

## Odrůšení plošných spojů

Ing. Jiří Vlček

Tento text je určen pro výuku praxe na SPŠE. Doplňuje moji publikaci *Základy elektrotechniky – Elektrotechnologii*.

### Vlastnosti plošných spojů

**Odpor**  $R = \rho l/S = \rho l/t w$ ,

kde  $\rho$  je měrný elektrický odpor mědi =  $0,0178 \cdot 10^{-6} \Omega m$  (odpor cínu je zhruba 10x větší)

$l$  délka spoje  $w$  šířka spoje  $t$  tloušťka mědi

Povrchový jev (skin efekt) se začíná projevovat při frekvencích desítek MHz.

**Kapacitu** spoje oproti spoji na druhé straně DPS (nejčastěji jím je zem) vypočítáme ze základního vztahu

$C = \epsilon_0 \epsilon_r S/h$ , kde  $\epsilon_0$  je  $8,89 \cdot 10^{-12} F/m$ ,  $\epsilon_r = 4,7$  pro materiál FR4,  $S$  plocha spoje a  $h$  tloušťka desky.

**Indukčnost** přímého vodiče kruhového průřezu o průměru  $r$  a délce  $l$  je:

$L = (\mu_0 \mu_r l/2\pi) [\ln(2l/r) - 1]$ , kde  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ ,  $\mu_r = 1$

Indukčnost přímého plošného spoje:

$L = (\mu_0 \mu_r l/2\pi) [\ln(2l/(t+w) + 0,5) + 0,2235(t+w)/l]$  [H]

Impedance dvou vodičového vedení (při zanedbání odporu vedení a vodivosti izolace vodičů)

$Z_0 = \sqrt{L/C}$ , kde  $L$  a  $C$  je indukčnost a kapacita vedené na jednotku délky

Impedance **mikropáskového vedení** (plošný spoj na jedné straně desky, na druhé straně zem)

$Z = 120\pi k / \sqrt{(K_1 K_2 \epsilon_r)}$ , kde  $k = h/w$ ,  $K_1 = 1 + 1,5k$ ,  $K_2 = 1 + k$ ,  $w$  je šířka spoje,  $h$  tloušťka desky

**Vlivem vzájemné indukčnosti a kapacity** mezi jednotlivými spoji vznikají mezi jednotlivými signálovými vodiči **přeslechy**. Vzájemná indukčnost nebo kapacita se uplatňuje **při vysokých kmitočtech**. Ty jsou obsaženy v signálech se strmými náběžnými hranami.

**Proudová zatížitelnost** plošných spojů je mnohem větší než u drátových vodičů. Na ochlazování spoje se podílí i laminátový materiál. K přepálení dojde při  $J = 850 A/mm^2$ . Trvalá zatížitelnost je v řádu  $100 A/mm^2$ . Maximální provozní teplota materiálu FR4 je  $125^\circ C$ . Pro odhad oteplení plošného spoje v závislosti na jeho šířce a proudu existují grafy. Například spoj o šířce  $0,8 mm$  s tloušťkou fólie  $35 \mu m$  se oteplí o  $10^\circ C$  proudem  $2 A$ . Proudem  $4 A$  se stejný vodič ohřeje o  $40^\circ C$ .

Napěťová zatížitelnost je v řádu stovek voltů ( $500 V$ ) při velikosti mezery  $1 mm$ . S nepájivou maskou je pochopitelně větší. Podrobnější informace lze najít v normách (IEC512-2).

**Elektromagnetická kompatibilita (EMC)** je schopnost zařízení **nevytvářet svojí funkcí elektromagnetické rušení a zároveň pracovat bez poruch za přítomnosti elektromagnetického rušení**. Výrobci a dovozci elektronických zařízení mají podle zákonů povinnosti zajistit shodu svých výrobků s technickými předpisy.

