

Obsah

Úvod	5
1. POČÍTAČOVÝ NÁVRH PLOŠNÝCH SPOJU	6
1.1. Schematický návrh.....	6
1.1.1. Tvorba schematických značek.....	6
1.1.2. Návrh elektronického schématu	7
1.1.3. Definice vlastností součástek a spoju	7
1.1.3.1. Popisy součástek.....	8
1.1.3.2. Popisy spoju	8
1.1.4. Kontrola návrhových pravidel.....	8
1.1.5. Výstupy schematického návrhu.....	8
1.2. Návrh plošného spoje	9
1.2.1. Princip vrstev a jejich využití	9
1.2.2. Knihovny pouzder	9
1.2.3. Nactení netlistu	10
1.2.4. Nastavení technologických podmínek.....	10
1.2.5. Obrisy plošného spoje, výřezy a montážní otvory	12
1.2.6. Rozmístění součástek	12
1.2.7. Vedení spoju.....	12
1.2.8. Finální úpravy.....	13
1.2.8.1. Podklady pro formátování na výsledný rozmer	13
1.2.8.2. Sesazovací značky	13
1.2.8.3. Popisy desky plošného spoje	14
1.2.8.4. Zlacené konektory	15
1.2.9. Kontrola návrhových pravidel.....	15
1.2.10. Generování technologických dat.....	15
1.2.10.1. Podklady pro výrobu vícevrstevných spoju	15
1.2.10.2. Podklady pro osazování.....	18
2. TECHNOLOGIE VÝROBY PLOŠNÝCH SPOJU.....	19
2.1. Semiaditivní metoda výroby plošných spoju	19
2.1.1. Výroba dvoustranných desek plošných spoju	19
2.1.2. Výroba vícevrstevných desek plošných spoju	24
2.2. Trídy přesnosti.....	25
3. POVRCHOVÁ MONTÁŽ.....	27
3.1. Součástky pro povrchovou montáž.....	29
3.1.1. Pouzdra s metalizovanými ploškami	29
3.1.2. Pouzdra s páskovými vývody.....	30
3.1.3. Pouzdra BGA	31
3.2. Pájení SMD	31
3.2.1. Princip vlny	32
3.2.2. Pájení pretavením.....	33
3.2.3. Rucní pájení a opravy SMD	33
4. VLASTNOSTI PLOŠNÝCH SPOJU.....	34
1.1. Odpor.....	34
4.1.1. Skin efekt.....	34
4.2. Kapacita	35
4.3. Indukčnost.....	37
4.4. Impedance	38
4.5. Rychlost šíření signálu	39
4.6. Vliv kapacitní zátěže	40
4.7. Preslechy.....	40

4.7.1.	Kapacitní vazba	41
4.7.2.	Induktivní vazba	41
4.8.	Zatížení vodičů na plošném spoji.....	42
4.8.1.	Proudové zatížení	42
4.8.2.	Napetové zatížení	43
5.	ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA	46
5.1.	Základní pojmy a definice	46
5.2.	Legislativní rámec v České republice	47
5.2.1.	Zákon č.22/1997 Sb. a Nařízení vlády č.169/1997 Sb.	47
5.2.2.	Normy EMC – odolnost a vyzařování	49
5.3.	Elektromagnetická kompatibilita a návrh plošného spoje	51
5.3.1.	Rušení	51
5.3.1.1.	Elektromagnetické pole vyzařované proudovou smyčkou.....	52
5.3.1.2.	Elektromagnetické pole vyzařované přímým vodičem.....	53
5.3.1.3.	Kmitočtové spektrum lichobežníkového průběhu.....	53
5.3.1.4.	Souhlasné a nesouhlasné rušení	54
5.3.2.	Návrh plošných spoju z hlediska EMC	54
5.3.3.	Součástky a EMC	55
6.	NÁVRHOVÁ PRAVIDLA	57
6.1.	Rozmístění součástek.....	57
6.2.	Razení vrstev plošného spoje	57
6.3.	Zemnění	58
6.3.1.	Jednobodové zemnění	58
6.3.2.	Vícebodové zemnění	59
6.4.	Blokování napájení.....	60
6.4.1.	Reálný kondenzátor	62
6.4.2.	Plošný spoj jako blokovací kondenzátor	62
6.4.3.	Návrh lokálního blokovacího kondenzátoru.	63
6.4.4.	Návrh skupinového blokovacího kondenzátoru.....	63
6.4.5.	Návrh filtračního kondenzátoru.....	63
6.4.6.	Umístění blokovacích kondenzátorů na plošném spoji	64
6.5.	Napájecí zdroje	66
6.5.1.	Analogové stabilizátory.....	66
6.5.2.	Spínané zdroje	67
6.6.	Číslicové obvody	68
6.6.1.	Pravidla související s návrhem schématu	68
6.6.2.	Pravidla související s návrhem rozmístění součástek a vedení spoju.....	69
6.7.	Obvody hodinových impulsů.....	70
6.7.1.	Ochranné paralelní spoje.....	70
6.7.2.	Odrazy na vedení a jejich potlačení	71
6.8.	Analogové obvody	73
6.9.	A/D převodníky.....	74
6.10.	Výkonové spínací obvody	76
6.11.	Vstupní/výstupní obvody	77
6.11.1.	Izolace a separace vstupní/výstupních obvodů.....	77
6.11.1.1.	Filtrace vstupu a výstupu na plošném spoji.....	77
6.11.1.2.	Galvanické oddělení a přemostění	78
6.11.2.	Ochrana před ESD.....	78
6.11.2.1.	Ochrana I/O svorek	79
6.11.2.2.	Ochrana plošného spoje před dotykem	79
POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY.....		80
LITERATURA		81

