATE přivést dostatečně vysoké napětí správné polaroty, aby se díky vzniklému elektrickému poli v polovodiči vytvořil vodivý kanál, který umožní průchod proudu v libovolném směru v závislosti na napětí mezi elektrodami. Tranzistory typu MOSFET pracují v obohaceném režimu, což znamená, že vyžadují na elektrodě GATE napětí, aby mezi emitorem a kolektorem mohl začít protékat elektrický proud (na rozdíl od tranzistorů JFET, které pracují v režimu vyčerpání a hradlové napětí je přikládáno k jejich vypnutí).

Analogové brány jsou tvořeny dvěma tranzistory MOSFET opačné polaroty připojených k sobě zezadu. Dva přenosové FET tranzistory s jejich ochrannými diodami jsou znázorněny na obrázku 5 vpravo, na levé straně je řídicí obvod. A a B jsou standardní invertory CMOS, jejichž jedinou funkcí je rozlišení slitých napěťových úrovní, které logické obvody CMOS řady 4000 někdy produkují. Výstup B přímo ovládá jeden FET a invertor C vytváří ovládací napětí pro druhý FET, který pro zapnutí nebo vypnutí vyžaduje na elektrodě GATE napětí opačné polaroty.



Obr. 5: Ovládací obvod a spínací tranzistory MOSFET analogové brány

Použití analogové brány FET s tranzistorem pouze jedné polaroty by kvůli příliš vysoké hodnotě odporu na jednom napěťovém extrému vedlo k nelinearitě spínání, proto se používají komplementární tranzistory - klesá-li u jednoho tranzistoru souhlasné napětí U_G , dochází

k jeho uzavírání, zatímco u tranzistoru opačné polaroty napětí roste, klesá odpor a vzniká vodivá cesta.

Hodnota rezistivity při sepnutém stavu pesto není konstantní pro všechny signály. I když je, dokud se pohybujeme ve frekvenčním rozsahu využívaném audio signály, odpor vodivé cesty frekvenčně nezávislý, ovlivňují jej velikosti vstupního a napájecího napětí. Vlivem nelineárního odporu pro různé velikosti vstupních napětí signálu vzniká zkreslení signálu, proto je nutné tento jev minimalizovat. Zvyšováním napájecího napětí klesá rezistivita vodivé cesty a narůstá její linearita, je tedy pro co nejnižší zkreslení signálu vhodné vždy přikládat na elektrodu GATE maximální povolené napájecí napětí. Rozsah vstupního napětí odpovídá dynamickému rozsahu přenášeného signálu a jedná se o parametr, který musí být v signálu v maximální možné zachován.

2.2.1.1 CMOS analogové brány v napět'ovém módu

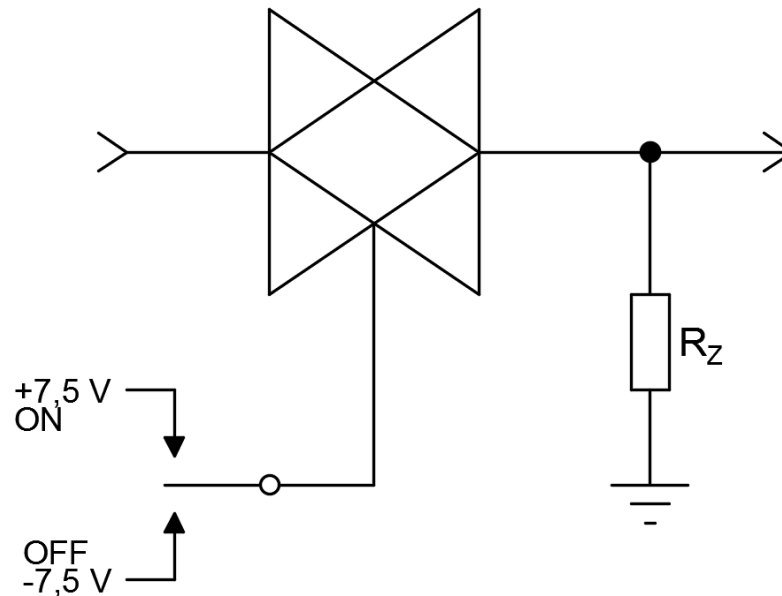
Nezákladnější zapojení analogové brány pro spínání audio signálů je znázorněno na obrázku 6. Zkreslení signálu se bude mírně lišit v závislosti na rozdílných parametrech jednotlivých analogových bran od různých výrobců. Přesto, že hradlo 4016 je běžnějším a populárnějším analogovým hradlem pro spínání audio signálů, výměnou za hradlo 4066 dosáhneme výrazně lepších parametrů. Díky nižší hodnotě R_{ON} hradla 4066 je i zkreslení úměrně nižší než u 4016, zhruba třetinové.

Kromě použití analogové brány s lepšími parametry lze zkreslení snížit paralelním zapojením několika bran pro jeden kanál. Paralelním zapojením dojde k poklesu odporu v sepnutém stavu, ale zároveň k nárůstu kapacity ve vypnutém stavu, proto je nutné počítat s většími přeslechy.

Zkreslení je téměř výhradně způsobeno harmonickou složkou druhého řádu, pouze na nejvyšších napět'ových úrovních se začíná projevovat vliv harmonických složek vyšších řádů. Závislost zkreslení na frekvenci se začíná projevovat až nad rozsahem slyšitelného pásma.

Přeslechy při použití zapojení znázorněného na obrázku 6 budou značné. Nežádoucí signál může stejně jako u mechanických přepínačů procházet skrze parazitní kapacitu, tentokrát se ale jedná o vnitřní kapacitu tranzistorů. S vyšší impedancí na výstupu ještě více

narůstá vliv kapacity a přeslechy jsou významnější. Zároveň však s rostoucí impedancí na výstupu klesá harmonické zkreslení signálu. Proti přeslechům se neubráníme ani použitím brány 4066, protože vnitřní kapacita je shodná jako u brány 4016.



Obr. 6: Schéma zapojení analogové brány

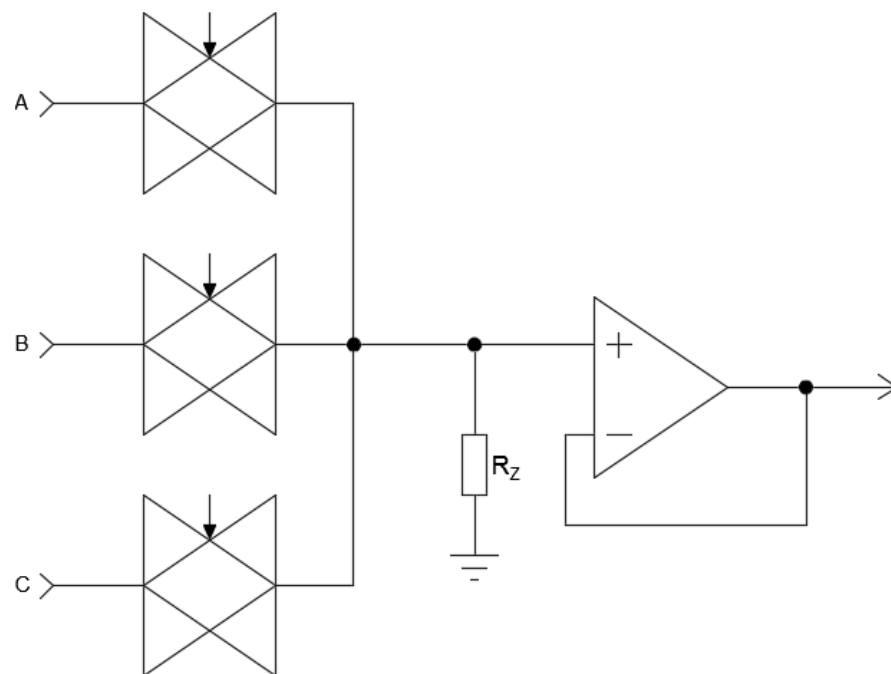
Použitím vícenásobných přepínačů dojde k omezení přeslechů. Vliv parazitní kapacity je zmenšen díky nízké výstupní impedanci předcházejícího stupně (např. operačního zesilovače). Pokud ale je výstupní impedance zařízení připojených na vstupy přepínače vysoká, přeslechy z nesepnutých kanálů mohou být značné.

Existují dva důvody, proč je průchod signálů různých napět'ových hladin nelineární. Jednak odpor v zapnutém stavu sám o sobě není příliš lineární, a jednak ještě mění svoji velikost s ohledem na kolísání potenciálu mezi elektrodami GATE a SOURCE. Nelinearita spínání pro různé napět'ové hladiny signálů zůstává u vícenásobných přepínačů nezměněna, ale díky omezení přeslechů je nyní možné navýšit zatěžovací impedanci, čímž se se nelineární R_{ON} stane menším podílem z celkové impedance a tím dojde ke zlepšení linearity.

Vícenásobný přepínač zobrazený na obrázku 7 může být použit k sepnutí pouze jednoho signálu současně. Není možné propojit dva výstupy, protože ovládací napětí spíná v jeden okamžik pouze jeden CMOS tranzistor. Pokud by byl vynechán zemní odpor, neexistovala

by stejnosměrná cesta ke vstupu operačního zesilovače, a ten by reagoval posláním plného napájecího napětí jedné polarity na výstup.

Hladina přeslechů na frekvenci 20kHz je zhruba o 40 dB nižší, než při použití jednocestného přepínače, přesto na vysokých kmitočtech roste se stejným sklonem -6dB na oktávu. Důvodem tohoto nárůstu je opět vnitřní kapacita analogové brány. Na spodních frekvencích je hladina přeslechů omezena šumem operačního zesilovače, proto se vliv kapacitních přeslechů začíná projevovat až od frekvence, kdy jejich hladina začne převažovat nad samotným šumem.



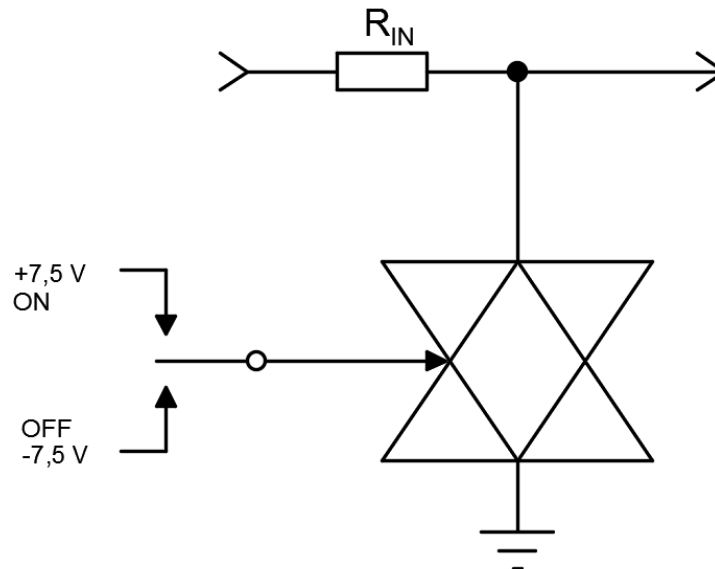
Obr. 7: Vícenásobný přepínač z analogových bran CMOS

Maximální úroveň signálu, kterou může brána CMOS v spínat, je omezena napájecím napětím brány CMOS a vedením ochranných diod.