Z tohoto hlediska se doporučuje **při návrhu plošného spoje** se řídit následujícími pravidly:

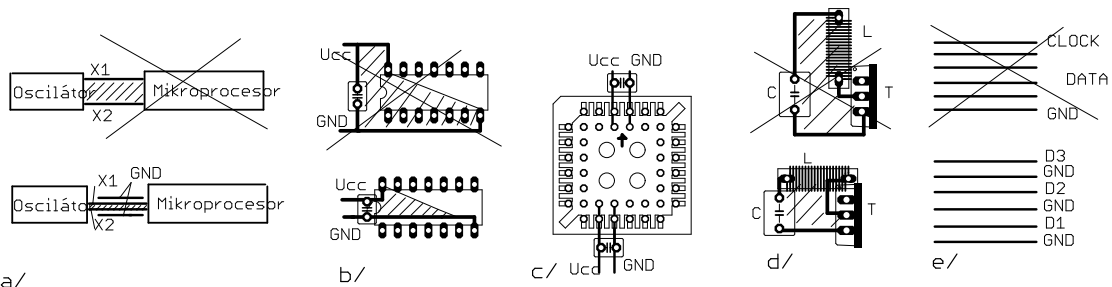
**Minimalizace hodnot proudů** (volba vhodných typů obvodů z hlediska vstupních impedancí).

**Minimalizace proudových smyček a délek spojů**

**Minimalizace kmitočtového spektra** – nepoužívat zbytečně rychlé obvody, zbytečně rychlou datovou komunikaci. Obvody HCMOS mají nejen strmé náběžné hrany, ale i vysokou impulsní spotřebu (při překlápění, jinak je jejich odběr minimální)

**Filtrace a ochrany napájení**

**Stínění**



a/  
Obrázek č. 1

Na výše uvedeném obrázku vidíme typické chyby při návrhu DPS a jejich řešení. **Základní chybou je vždy příliš velká plocha proudové smyčky** (ta je na obrázcích vyznačena šrafováním).

V případě oscilátoru a procesoru je nutné spoje X1 a X2 vést co nejbližší u sebe, případně mezi nimi nebo okolo nich vést zem (obr. a).

**Napájení integrovaných obvodů (obr. b)  $U_{cc}$  a GND je vhodné vést co nejbližší u sebe, pod integrovaným obvodem a blokovat je kondenzátorem.** Nově vyvíjené integrované obvody často nemají napájecí vývody v uhlopříčce pouzdra, ale naproti sobě (obr.c). Je vhodné používat součástky SMD. Jejich menší rozměry snižují indukčnost přívodů.

U spínaných zdrojů (obr.d) je nutné součástky T, L a C umístit co nejbližší sobě.

V horní části obr.e je nevhodně navržená sběrnice (ať už se jedná o plošný spoj nebo o kabeláž).

Vodič s nejrychlejšími změnami logických úrovní (hodiny) je nejdál od země. Správně by měl být nejbližší GND. Nejlepší ošetření takových sběrnic je **proložení signálových a zemních vodičů zemními vodiči** (dolní část obr. e). Zdvojnásobí se tak počet vodičů, ale úroveň vyzařování se sníží o 20 dB. Zvětší se vzdálenost, kterou je možné vést vodiče vedle sebe bez vzájemných rušivých přeslechů. U vícevrstvých plošných spojů umístíme v sousední vrstvě **rozlitou měď** spojenou na obou koncích sběrnice s GND.

Chladiče součástek s pracovním kmitočtem nad 75 MHz musí být propojeny s GND.

### Pravidla návrhu DPS

Vhodným rozmístěním součástek **minimalizujeme vzdálenosti součástek**. Oddělíme od sebe jednotlivé funkční bloky (analogová část, číslicová část, napájení,...).

U **jednostranné** desky se snažíme, aby **zemní obrazec** byl **co možná největší**.