Úvod

Skriptum **Metodika návrhu plošných spoju** je studijní pomůcka pro výuku predmetu „Metodika návrhu propojování součástek“ (**34MPS**) z celofakultní nabídky prezenní formy studia na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě elektrotechnické.

Skriptum je rozděleno do několika tématických částí v souladu s tím, co potřebuje znát při své práci návrhář plošných spoju. I když se při návrhu plošných spoju velmi efektivně využívá počítač, neznámá to, že navrhovat plošné spoje na počítači je „klikání myši na pécéčku“. Návrh plošných spoju vyžaduje především (ac to tak na první pohled nevypadá) komplexní znalosti v oblastech:

- technologie výroby plošných spoju,
- osazování a pájení,
- obvodové funkce součástek,
- teorie elektromagnetického pole

a především jejich skloubení a využití v praxi. Proto tento text nebude obsahovat návody na využití konkrétního počítačového návrhového systému pro elektroniku. Jeho cílem je upozornit čtenáře na nejdůležitější problémy, které bude muset zdolat při návrhu elektronického schématu a plošného spoje. Zároveň – vzhledem k rozsahu skriptu – není možné tuto oblast popsat vycerpávajícím způsobem. Skriptum si spíše klade za úkol upozornit čtenáře na problémy, se kterými se může setkat, a odkázat na další literaturu.

V textu se budou vyskytovat i jiné jednotky délky než metry a jejich násobky. Naprostá většina součástek má své rozměry (predevším roztec pájecích plošek) definovány v násobcích palcu, respektive milu (jedna tisícina palce). Proto se v praktickém návrhu plošných spoju automaticky užívá techto jednotek. Pro přehlednost uvádím převodní vztahy:

1“ = 2,54 cm

1 mil = 0,001“ = 0,025 mm

1 mm = 39,37 milu

orientacne 1 mm ~ 40 milu

Záverem snad jen jedna poznámka:

„*Jak se má správne navrhovať plošný spoj?*“ – „*S citem. Je to **nejen** umelecké dílo...*“

1. Pocítacový návrh plošných spoju.

S nástupem rychlých a výkonných obvodů, které stále častěji používáme při návrhu, přichází nutnost pečlivějšího návrhu plošného spoje. Není jedno, kudy se vedou spoje, jaká je jejich délka a hlavně ke které součástce se má spoj zapojit dříve a ke které až o kousek dál. Stejně tak je důležité vedet, která součástka má být vedle které a jak daleko. Nedodržení těchto pravidel může znamenat v lepším případě sníženou odolnost, nepřipustné vyzarování a v horším případě i nefunkčnost výrobku.

Využití počítače při návrhu plošných spoju poskytuje návrháři velmi mocné nástroje. Nejde jen o vlastní nakreslení schématu a návrh plošného spoje. Návrhové systémy pro elektroniku obsahují mnoho vstupu a výstupu, které usnadňují nejen návrh, ale i jeho další zpracování jak do podoby formální projektové dokumentace, tak do elektronické formy technologických dat, potřebných pro výrobu. Výstupy návrhového programu mohou tvořit podklady pro simulace. Bežně se provádějí simulace chování číslicových nebo analogových obvodů. Vzhledem k nutnosti splňovat náročná kritéria elektromagnetické kompatibility se začínají využívat simulátory preslechu a vyzarování plošných spoju.