Na obrázku 8 je zobrazeno zapojení umožňující průchod signálu bez zkreslení. V sepnutém stavu je brána vypnuta a signál pouze projde vodičem, nemusí procházet přes nelineární odpor vodivé cesty brány R_{ON} jako v předchozích zapojeních. Pro vypnutí je nutné bránu přepnout do vodivého stavu, aby mohla odvést signál do země. Dokud se ale R_{ON} hradla nebude blížit k nule, část signálu pronikne na výstup a vznikne přeslech. Jak velký

přeslech bude záviset na poměru odporu R_{ON} a výstupní impedanci předchozího stupně, se kterou tvoří dělič.

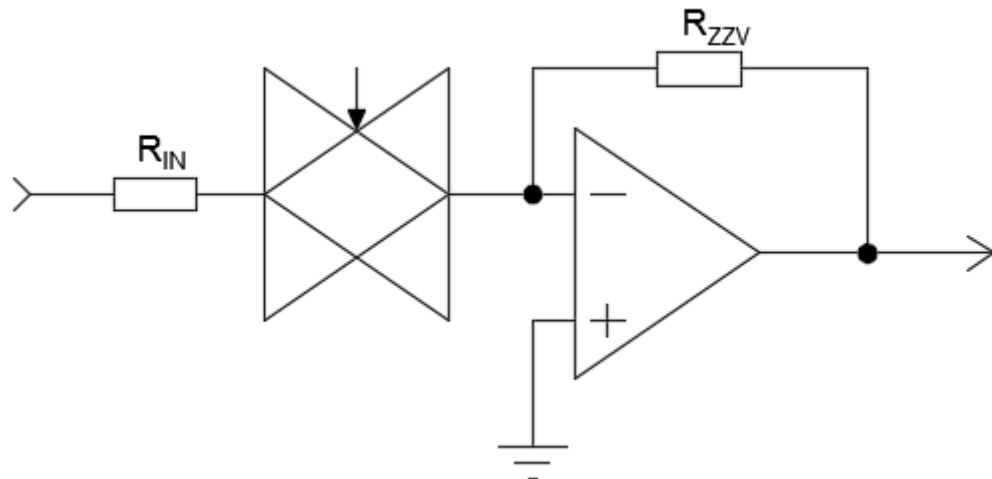
Přeslechy je možné omezit vyšším počtem paralelně zapojených bran, aby větší část signálu byla odvedena na zem, ale jestliže každé zdvojnásobení jejich počtu vede na omezení přeslechů o 6 dB, výraznějšího potlačení přeslechů tímto způsobem nedosáhneme.



Obr. 8: Schéma zapojení zkratovací analogové brány CMOS

2.2.1.2 CMOS brány v proudovém módu

Použití CMOS analogových hradel v proudovém režimu výrazně zlepšuje linearitu spínání, jelikož odstraňuje kolísání odporu R_{ON} vlivem měnícího se napětí U_{GS} a tím se brána stává pro všechny napěťové hladiny stejně vodivá. Projevuje se tedy pouze nelinearita odporu brány R_{ON} samotného, nikoli jeho kolísání vlivem měnícího se potenciálu mezi elektrodami GATE a SOURCE. Napětí U_G klesá a roste s ohledem na napájecí napětí signálu. V proudovém módu je také možné odstranit napěťové limitace pro průchozí signály a lépe potlačit přeslechy.



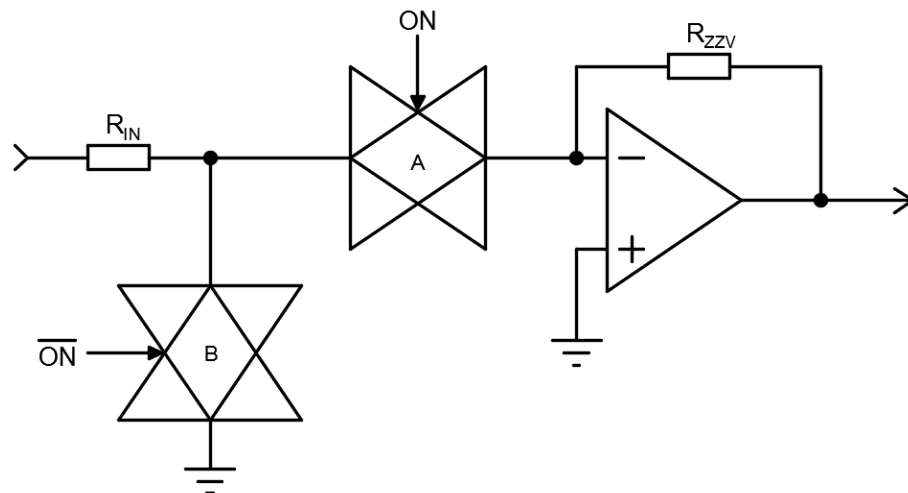
Obr. 9: Schéma zapojení analogové brány CMOS v proudovém módu

Na obrázku 9 je schéma zapojení základního obvodu pro spínání signálů CMOS analogovými branami v proudovém módu. Proud teče do virtuální země operačního zesilovače přes sériové spojení odporu R_{IN} a odporu brány R_{ON} , odpor R_{IN} je o několik řádů vyšší a proto definuje velikost protékaného proudu. Společně s odporem záporné zpětné vazby R_{ZZV} je velmi důležitým parametrem ovlivňujícím hladinu přeslechů a zkreslení. Obvykle je jejich hodnota shodná, aby zesílení operačního zesilovače bylo jednotkové, je tedy možné jejich velikost souhrnně označit jako R . Pokud bude hodnota R příliš nízká, více se projeví vliv nelineárního R_{ON} , naopak při příliš vysoké hodnotě R naroste vliv parazitní kapacity a zvýší se tak hladina přeslechů. Se zvyšujícím se odporem také rostou tepelné ztráty a vlivem oteplení může vznikat Johnsonův šum, což by opět vedlo k nárůstu zkreslení.

Zkreslení signálu je zásluhou odstranění nelinearity spínání mnohem příznivější než u hradel zapojených v napěťovém módu, to ale neplatí pro přeslechy. Při rozepnutém stavu se celé napětí signálu objeví na vstupu brány a její vnitřní kapacita opět umožňuje nechtěný průchod signálu k operačnímu zesilovači.

2.2.1.3 CMOS brány v proudovém-zkratovém módu

Od přepínače audio signálů očekáváme velmi nízké zkreslení v sepnutém stavu a současně také dostatečné potlačení přeslechů ve stavu vypnutém, a to jsou vlastnosti, které získáme kombinací zapojení analogových bran v proudovém a zkratovém módu.

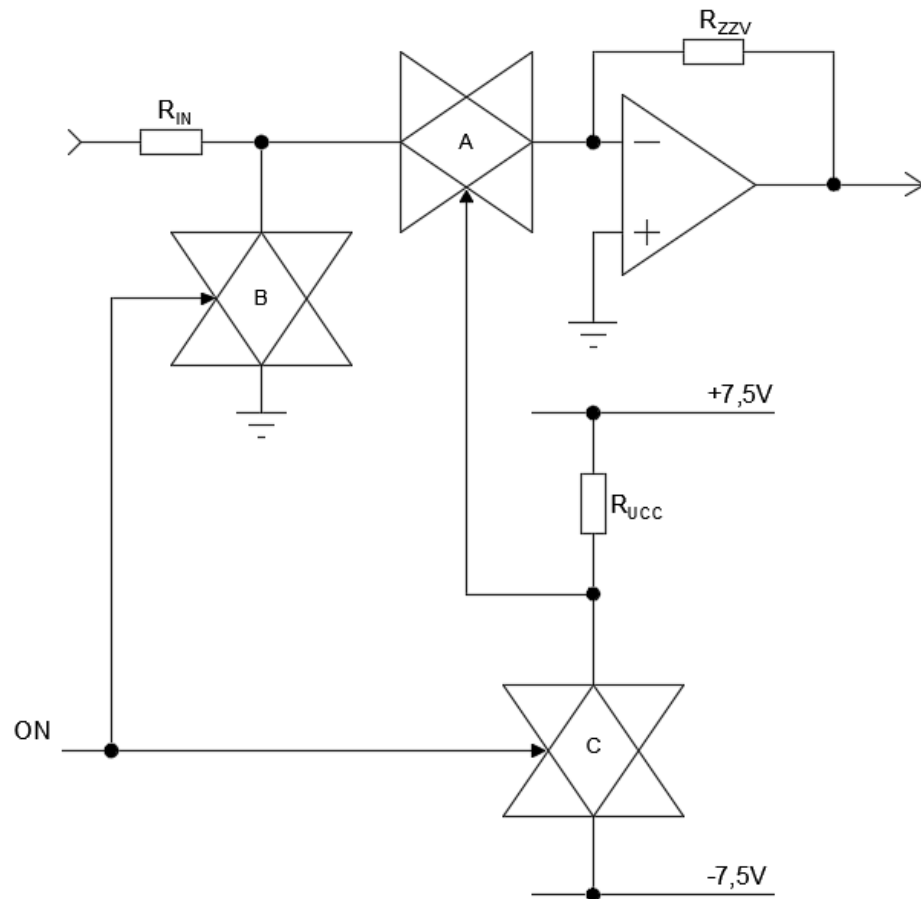


Obr. 10: Schéma zapojení analogových bran CMOS v proudovém a zkratovém módu

Jak je patrné z obrázku 10, jsou v sériovém proudovém zkratovém módu používány analogové brány dvě. Princip spočívá v odvodu nežádoucího signálu při vypnutém stavu ještě dříve, než se dostane k vypnutému hradlu, jehož vnitřní kapacita by umožnila vznik přeslechu.

Je-li přepínač v sepnutém stavu, přes sepnutou bránu A prochází signál a brána B je vypnutá, což nemá na signál žádný dopad. Signál prochází stejně jako u zapojení uvedeného na obrázku 12 a jeho nízké zkreslení je zachováno. Pro vypnutí je nutné ovládací logiku obrátit, tj. sepnout bránu B a vypnout A. Nyní je většina signálu svedena branou B do země a k uzavřené bráně A se dostane pouze zlomek z původní hladiny signálu, čímž i přeslechy klesnou na zlomek hodnoty. Jak velká část signálu se k bráně dostane závisí na velikosti odporu sepnutého hradla B R_{ONB} , ale u CMOS analogových hradel je běžný pokles o 40 dB z původní hladiny signálu. Je-li jako zkratovací element použit JFET tranzistor, dosáhneme ještě nižší hladiny přeslechlů díky jeho nižšímu odporu v sepnutém stavu. V této kombinaci se k hradlu A dostane ještě o 20 dB nižší hodnota, tj. snížení o 60 dB z původní hodnoty signálu ještě před samotným vypínacím elementem.

Aby nedocházelo k sepnutí nebo vypnutí obou hradel naráz a změna v ovládací logice dorazila k oběma hradlům ve stejný okamžik, je vhodné použít antifázové ovládání. Obvod s tímto ovládaním je zobrazen na obrázku 11.