U **dvoustranného** spoje se doporučuje, aby **jedna** (spodní) **vrstva** byla dle možností tvořena **nepřerušovaným zemním obrazcem** nebo aby v této vrstvě bylo minimální množství spojů. Zem by měla být i na okrajích horní vrstvy desky – omezí to vyzařování z krajů desky. Dle možností umístíme zemní obrazec i na horní stranu, k jeho připojení používáme velký počet prokovených otvorů.

Při použití **4vrstvého** plošného spoje umístíme **kritické spoje do horní vrstvy**. Pod ní je vnitřní vrstva **GND**, pod ní vrstva **napájení**. **Spodní vrstva** slouží pro **pomalejší** signálové vodiče.

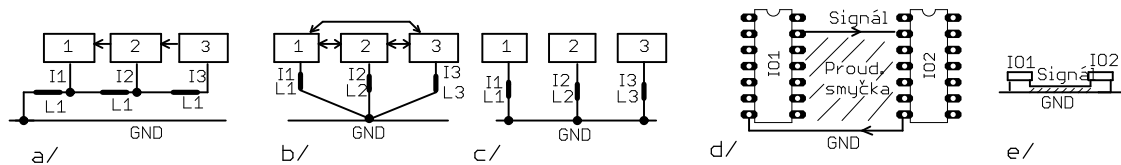
**Vícevrstvé spoje** mohou obsahovat i **více** (2 až 3) **zemních vrstev**, které zajišťují výrazně lepší odolnost proti vyzařování.

Při návrhu **zemnění** si musíme uvědomit, že **každý spoj představuje určitou indukčnost** (spoj široký 0,3 mm o tloušťce 45  $\mu\text{m}$  má indukčnost 10 nH/cm).

**Jednobodové** zemnění je vhodné především pro **stejnoseměrné a nízkofrekvenční aplikace** (do 1 MHz). **Jednobodové paralelní** zapojení používáme pro obvody, jejichž **odběr proudu a signálové úrovně jsou srovnatelné**.

**Jednobodové sériové** zapojení je vhodné pro zapojení, kde **signál vede postupnou cestou** 3→2→1 a jeho **úroveň je vzestupná** (např. 3 = předzesilovač, 2 = korekce, 1 = konc. stupeň).

**Vícebodové** zemnění je vhodné pro vysokofrekvenční a číslicové obvody. Každá součástka je co možná nejkratším přívodem připojena na nízkoimpedanční vodivou plochu. Tou bývá nejčastěji obrazec plošného spoje, který tvoří samostatnou vrstvu plošného spoje. Zemní vrstva pod signálovými spoji snižuje indukčnost těchto spojů.



Obrázek č.2

a/ Zemnění jednobodové sériové

b/ Zemnění jednobodové paralelní

c/ Vícebodové zemnění

d/ Propojení dvou integrovaných obvodů jednovrstvým spojem –

není vhodné, velká plocha proudové smyčky

e/ propojení dvou integrovaných obvodů dvouvrstevným spojem (pohled z boku) – minimální plocha proudové smyčky, minimální vyzářování

**Blokování napájecího napětí** pomocí **kondenzátorů** omezuje vliv parazitních indukčností přírodních spojů vedoucích k součástkám. Blokovací kondenzátor slouží jako zdroj napětí, který je v těsné blízkosti spotřebiče.

Hlavně číslicové obvody **HCMOS** se vyznačují velkou **impulsní spotřebou**, kterou nelze pokrýt z žádného jiného zdroje napětí. Jinak by na **přírodních vodičích** vznikaly **úbytky napětí**.