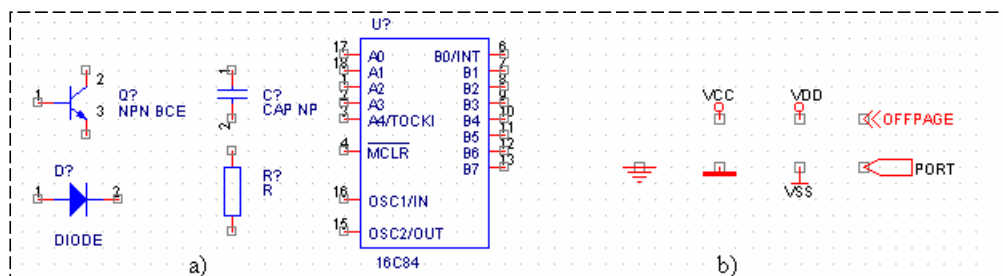
1.1. Schematický návrh

S návrhem plošného spoje musíme začít již u schématu. Jedna věc je funkční obvodový návrh včetně správného dimenzování všech součástek. Elektronické schéma, podle kterého má být vyrobený plošný spoj, musí ovšem dále obsahovat jisté obvodové prvky, které na první pohled nesouvisí s přímou funkcí obvodu. Ale opravdu jen na první pohled. Typickými příklady obvodových prvků „navíc“ jsou blokovací kondenzátory u integrovaných obvodů, ochranné součástky na vstupech a výstupech, odrušovací prvky u zdroje atd.

Zároveň je po celou dobu návrhu schématu nutné neustále si klást otázku: „*Jak to vlastně bude vypadat na plošném spoji?*“ Například zda vypínač, potenciometr, reproduktor atd. bude umístěn přímo na plošném spoji nebo na celním panelu, zda budou součástky v klasickém provedení nebo SMD, jaká bude nutná izolační vzdálenost mezi jednotlivými uzly, nebudou některé spoje tak dlouhé, že bude nutné jejich impedanční přizpůsobení...

Konkrétní strategie návrhu schématu dále souvisí s použitým programem. I když si v této kapitole kladu za cíl popsat postup při návrhu plošného spoje co nejobecněji, budou následující kapitoly zatíženy faktem, že na katedře mikroelektroniky jsou používány programové produkty OrCAD [1]. Tento návrhový systém má filozofii návrhu schématu a plošného spoje založenou na dvou oddělených programech, a tedy i oddělených knihovnách. Pro přechod mezi schématem a plošným spojem se používá netlist.

1.1.1. Tvorba schematických značek



Obr.1.1: Schematické značky a) součástek, b) symbolu.

Základním pilířem návrhu schématu jsou knihovny schematických značek součástek a symbolů. Za **součástku** považujeme schematickou značku, která bude mít přiřazeno nějaké pouzdro a bude fyzicky existovat na plošném spoji. **Symbol** bude pomocná značka přímo

neexistující na plošném spoji, bez níž by ale nebylo schéma funkční, tedy například znacka napájení (obrázek 1.1 b).

Každý návrhář pracuje s určitým okruhem součástek a má své zvyklosti v grafickém vyjádření elektronického zapojení. Je tedy nanejvýš vhodné si programem nabízené knihovny uspořádat a upravit podle svých potřeb. Nejde jen o grafickou podobu znacek, ale i o obsah položek a vlastností, jako jsou vzor poradového označení, hodnoty součástek, vsazení názvu pouzdra, případně nadefinování dalších popisů, například objednáčího čísla, ceny atd.

1.1.2. Návrh elektronického schématu

Z pohledu ovládání programu spocívá návrh elektronického schématu ve vyvolávání schematických znacek z knihoven, jejich umísťování na pracovní ploše monitoru a propojování jejich vývodu. Návrhové systémy umožňují hierarchický návrh a různé techniky propojování nejen pomocí vodičů. K dispozici jsou například sbernice, návestí, napájecí symboly...