Obr. 11: Analogové brány CMOS s antifázovým ovládacím obvodem

U všech uvedených zapojení analogových CMOS hradel dochází při změně stavu k průsakům části ovládacího napětí do signálu skrze kapacitu elektrody GATE, vnitřní kapacitu brány a parazitní kapacitu desky plošných spojů. Dochází-li ke změně vodivého stavu skokově, např. při ovládání přes napěťový invertor, projeví se obvykle průsak napětí lusknutím v signálu. Pokus o plynulejší sepnutí nebo vypnutí analogové CMOS brány se projeví roztažením lusknutí na delší, méně intenzivní dunění, ale celková energie průsaku bude stejná, dokud bude stejná změna napětí ΔU_G a celková parazitní kapacita. Průsak energie lze omezit nižší hodnotou zatěžovacího odporu, to však vede k vyššímu zkreslení.

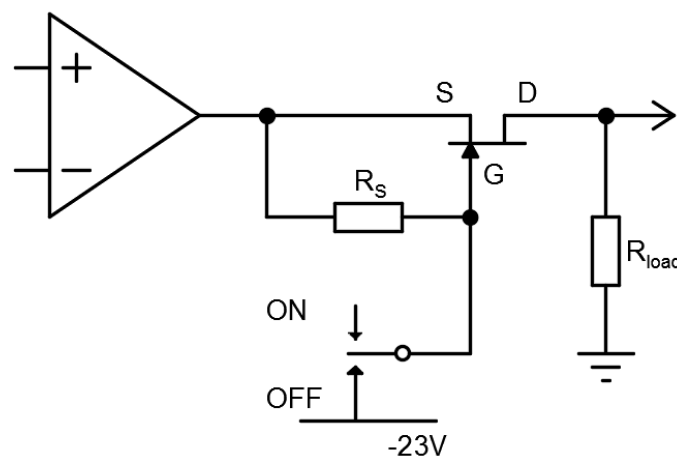
2.2.2 Spínání tranzistorů JFET

Navzdory velmi dobré kvalitě spínání audio signálů prostřednictvím analogových CMOS bran, existují aplikace, kdy může být použití JFET tranzistorů výhodnější. Jedním z důvodů je schopnost JFET tranzistorů udržet na vstupu celé výstupní napětí operačního zesilovače. Další výhodou je, že změna stavu probíhá plynuleji než u CMOS hradel a lze se tak vyhnout

lusknutím v signálu. Naproti tomu existují i nevýhody spojené zejména s řízením. Tranzistory JFET jsou ovládány napětím mezi elektrodami GATE a SOURCE – U_{GS} . Tranzistor je plně otevřený, pokud potenciál mezi elektrodami GATE a SOURCE je nulový, a proto vznik i malého rozdílu potenciálů vede ke ztrátě linearity.

2.2.2.1 JFET v napěťovém módu

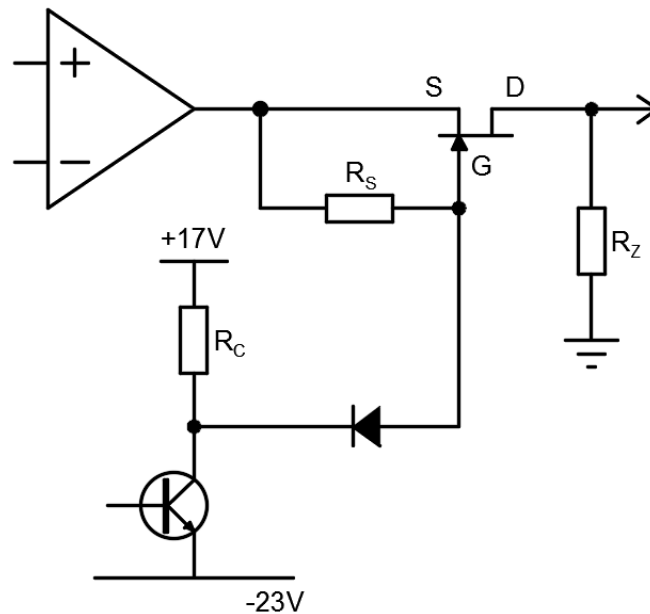
Základní zapojení se sériovým JFET tranzistorem v napěťovém módu je zobrazeno na obrázku 12. Na rozdíl od analogových bran CMOS pracují tranzistory JFET ve vyčerpaném módu, napětí je tedy nutné přivádět pro jejich vypnutí. Aby byl tranzistor v plně sepnutém stavu, musí být napětí mezi elektrodami GATE a SOURCE nulové, tj. potenciál hradla musí být v každém okamžiku totožný s potenciálem signálu vstupujícího do tranzistoru. Vznik i malého napětí U_{GS} způsobí částečné přivřetí tranzistoru, a tím je do signálu zaneseno zkreslení. Aby byl při sepnutém stavu tranzistor plně otevřený, jediné spojení k elektrodě GATE je tvořeno rezistorem R_{BOOT} , přes který se přenáší na elektrodu GATE elektrický potenciál signálu. Velikost rezistoru R_{BOOT} ovlivňuje přenos potenciálu, resp. zkreslení. Čím je velikost R_{BOOT} nižší, tím přesněji je elektrický potenciál přenesen, a zároveň tím nižší, zvláště u vysokých frekvencí, je zkreslení signálu.



Obr. 12: Základní zapojení se sériovým JFET tranzistorem v napěťovém módu

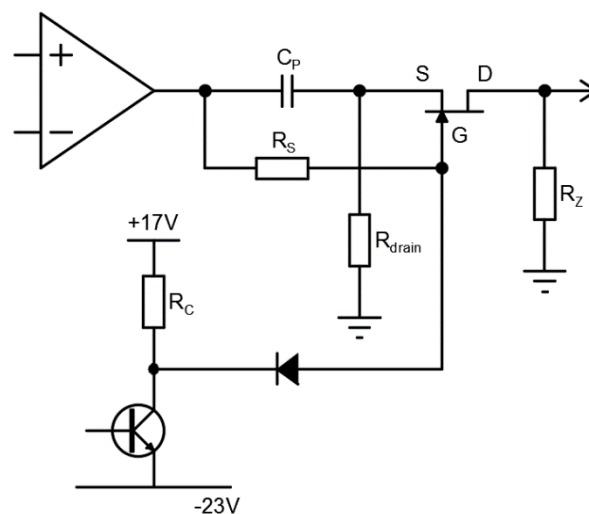
Při přepnutí přepínače do druhé polohy je elektroda GATE připojena k dostatečně vysokému zápornému napětí, aby bylo zajištěno, že JFET bude vypnutý pro celý rozsah napěťových hladin signálu – tedy i pro maximální záporné napětí signálu musí být rozdíl potenciálů mezi elektrodami GATE a SOURCE minimálně takový, aby byl zajištěn plně vypnutý stav tranzistoru.

Tranzistory typu J111 a J112 byly vyvinuty pro účely spínání audio signálů, mají nízký a relativně lineární odpor kanálu v sepnutém stavu. Tranzistor J111 vyžaduje vyšší napětí pro vypnutí, ale v sepnutém stavu má nižší odpor, tedy poskytuje možnost průchodu signálu s nižším zkreslením.



Obr. 13: Tranzistor JFET ovládaný bipolárním tranzistorem

Na obrázku 13 je zobrazen obvod, na kterém je k ovládní JFET tranzistoru použit řídicí bipolární tranzistor. Kladné napětí na rezistoru R_C udržuje diodu v závěrném stavu, když je JFET sepnutý. Při sepnutí řídicího tranzistoru se dioda otevře a na elektrodu GATE je připojeno záporné napětí, čímž dojde k uzavření spínacího tranzistoru.

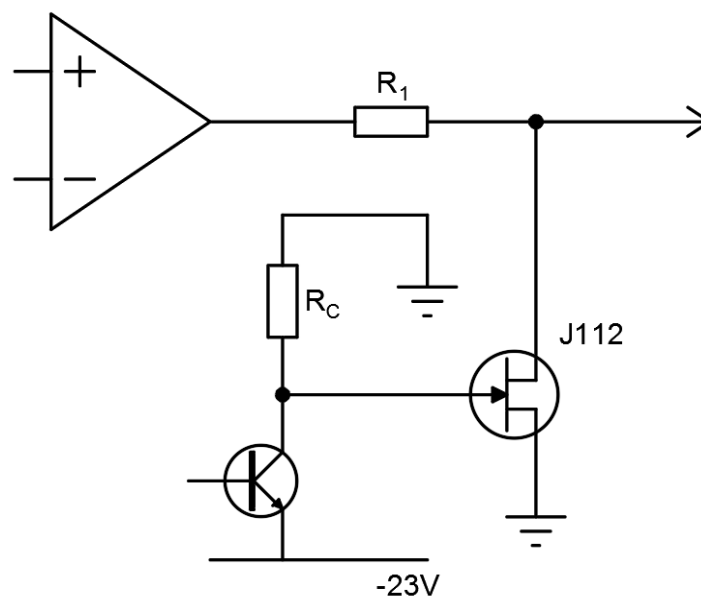


Obr. 14: Schéma zapojení přepínače umožňujícího blokaci ss složky signálu

V případě, že výstup z operačního zesilovače je stejnosměrně posunut oproti nulovému potenciálu, může být použito zapojení umožňující blokování stejnosměrné složky signálu na obrázku 14. Signálová cesta je přehrazena kondenzátorem, který neumožňuje průchod stejnosměrné složce. Rezistor R_S je připojen přímo k výstupu operačního zesilovače. Přes odpor R_{drain} se kondenzátor vybíjí, když je tranzistor v nevodivém stavu.

2.2.2.2 JFET ve zkratovém módu

Základní zapojení tranzistoru ve zkratovém módu je zobrazeno na obrázku 15. Stejně jako u verze se zkratovacím CMOS analogovým hradlem, i u tohoto zapojení je linearita vynikající, ale průsaky energie při vypnutém stavu jsou významné. Přeslechy jsou sice omezeny nižším odporem tranzistoru JFET v sepnutém stavu, přesto je pro většinu aplikací jejich velikost příliš vysoká. I zde je možné použít více tranzistorů paralelně, ale ani v takovém případě nebude potlačení přeslechů pro většinu aplikací dostatečné.