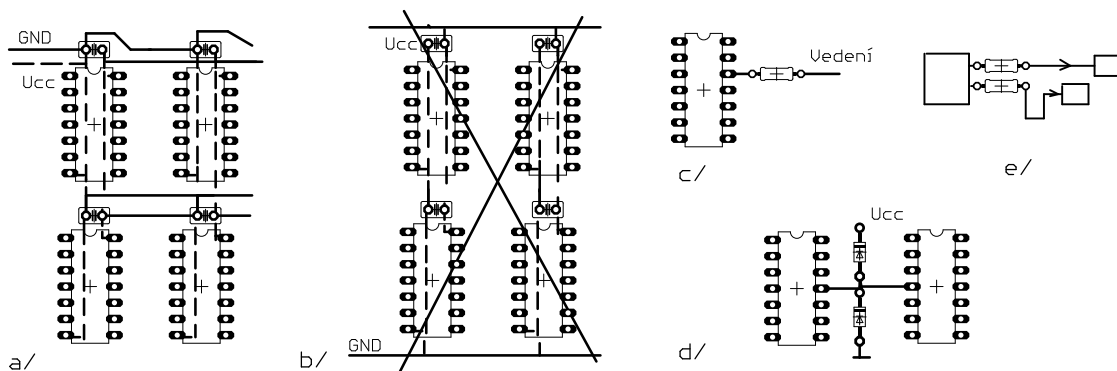
Přírodní vodiče by se staly zdrojem rušení. Špatné blokování způsobuje haradní stavy a rozkmitání obvodů.

**Každý kondenzátor** v sobě obsahuje i **parazitní indukčnost** a odpor přívodů. **Čím větší má kondenzátor kapacitu, tím větší je i jeho parazitní indukčnost**. K dokonalému **širokopásmovému blokovaní** napájení musíme zapojit **několik blokovacích kondenzátorů různých kapacit paralelně**: elektrolytický kondenzátor o kapacitě desítek mikrofaradů (jeden pro celou desku), kondenzátor 100 nF a 1 nF. Pro práci s velmi vysokými kmitočty i 100 pF. Obecně platí, že v **těsné blízkosti každého integrovaného obvodu** by měl být **kondenzátor** dle doporučení výrobce (cca 10 nF, 100 nF nemusí pro rychlé obvody vyhovovat). Vzdálenost **několika centimetrů** už je **nevyhovující**, úbytky napětí na parazitní indukčnosti přívodů mohou dosáhnou jednotek voltů.

U **napájecích zdrojů** je z hlediska odrušení vhodnější, aby mezi síťovým přívodem, pojistkou, vypínačem a primární vinutím transformátoru byly **krátké vodiče** (vypínač na zadním panelu). Pozor na dostatečnou vzdálenost mezi spoji primárního a sekundárního obvodu.

U spínaných zdrojů často skládáme kapacitu v řádu stovek mikrofaradů z několika menších kondenzátorů zapojených paralelně. Zmenší se tím jejich indukčnost.

U číslicových obvodů při dvouvrstevných DPS většinou musíme vést na **jedné vrstvě spoje vodorovně, na druhé svisle**. To umožňuje propojit na DPS libovolné dva body. Kladné a záporné napájecí napětí musíme vést vedle sebe (ne na krajích desky, jak často bývá zvykem) k minimalizaci proudové smyčky.



Obrázek č.3

a/ správné vedení napájení na dvouvrstvé desce (čárkovaně spodní vrstva – bottom)

b/ špatné vedení napájení na dvouvrstvé desce, na jedné straně Ucc, na druhé GND, vzniká velká proudová smyčka

c/ sériové impedanční přizpůsobení

d/ omezovač s diodami

e/ vedení rychlých signálů (hodin), aby vedení mělo stejnou délku

**Signálové spoje** bychom **neměli vést těsně vedle sebe** (mezera 0,3 mm) na vzdálenost delší než 13 cm. To platí pro velmi rychlé obvody HCMOS, pokud pod signálovou vrstvou není vrstva GND.

**Hodinové signály** se strmými náběžnými hranami musí být vedeny **co možná nejkratší cestou**, nejlépe je **obklopit zemním vodičem** a **co nejdál od vstupů a výstupů**. To proto, aby nenastávalo vyzařování do kabeláže. Hodinové obvody nedávat do patič, zvětšuje se tím vyzařování.

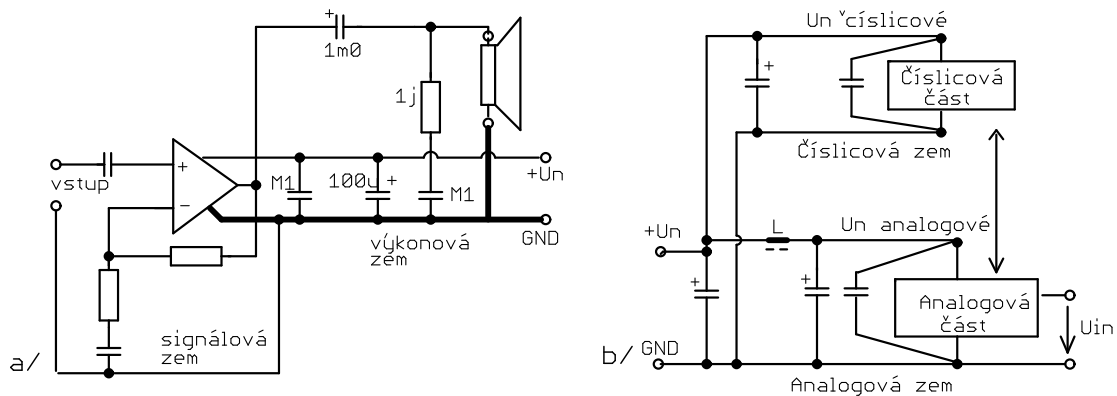
U **rychlých obvodů** HCMOS musíme řešit u **delších spojů** i otázku **odrazů a impedančního přizpůsobení**. Odrazy nastávají na vedení, jehož **délka je srovnatelná s vlnovou délkou signálu**. U materiálu FR4 je vlnová délka zhruba poloviční než ve vakuu. Je-li dvojnásobek zpoždění průchodu signálu vedením delší než trvání náběžné nebo sestupné hrany, je nutné spoj impedančně přizpůsobit. Maximální délka nezakončeného spoje se zkracuje, je-li vedení na konci zatíženo kapacitou dalších vstupních obvodů.

Spoje delší než 10 cm je někdy nutné **impedančně přizpůsobovat**. Obvykle se k tomu používá rezistor 33 Ω zapojený mezi výstup a vstup obou zařízení (*obr.3c*). K vedení lze také zapojit omezovač napětí s diodami (*obr.3d*), který odstraní překmity při odrazech přesahující hodnoty napájecího napětí. Vstupy CMOS integrovaných obvodů mají tyto diody v sobě.

Délka vodičů vedoucí hodinový signál k jednotlivým funkčním blokům by měla být přibližně stejná, aby bylo i stejné zpoždění signálů (*obr.3e*). U 10 cm dlouhého spoje počítejme se zpožděním cca 10 ns.

Při návrhu **nf zesilovačů** se má zem zesilovače, zdroje a zátěže – reproduktoru spojit v jednu **výkonovou zem**. K té se potom připojuje **signálová zem** předzesilovače. Důležité je, aby se úbytek napětí na výkonovém zemním spoji nesčítal se vstupním signálem a nevytvářela se tak zpětná vazba (galvanická zpětná vazba), která by se projevovala jako rušení. Záporná zpětná vazba zesilovače, která vychází z jeho výstupu, musí být zemněna do vstupní signálové části. Při rozmístění součástek se snažíme dodržet geometrii odpovídající schématu, kdy vstup a výstup jsou na opačných stranách DPS (*obr.4a*).

U **A/D převodníků** se na jedné DPS setkávají citlivé analogové obvody a číslicové obvody, které jsou zdrojem rušení. To znamená **rozdělit obvod na dvě části, analogovou a číslicovou**. Každá musí mít svoji zem (GND analogová a GND číslicová), které se spojují u napájecího přívodu a nikde jinde.