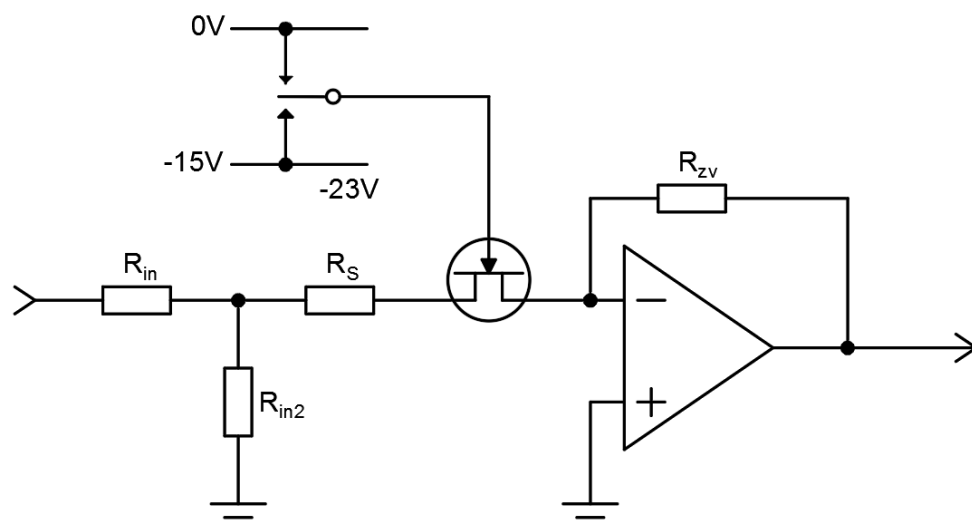
Obr. 15: Schéma zapojení přepínače s JFET tranzistorem ve zkratovém módu

2.2.2.3 JFET v proudovém módu

Na obrázku 16 je zobrazeno základní zapojení přepínače s tranzistorem JFET v proudovém módu. Rezistor R_{in2} odvádí signál, když je tranzistor vypnutý, aby nedošlo k jeho průrazu. Zároveň snižuje zisk obvodu v otevřeném stavu, tomu je však možné předejít vhodnou volbou odporu zpětné vazby R_{zv} tak, aby byl signál zesílen na původní hladinu. Operační zesilovač je zapojen jako neinvertující, známe-li vstupní impedanci signálu, zesílení lze nastavit volbou R_{zv} podle vzorce:

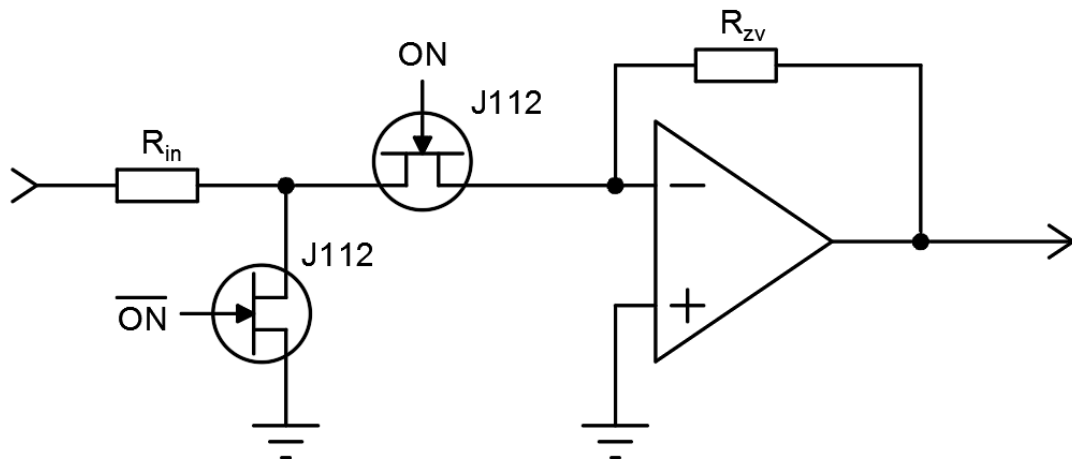
$$U_{výst} = -U_{vst} \left(\frac{R_{zv}}{R_{sig}} \right)$$

Invertující zapojení operačního zesilovače obrací fázi, proto je pro získání správné fáze potřeba zařadit do obvodu ještě jeden operační zesilovač, jehož jedinou funkcí je zpětné invertování fáze signálu. Tento operační zesilovač může být zapojen před nebo za spínač, ale pro případ, že by vznikl přeslech do jeho citlivého sumáčního uzlu je výhodnější jej zařadit před vypínací obvod – případný přeslech bude utlumen vypnutým JFET tranzistorem. Přesto však přeslechy vznikají a jejich potlačení dosáhneme stejně jako u CMOS analogových hradel odvodem energie ze signálové cesty dříve, než se dostane k vypnutému tranzistoru v proudovém módu.



Obr. 16: Schéma zapojení přepínače s JFET tranzistorem v proudovém módu

Na obrázku 17 je uvedeno schéma zapojení přepínače, který kombinuje nízké zkreslení tranzistoru v sepnutém stavu a mnohonásobně snižuje hladinu přeslechů ve vypnutém stavu. Princip funkce je totožný s analogickým zapojením realizovaném analogovými branami CMOS.



Obr. 17: Schéma zapojení přepínače s JFET tranzistory v proudovém a zkratovém módu

I zde je důležité, aby při přechodu z jednoho stavu do druhého změnila tranzistory svoji vodivost ve stejný okamžik. Pokud by zkratovací JFET sepnul příliš brzy, tj. v době, kdy ještě sériový proudový JFET bude ve vodivém stavu, vlivem nízkoimpedanční cesty od sumačního uzlu operačního zesilovače k zemi by vznikl krátký, ale velký vzestup šumu na výstupu. Pokud zkratovací JFET naopak sepne příliš pozdě, tedy v době, kdy už je sériový JFET z větší části vypnutý, napětí nahromaděné před sériovým JFET tranzistorem způsobí velmi krátké, ale výrazné zkreslení.

Zkreslení generované tímto obvodem závisí na linearitě odporu v sepnutém stavu, proto je důležité udržovat tranzistor plně otevřený. Pro ještě větší zlepšení linearity je možné na elektrodu GATE přiložit malé kladné napětí (200-300mV), které ještě více sníží R_{ON} a tím zlepšit linearitu zapojení. Napětí ale nesmí začít prosakovat do signálové cesty, proto je potřeba udržovat jeho velikost na bezpečné hodnotě.

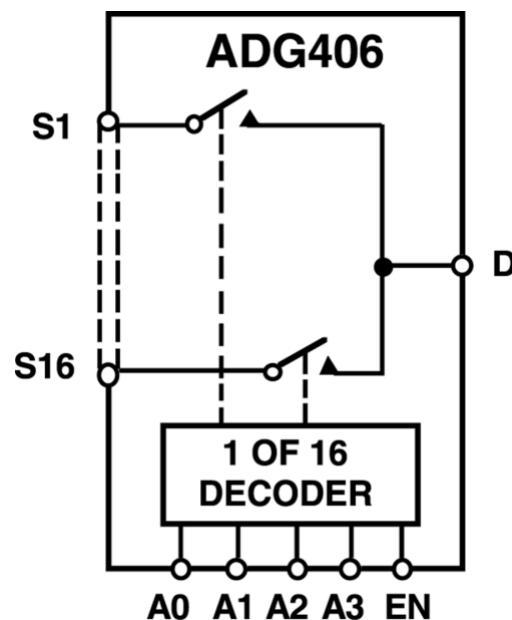
2.2.3 Průmyslově vyráběné audio přepínače

Poslední možností, jak docílit kvalitního přepínání audio signálů, je zakoupení průmyslově vyráběného přepínače. V současnosti existuje na trhu několik firem, které mají ve

svém sortimentu zahrnuté portfolio analogových přepínacích multiplexerů s různými parametry, jako např. počet spínaných vstupů, odpor v sepnutém stavu, velikost napájecího napětí, maximální spínané napětí a další, proto je možné najít vhodný analogový přepínač pro různé aplikace.

Pro potřeby akustické laboratoře je nutné, aby přepínač disponoval dostatečným počtem spínaných vstupů. V sortimentu firmy Analog Devices je analogový multiplexer s označením ADG406, disponující šestnácti analogovými vstupy. Modul je navržen tak, aby vyžadoval nízký provozní výkon, a zároveň poskytoval vysokou spínací rychlost a nízkou rezistivitu v sepnutém stavu (výrobce udává maximální odpor v sepnutém stavu $R_{ON}=80\Omega$).

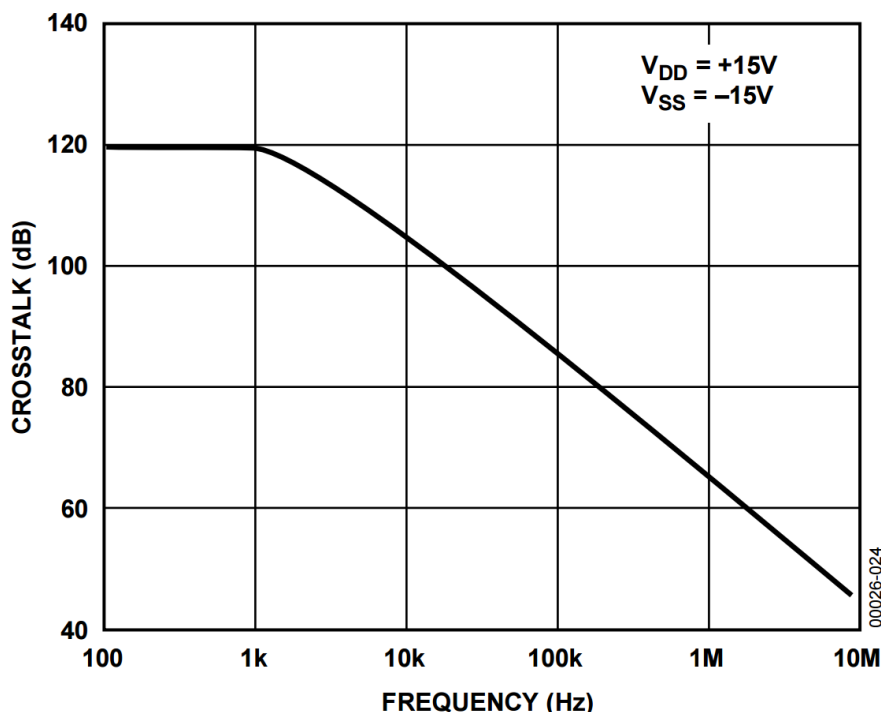
Výběr kanálu probíhá prostřednictvím čtyř binárních řádků (A0 až A4), kdy je vždy vybrán jeden kanál, který je sepnut. Aktivní digitální vstup EN slouží k aktivaci a deaktivaci všech vstupů. Pokud je na tento vstup přiložena logická nula, všechny vstupy jsou neaktivní a zařízením nemůže procházet žádný signál. Po přiložení logické jedničky dojde k aktivaci a zařízení umožní průchod signálu v závislosti na binární kombinaci na vstupech A0 až A4. Všechny kanály disponují funkcí break-before-make, díky které je zajištěno, že během přepínání nedojde ke zkratu.



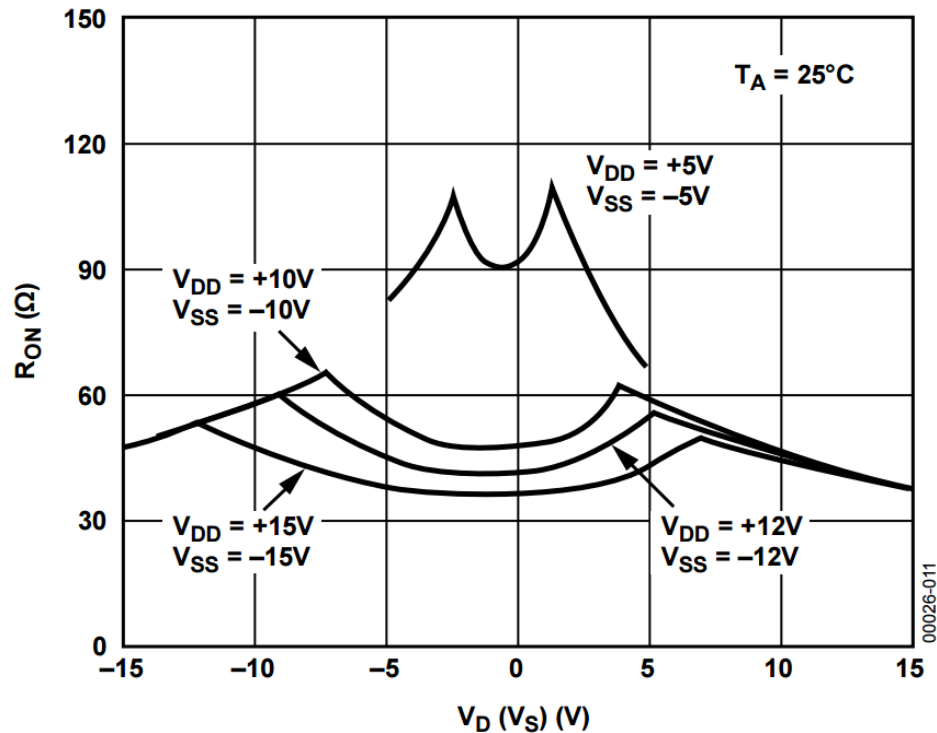
Obr. 18: Strukturní schéma analogového multiplexeru ADG406

Maximální napájecí napětí je 44V a zařízení může být napájeno symetricky nebo nesymetricky. Při použití symetrického napájení je docíleno lepších parametrů spínání, jako např. nižší R_{ON} nebo lepší dynamické vlastnosti a také mohou být spínány signály obou polarit. Rozsah napětí spínaných signálů pokrývá celý rozsah napájecího napětí, tedy v případě symetrického napájení maximální hodnotou napětí je možné spínat signály s úrovněmi od -44V do 44V. Pokud je kanál sepnut, může signál procházet v obou směrech se stejnými parametry a při vypnutí jsou signály blokovány až do velikosti napájecího napětí U_{DD} , resp. U_{CC} . Nízký provozní výkon umožňuje napájet zařízení z baterií.

Na obrázku 20 je znázorněna závislost přeslechů na frekvenci udávaná výrobcem. V rozsahu frekvencí 20 Hz až 20 kHz bude signál z neseprtých kanálů utlumen minimálně o 100dB. Na obrázku 21 je zobrazena závislost velikosti odporu v sepnutém stavu na velikosti napájecího napětí pro variantu se symetrickým napájením. Se zvyšující se hodnotou napájecího napětí klesá hodnota R_{ON} a zároveň se stává lineárnějšími pro různé amplitudy průchozích signálů, proto je pro nejnižší zkreslení vhodné napájet přepínač maximální povolenou hodnotou napětí, podobně jako u analogových bran CMOS.



Obr. 19: Závislost přeslechů na frekvenci analogového přepínače ADG406



Obr. 20: Závislost R_{ON} na napájecím napětí přepínače ADG406 pro variantu se symetrickým napájením

Dalšími firmami, které mají ve svém sortimentu zahrnutou nabídku analogových multiplexerů, jsou např. Maxim Integrated nebo Texas Instruments. Parametry přepínačů z hlediska kvality spínání jsou velmi podobné popsanému zařízení ADG406, jednotlivé přepínače se liší zejména počtem spínaných vstupů, rozsahem napájecího a spínaného napětí a dynamickými vlastnostmi.

3 Měření

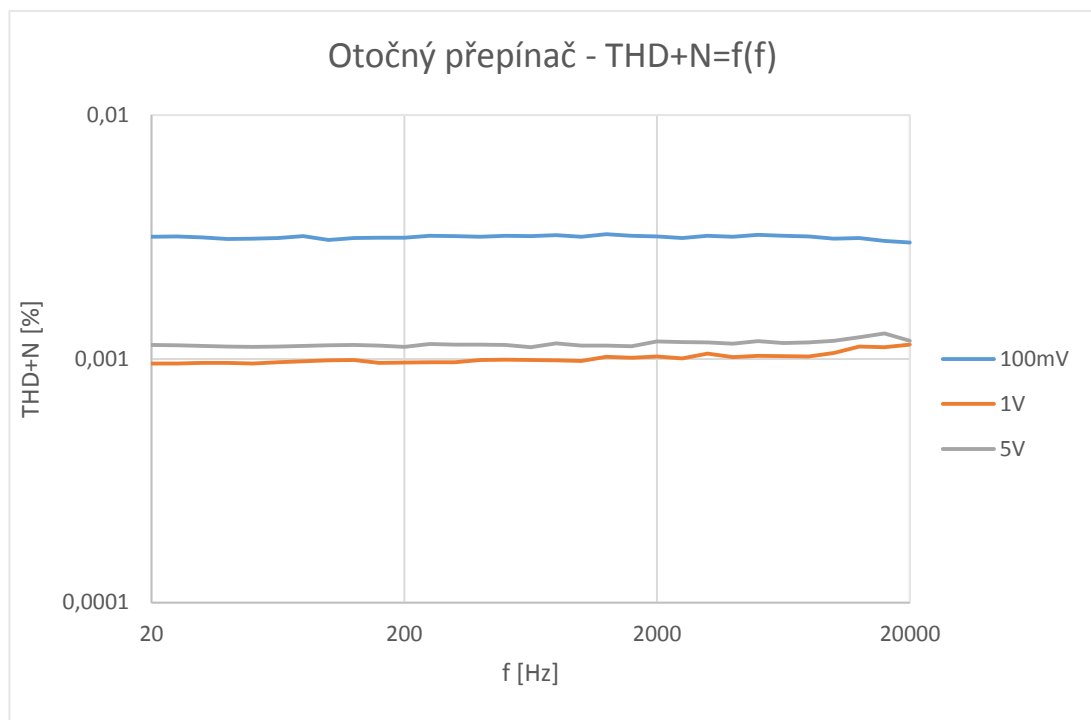
Pro účely laboratorního měření byly vybrány obvody na základě co nejlepších předpokládaných parametrů a také s ohledem na reprezentaci všech výše popsaných kategorií přepínačů.

Měřeno bylo vždy harmonické zkreslení a šum (THD+N) přepínače v sepnutém stavu a přeslech z nesepnutého kanálu na výstup. Zkreslení bylo změřeno jako závislost na frekvenci i jako závislost na amplitudě procházejícího signálu, aby bylo z výsledků patrnější, který parametr má na zkreslení větší vliv. Frekvenční závislosti zkreslení byly měřeny v pásmu od 20Hz do 20kHz vždy pro tři hodnoty amplitudy signálu, závislost zkreslení na amplitudě byla měřena pro napětí 0V až 5V, vždy pro tři různé frekvence procházejícího signálu.

Přeslechy byly měřeny přiložením signálů se stejnou amplitudou a rozdílnou frekvencí. Na výstupu byla provedena FFT analýza a z výsledného spektra byly odečítány hodnoty útlumu z neseputého kanálu. Úrovně přeslechů byly stanoveny vždy pro frekvence 1kHz a 13kHz a pro amplitudy signálu 100 mV, 1 V a 5 V.

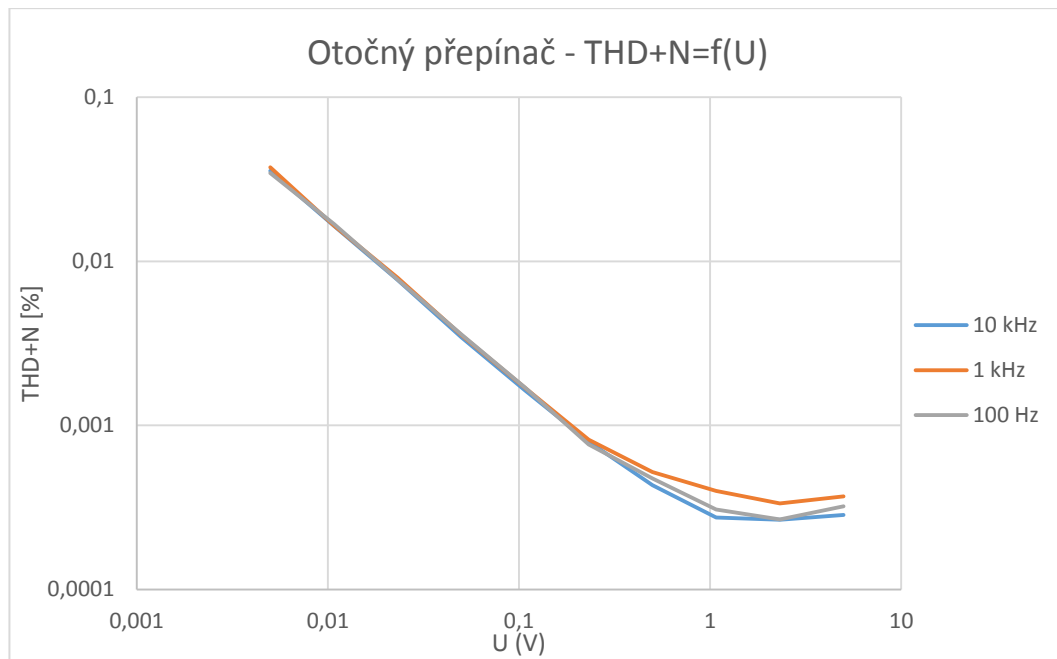
Všechny výsledky měření byly zahrnuty do přiložených grafů a tabulek. Měření probíhalo na osmikanálovém audio analyzátoru APx-582 od firmy Audio Precision.

3.1 Otočný přepínač



Graf 1: Závislost THD+N otočného přepínače na frekvenci pro různé amplitudy signálu

Na grafu 1 je zobrazena závislost harmonického zkreslení a šumu THD+N na frekvenci pro různé amplitudy procházejícího signálu. Z grafu je patrné, že zkreslení je pro rozsah využívaný audio signály frekvenčně nezávislé, projevuje se zde pouze vliv amplitudy. Na napěťové úrovni 100mV je zkreslení nejvyšší, přesto dosahuje velmi příznivé hodnoty 0,003%. U dalších dvou hodnot amplitud je zkreslení možné v celém rozsahu považovat za perfektní.