Obrázek č. 4

a/ zemnění nf zesilovače

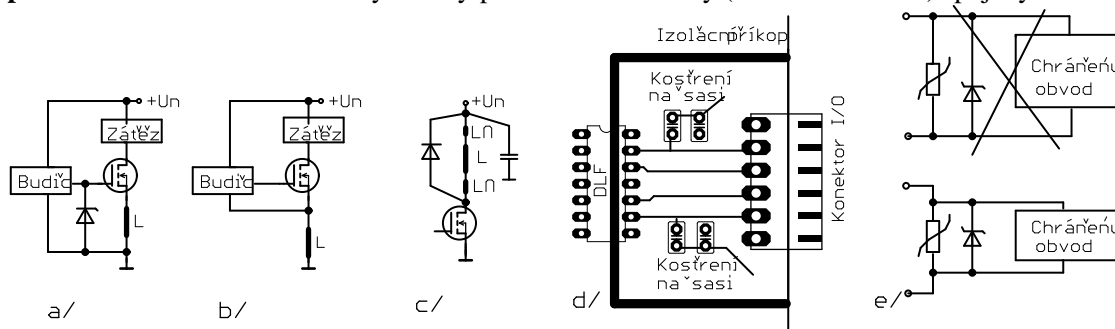
b/ zemnění A/D převodníku

U **výkonových spínacích obvodů** při spínání proudu desítek ampér během jedné mikrosekundy **vzniká** na plošném spoji o délce 1 až 10 cm **vlivem indukce napětí** v řádu jednotek voltů ( $U_L = L di/dt$ ). Před tímto napětím musíme chránit budící obvody a řídicí elektrodu MOS tranzistorů. Na obr. 5a se indukované napětí na parazitní indukčnosti přívodního spoje přičítá k budícímu napětí. Řídicí elektroda tranzistoru musí být chráněna Zenerovou diodou. Při vypínání tranzistoru se tímto indukovaným napětím tranzistor otvírá, vypínání se zpomaluje. Na obr.5b je častěji používané zapojení, kdy zem budícího obvodu je připojena přímo k MOS tranzistoru..

Na obr5c je správné zapojení ochranné diody a blokovacího kondenzátoru, které chrání obvod před indukčními špičkami při rozpojování obvodu s indukčností L. K této indukčnosti se připočítává indukčnost L' plošného spoje. Ochranné součástky zapojujeme až za tuto indukčnost.

Vstupní a výstupní obvody je potřeba chránit před **elektrostatickým výbojem** (ESD= ElectroStatic Discharge), který **trvá krátce** (1 ns) a který **generuje velké proudy** (desítky ampér) **a napětí** (stovky a tisíce voltů). Používají se k tomu Zenerovy diody, **varistory** nebo **transily**, často v kombinaci s tlumivkami DLF (Data Line Filter). Tyto obvody musí být v těsné blízkosti chráněných obvodů (obr. 5e). Mezi vlastním zařízením a vstupními konektory doplněné obvody ochrany má být **izolační příkop** (oblast, ve které nejsou žádné spoje). Obvody přepět'ových ochran uzemňujeme na kostru přístroje (obr. 5d).

Ochranu plošného spoje před **statickou elektřinou vzniklou dotykem** zajišťuje tzn. **ochranný pás**. Jedná se o 1 až 3 mm široký vodivý pás okolo celé desky (na obou stranách) spojený s GND.



Obrázek č. 5

Předpokládáme, že se obsluha při manipulaci bude pravděpodobně dotýkat okrajů desky. Tento ochranný pás zároveň omezuje vyzařování signálu z desky.

**Literatura:** Metodika návrhu plošných spojů, Ing Vít Záhlava, CSc, Vydavatelství ČVUT 2000