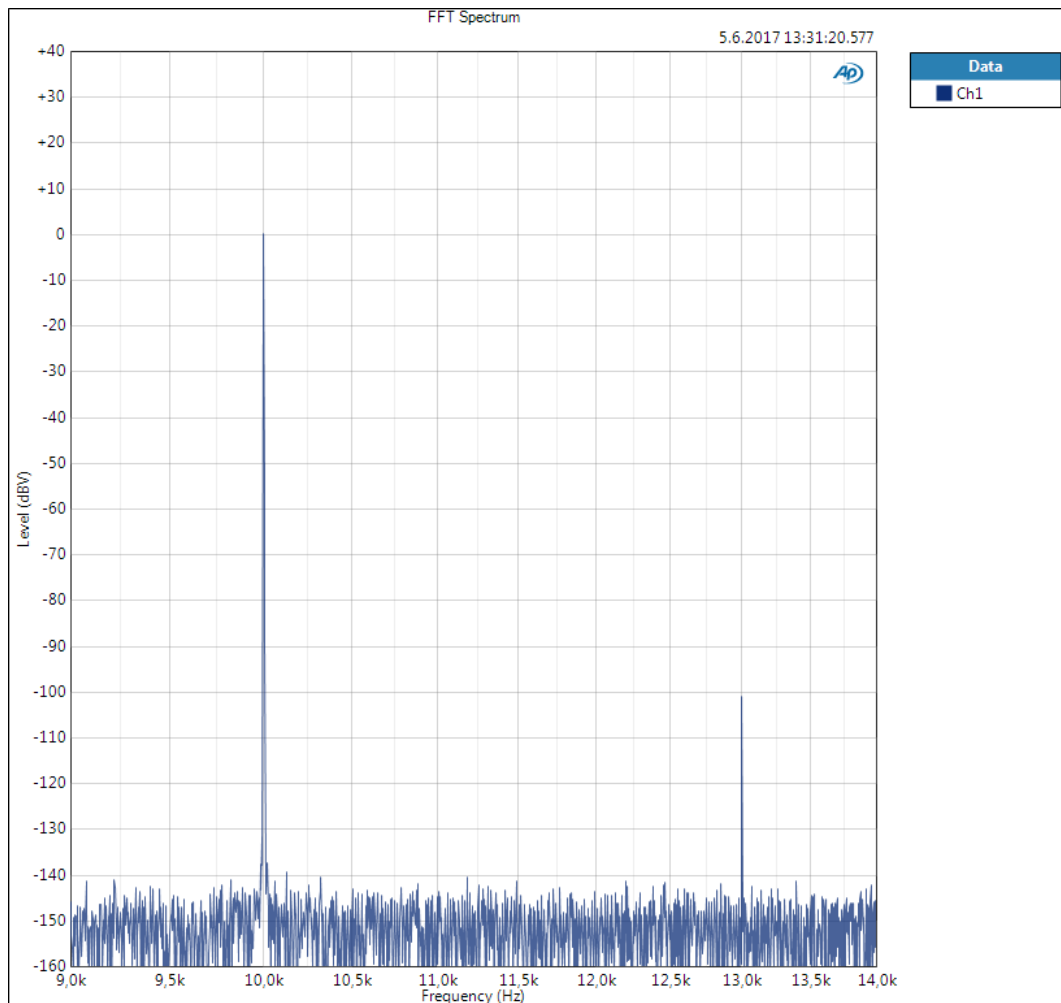
Graf 2: Závislost THD+N otočného přepínače na amplitudě pro různé frekvence

Na grafu 2 je zobrazena závislost harmonického zkreslení a šumu na amplitudě pro 3 různé frekvence. I zde lze pozorovat vliv na amplitudě, zatímco vliv frekvence je pouze velmi malý.

Na obrázku 18 je zobrazeno FFT spektrum měřené na výstupu mechanického přepínače. Na dva vstupy byly přivedeny signály se shodnou amplitudou a různou frekvencí. Signál na frekvenci 10kHz je přiveden na kontakt v sepnuté poloze a signál na 13kHz je přeslech z nesepnutého kanálu. Stejným způsobem byly proměřeny přeslechy signálů o amplitudách 100mV, 1V a 5V pro frekvence 1kHz a 13kHz. Výsledky byly odečítány jako rozdíl hladin a jsou vyjádřeny v decibelech v tabulce 1.

Tab.1: Naměřené hodnoty útlumu signálu z rozepnutého kontaktu otočného přepínače

	f=1kHz			f=13kHz		
U (V)	0,1	1	5	0,1	1	5
Útlum (dB)	117	118	134	109	110	132

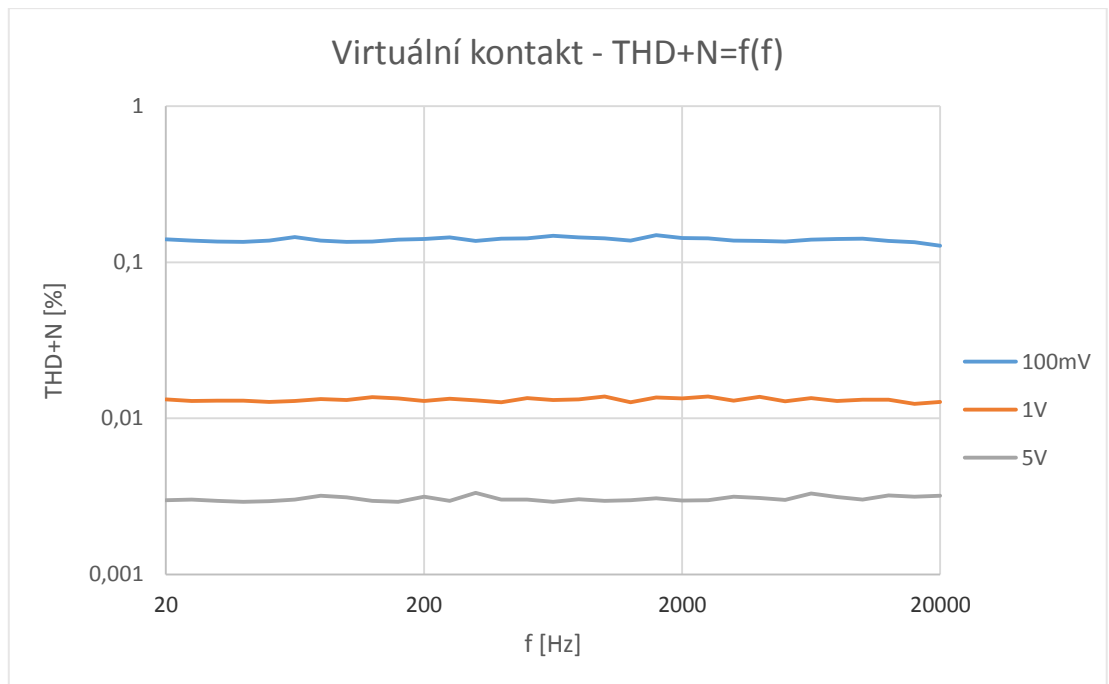


Obr. 21: FFT analýza provedená na výstupu otočného přepínače

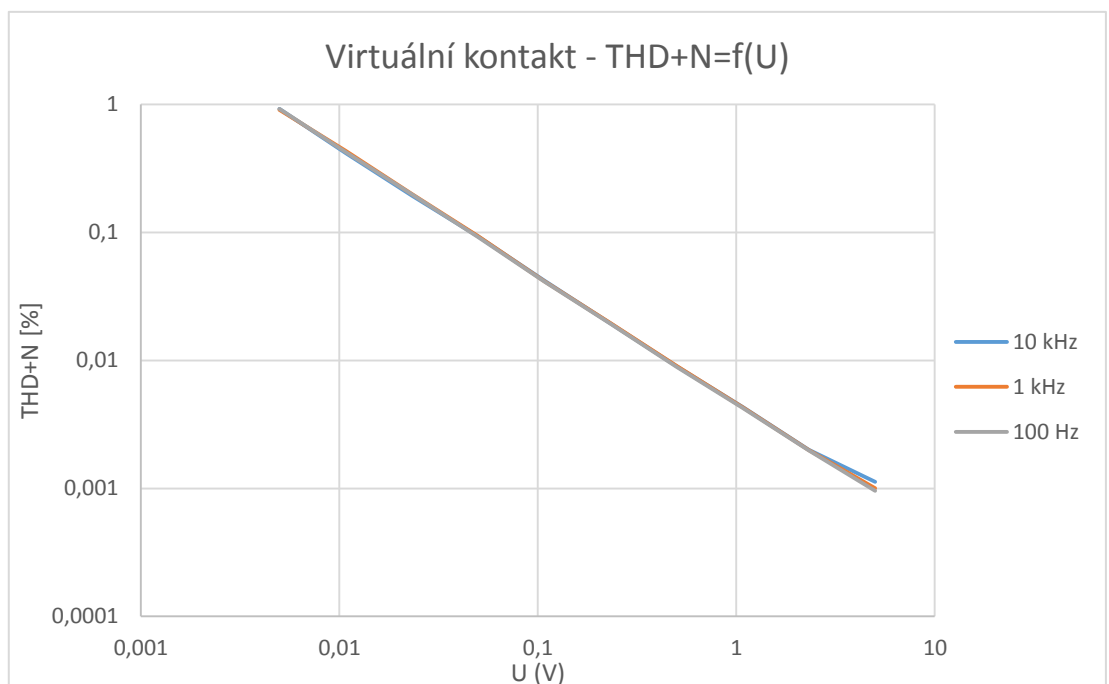
Z výsledků měření je patrné, že velikost přeslechů je závislá na frekvenci i na amplitudě. S rostoucí frekvencí se začíná více projevovat vliv parazitní kapacity mezi kontakty a s ním rostou přeslechy a při vyšších hodnotách amplitud více převažuje signál sepnutého kanálu nad přeslechem.

3.2 Virtuální kontakt

Měření virtuálního kontaktu probíhalo podle schématu zapojení uvedeného na obrázku 4. Při měření zkreslení byl signál přiveden na napěťový sledovač A a mechanický přepínač byl v rozepnuté poloze. Při měření přeslechů byly na oba vstupy přivedeny signály o stejné amplitudě a různé frekvenci, obdobně jako u mechanického kontaktu. Spínač byl v sepnuté poloze a měřeny byly přeslechy signálu A na výstup.



Graf 3: Závislost THD+N virtuálního kontaktu na frekvenci pro různé amplitudy signálu



Graf 4: Závislost THD+N virtuálního kontaktu na amplitudě pro různé frekvence signálu

Z naměřených hodnot vyplývá, že zkreslení zapojení virtuálního kontaktu je mnohonásobně vyšší než u mechanického přepínače. Vliv frekvence opět nebyl pozorován, i zde se projevuje pouze vliv amplitudy. Obzvláště na velmi nízkých hodnotách amplitudy dosahuje zkreslení velmi vysokých hodnot, což lze přisuzovat vysokému šumu zapojení.

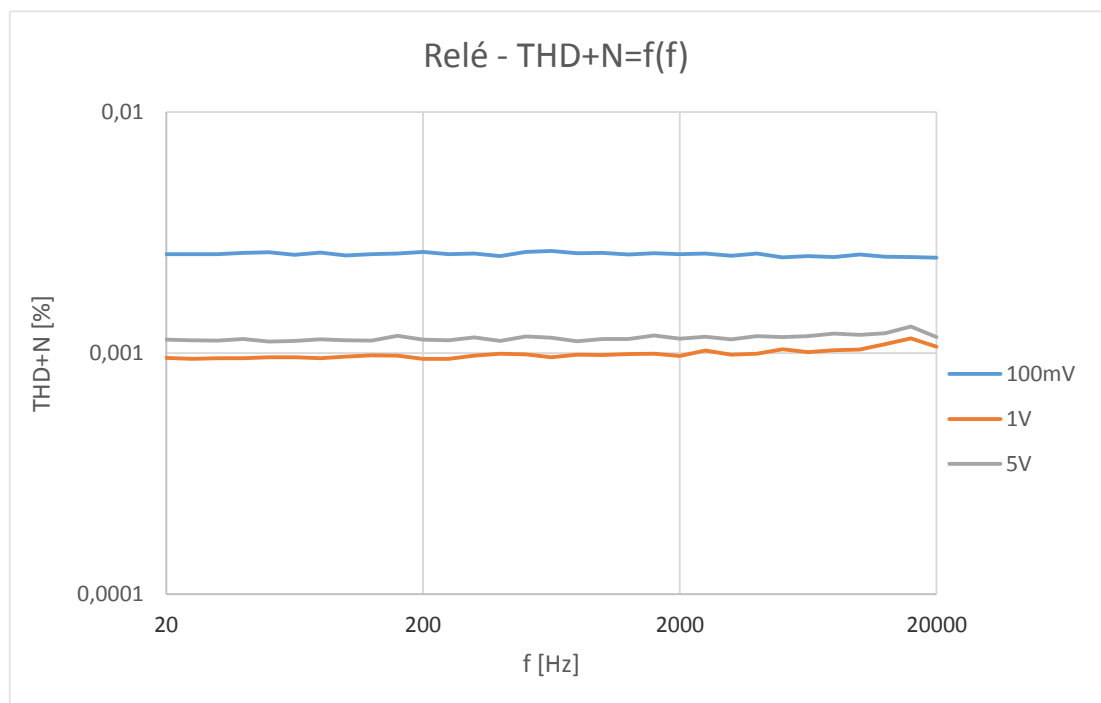
Tab.2: Naměřené hodnoty útlumu signálu z nesepnutého kanálu přepínače virtuální kontakt

	f=1kHz			f=13kHz		
U (V)	0,1	1	5	0,1	1	5
Útlum (dB)	107	105	98	102	101	96

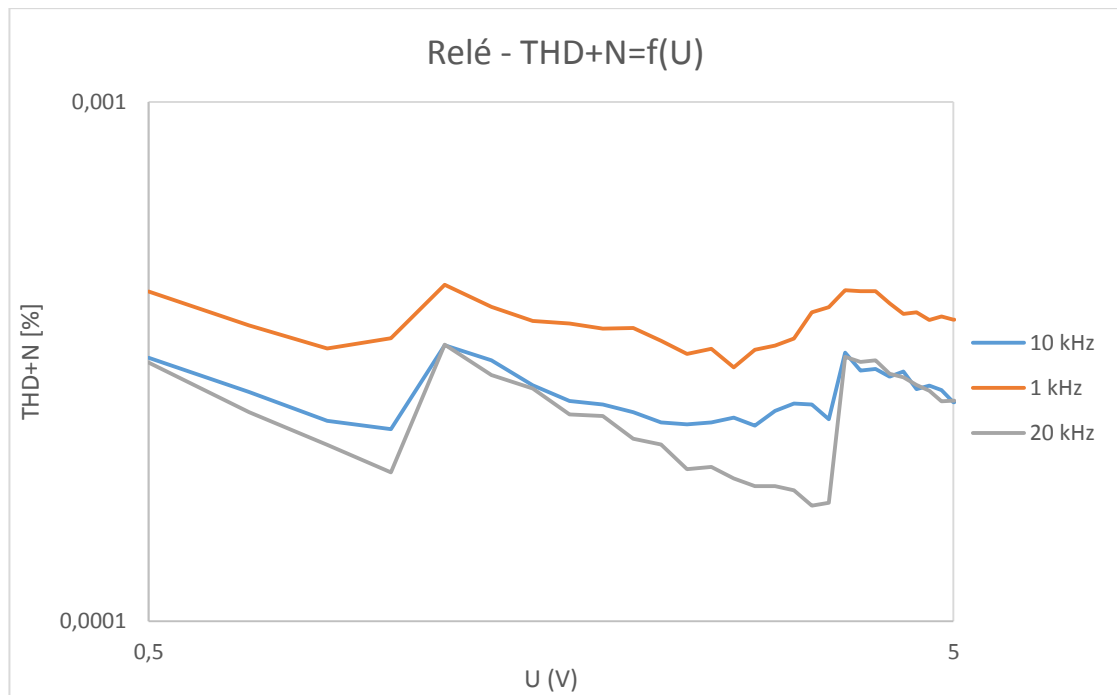
V tabulce 2 jsou uvedené hodnoty změřených přeslechů z kanálu A při sepnutém kanálu B. I s ohledem na přeslechy je zapojení virtuální kontakt horší, než otočný přepínač. Opět se zde projevuje větší vliv s rostoucí frekvencí, ale zároveň, narozdíl od otočného přepínače, přeslechy rostou se zvětšující se amplitudou.

3.3 Relé přepínač

Pro měření byla použita relé určená pro spínání audio signálů. Změřeno bylo zkreslení v sepnutém stavu a přeslech na výstup v nesepnutém stavu.



Graf 5: Závislost THD+N relé přepínače na frekvenci pro různé amplitudy signálu



Graf 6: Závislost THD+N relé přepínače na amplitudě pro různé frekvence signálu

Na grafech 5 a 6 jsou zobrazeny závislosti zkreslení na frekvenci a amplitudě signálů procházejících relé spínačem. Z naměřených hodnot lze vyvodit, že linearita relé přepínačů je perfektní.

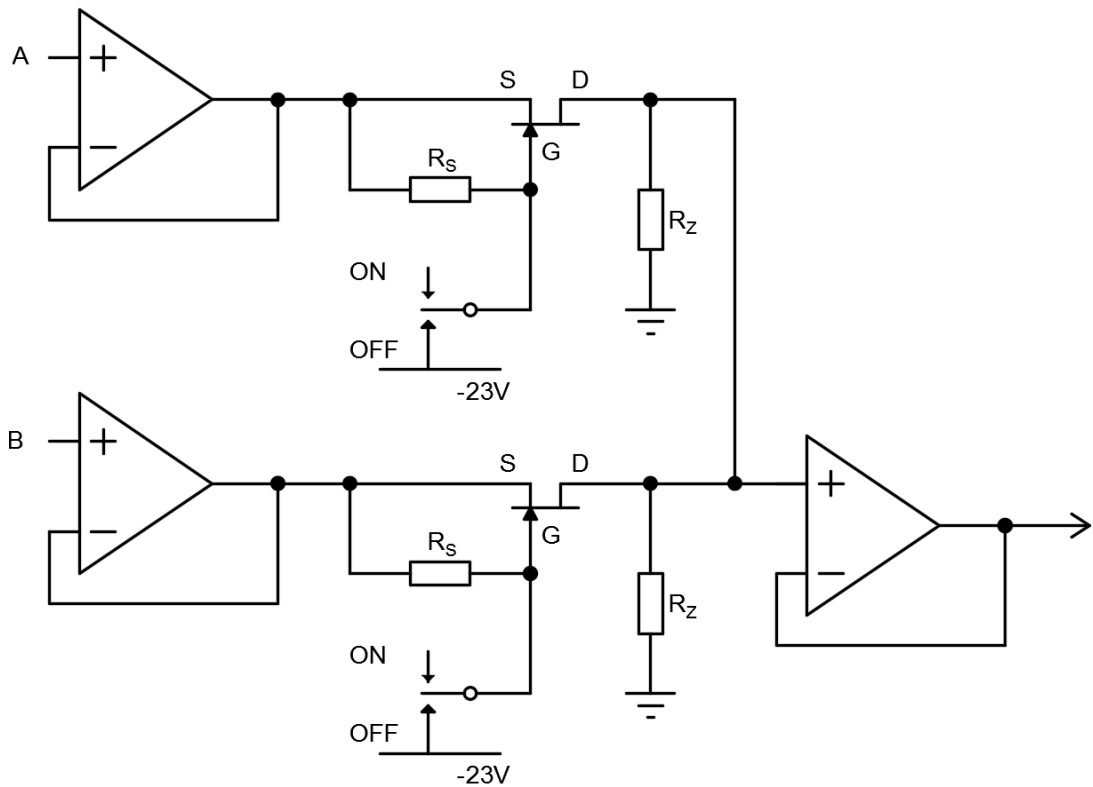
Tab.3: Naměřené hodnoty útlumu signálu z nesepnutého kanálu relé přepínače

	f=1kHz			f=13kHz		
U (V)	0,1	1	5	0,1	1	5
Útlum (dB)	68	68	65	56	56	55

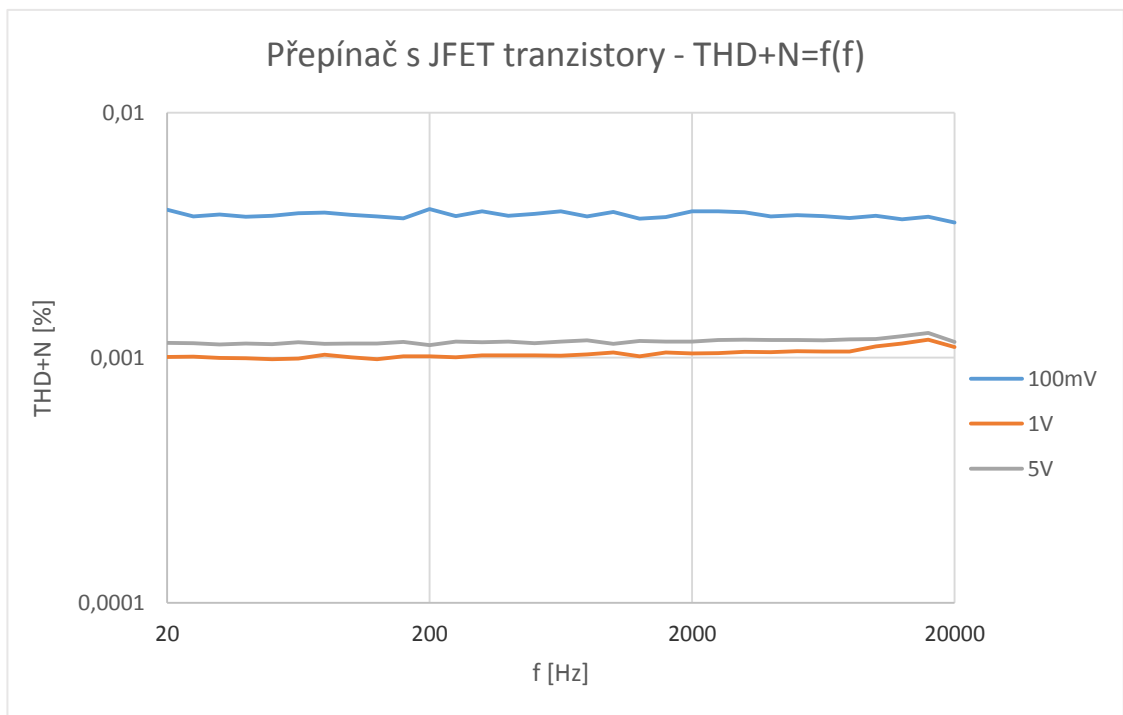
Hodnoty přeslechů jsou naopak velmi vysoké, v porovnání s otočným přepínačem zhruba o 50dB vyšší. Opět ještě výrazněji narůstají s frekvencí, na frekvenci 13kHz nedosahuje útlum z nesepnutých signálů ani 60dB.

3.4 Přepínač s tranzistorem JFET

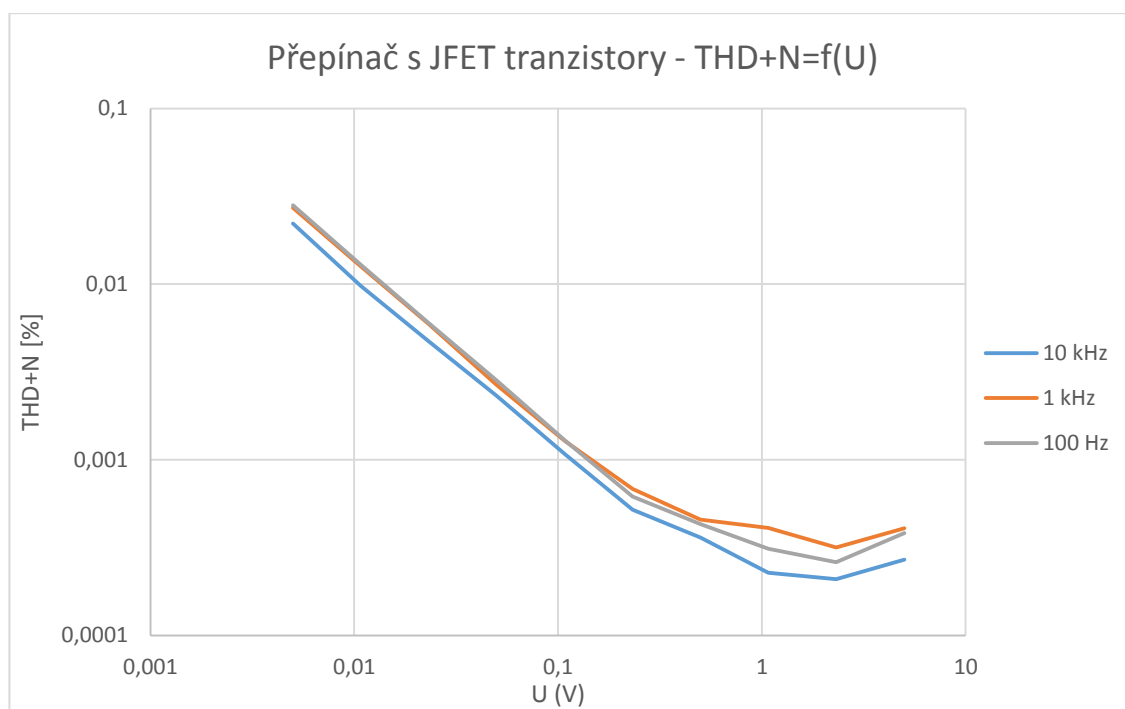
Přepínač s tranzistorem JFET byl zapojen podle schématu zapojení zobrazeném na obrázku 22 hodnotami rezistorů $R_S, R_Z = 20k\Omega$.



Obr. 22: Schéma zapojení pro měření vícenásobného přepínače s tranzistory JFET



Graf 7: Závislost THD+N přepínače s tranzistory JFET na frekvenci pro různé amplitudy signálu



Graf 8: Závislost THD+N přepínače s tranzistory JFET na amplitudě pro různé frekvence signálu

Z grafů 7 a 8 je patrné, že linearita JFET tranzistorů je na velice dobré úrovni, plně srovnatelná s linearitou otočného přepínače.

Tab.4: Naměřené hodnoty útlumu signálu z neseputého kanálu přepínače s JFET tranzistory

	f=1kHz			f=13kHz		
U (V)	0,1	1	5	0,1	1	5
Útlum (dB)	103	109	121	112	112	102

Hodnoty útlumu signálu z neseputých kanálů jsou také na dobré úrovni, pouze otočný přepínač prokázal během měření ještě výraznější potlačení signálů z neseputých kanálů.

4 Koncepce

Na přepínač signálových cest v akustické laboratoři jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu spínání a je zapotřebí, aby přepínač disponoval dostatečným počtem vstupů. Je vyžadováno co nejnižší zkreslení v sepnutém stavu a zároveň co největší potlačení přeslechů ve vypnutém stavu.

Laboratorně byly proměřeny 4 zapojení za účelem ověření teoretických předpokladů a vybrání vhodných variant pro realizaci přepínače.

Navzdory teoretickým předpokladům bylo dosaženo velmi příznivých hodnot při spínání mechanickým přepínačem, výsledky jsou zvláště překvapivé u hodnot přeslechů z neseprtých kanálů na výstup, kde mechanický přepínač prokázal nejnižší úroveň přeslechů ze všech měřených přepínačů. Velmi dobré vlastnosti spínání je možné přisuzovat faktu, že otočný přepínač neměl jednotlivé kontakty v těsné blízkosti, takže kapacita mezi neseprtými kontakty byla natolik nízká, že by se její vliv začal významěji projevovat až nad frekvenčním rozsahem využívaném audio signály. Dále je také nutné zmínit, že proměřen byl zcela nový přepínač, lze proto předpokládat, že časem by se parametry přepínání zhoršily vlivem opotřebování kontaktů, usazováním prachu a nečistot a následným vznikem vodivých cest.

Kromě nestálosti parametrů přepínání v čase má mechanický přepínač nevýhodu v nemožnosti sepnutí signálu elektronicky. Elektronické přepínání je jednak možné uskutečnit dálkově, jednak je zpravidla přehlednější.

Dalším proměřeným přepínačem bylo zapojení s virtuálním kontaktem, které prokázalo nejhorší vlastnosti z hlediska zkreslení signálu. Pro nízké amplitudy signálů (100mV) dosahovalo zkreslení (THD+N) přepínače hodnot přesahující 0,1%, čímž se zapojení stává pro potřeby akustické laboratoře nevyhovujícím. Potlačení přeslechů bylo na relativně dobré úrovni (hodnoty útlumu se na frekvenci 13 kHz pohybovaly kolem 100dB), ale ani v tomto ohledu zapojení nedominovalo nad jinými možnostmi.

Zapojení s relé přepínačem dosahuje nejlepší linearity ze všech měřených přepínačů, zároveň u něho však vznikají významné přeslechy z neseprtých kanálů. Na frekvenci 13kHz nedosahoval útlum z neseprtých kanálů ani 60dB. Aby došlo k omezení přeslechů, musela by pro sepnutí jednoho kanálu být použita dvě sériově zapojené relé. V takovém případě by linearita byla do značné míry zachována a zároveň by přeslechy dosahovaly mnohonásobně nižší úrovně.

Posledním proměřeným zapojením byl přepínač s tranzistorem JFET. Zkreslení průchozího signálu dosahuje velice příznivých hodnot, linearita je jen o málo horší než u relé přepínače, zhruba stejná jako u otočného přepínače. Zároveň přepínač s JFET tranzistorem prokázal dostatečné potlačení signálových přeslechů, je tedy vhodnou variantou pro realizaci.

Parametry přepínače s JFET tranzistory se budou v čase měnit jen velmi málo vlivem stárnutí polovodičových součástek. Přepínání spínaných kanálů je realizováno elektronicky, . V případě rozšíření počtu vstupů mohou být další vstupy snadno doplněny. Schéma zapojení s variantou pro 16 vstupů je uvedeno v příloze A. Vypnutí je realizováno přiložením záporného napětí (-23 V) na elektrodu GATE, k ovládní

Poslední vhodnou variantou je zakoupení analogového multiplexeru ADG406 od firmy Analog Devices. Přepínač nebyl laboratorně proměřen, protože jeho parametry jsou udávány na stránkách výrobce. Podle udávaných údajů by měl přepínač ADG406 dosahovat ještě lepších hodnot, než přepínač s JFET tranzistory.

Výsledky z měření zapojení s CMOS analogovými branami nejsou v práci uvedeny. Absence údajů je zohledněna v závěru práce. Pro úplnou analýzu jakosti by bylo zapotřebí měření doplnit.

Závěr

V teoretické části bakalářské práce byly shrnuty informace vyplývající ze současného stavu řešení problematiky přepínání audio signálů, byly zde detailně rozebrány možnosti přepínání, zhotovena a popsána jednotlivá schémata zapojení.

V praktické části byla vybraná zapojení laboratorně změřena a výsledky byly zaneseny do grafů a tabulek. Při výběru zapojení pro laboratorní měření jsem se snažil jednak o reprezentaci všech popsaných kategorií audio přepínačů (mechanické přepínače, analogové brány CMOS a tranzistory JFET) a jednak jsem se snažil vybrat zapojení s co nejlepšími předpokládanými parametry.

Na základě teoretických znalostí a výsledků laboratorních měření byla vytvořena koncepce přepínání audio signálů pro akustickou laboratoř. K signálovému přepínání doporučuji použít přepínač, jehož schéma je uvedeno v příloze A, nebo zakoupit přepínač ADG406 od firmy Analog devices. Obě varianty jsou vyhovující pro potřeby akustické laboratoře.

Zapojení s analogovými branami CMOS bylo změřeno chybně a výsledky měření měly náhodný charakter, proto nejsou v práci uvedeny. Důvodem chybného měření bylo zřejmě špatné přizpůsobení napájení obvodu, nebo došlo k poškození analogové brány vlivem přiložení příliš vysokého napětí ve vypnutém stavu. Pro zohlednění všech možností spínání by bylo zapotřebí variantu s analogovými branami CMOS znovu změřit.

Jako další fáze projektu by bylo proměření přepínače s branami CMOS a porovnání jeho parametrů s ostatními, již změřenými hodnotami. Teprve pak by byla definitivně vybrána varianta s nejlepšími parametry spínání, a ta by byla realizována a následně využívána v akustických laboratořích FEL.

Hlavní přínos práce vidím v detailním rozboru možností audio přepínání a ověření parametrů vybraných zapojení laboratorním měřením. Všechny body zadání se dle mého názoru podařilo splnit. Výsledkem práce je doporučení dvou přepínačů vhodných pro akustickou laboratoř FEL, které splňují vysoké nároky na kvalitu spínání.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SELF, Douglas. *Small Signal Audio Design*. 2. vyd. Burlington: Focal Press, 2015, 750 s.
- [2] PINKER, Jiří a KOUCKÝ, Václav. *Analogové elektronické systémy. 1.část*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. 142 s. ISBN 80-7043-284-5
- [3] *Audio Specifications* ©2005 Rane [online]. [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.rane.com/note145.html>
- [4] *Komplexní dvojbrany – přenosové vlastnosti* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://moryst.sweb.cz/elt2/stranky1/elt017.htm>
- [5] *Analog Devices* © 1995 - 2017 Analog Devices, Inc. [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.analog.com/en/index.html>
- [6] MOHAPL, Mojmír. *Nízkofrekvenční přepínače*. Muzikus číslo 5, září 1991. Praha: Nakladatelství NG tronic, 1991.

Přílohy

Příloha A – Schéma zapojení pro přepínač s JFET tranzistory s 16 vstupy