Z pohledu obvodového návrhu a návrhu plošného spoje je nutné dodržovat pravidla a zásady, popsané v kapitole **Návrhová pravidla**. Následuje výčet nejfrekventovanějších problémů, které by měl návrhář respektovat:

- Konfigurace konektoru, systém sbernic a propojovacích kabelů.
- Systém blokování napájení pomocí kondenzátoru a filtrace vůbec.
- Ochrany vstupu a výstupu, případně jejich galvanická oddělení.
- Volba součástek s ohledem na rušivé vyzařování a odolnost.
- Impedancní zakončení dlouhých spojů.

Za nejcasteji porušovanou zásadu s velmi negativním dopadem na funkci obvodu je možné považovat podcenování významu **blokování napájení** pomocí kondenzátoru.

1.1.3. Definice vlastností součástek a spojů

Návrhové programy umožňují jednotlivým součástkám a uzlům přiřazovat různé položky (vlastnosti). V OrCADu se nazývají **Properties**. Obecně je vhodné popsat schéma co nejpodrobněji. Důvodem může být například jeho vyšší informační hodnota při dlouhodobé archivaci. Navíc mnoho firem pracuje tak, že má skupinu návrháru schémat a jinou skupinu návrháru plošných spojů. Mezi těmito skupinami musí existovat přesně definovaný způsob přenosu informací o funkci a vlastnostech schématu, aby byl návrh plošného spoje efektivní a bezchybný. Pravidla využívání položek by měl určit vnitropodnikový řád.

Popisové položky a vlastnosti schématu je možné rozdělit do několika skupin podle jejich významu:

- **Detailnější popis schematické dokumentace.** Sem patří například číslování součástek, popis jejich hodnoty a typu, objednáčí čísla z katalogu, upozornění na vysoké napětí, napětová úroveň důležitých uzlů...
- **Popis pro následné simulace obvodového chování.** Je možné zadat například odkaz na model součástky.
- **Popisy vlastností pro návrh plošného spoje.** Tyto popisy se mohou prostřednictvím netlistu promítnout do návrhu plošného spoje. Proto jim budeme věnovat větší pozornost. Rozlišujeme popisy **součástek** a elektrických **spojů** (uzlů).

To, že součástky nějakým způsobem očíslováme a popíšeme jejich hodnoty a typy, je samozřejmost, kterou nemá smysl dále rozebírat. Mejsme spíše na mysli popis dalších vlastností. Obecně je seznam popisových položek a rozsah jejich využití při návrhu plošných spojů samozřejmě omezen možnostmi použitého návrhového programu. V dalších kapitolách bude uveden výčet nejdůležitějších vlastností a popisů, které nabízí návrhový systém OrCAD for Windows verze 9.

1.1.3.1. Popisy součástek

- **Název pouzdra.** Jedná se o přiřazení pouzdra součástce z knihoven pouzder. Toto je nejdůležitější a dá se říci, že *povinný popis*
- **Strana umístění na desce plošného spoje.** Již ve schématu je možné stanovit, zda bude součástka umístěná shora (ze strany součástek) nebo zespoda (ze strany spoju).
- **Konkrétní souradnice na plošném spoji.** Používá se především u společných prvku (například konektoru) stavebnicových systému více desek.
- **Zarazení součástek do skupin.** Pomocí čísel ve zvláštním popisovém poli je možné vytvářet skupiny součástek (například skupinu napájecího zdroje, predzesilovace, převodníku atd.) a při návrhu plošného spoje potom zvolit práci s celou skupinou jako jedním objektem. Využívá se především při rozmístování součástek.
- **Uzamčení součástky.** Součástka bude na plošném spoji takzvané uzamcena. To znamená, že nebude možné s ní jednoduchým způsobem manipulovat. Využívá se v kombinaci s určením konkrétní souradnice například u konektoru.

1.1.3.2. Popisy spoju

- **Stanovení povolených vrstev.** Je možné určit, ve kterých vrstvách vícevrstvého spoje je možné daný spoj vést.
- **Šířka spoje.** Preddefinuje šířku spoje, kterou má být spoj veden. Používá se například pro vyznačení spoju s kritickou proudovou hustotou (možno zadat odlišně vrstvu po vrstve).
- **Izolací vzdálenost.** Je možné zadat izolací vzdálenost zvlášť pro jednotlivé vrstvy plošného spoje (u vícevrstvých desek). Využívá se především u spoju které musí dodržet izolací vzdálenost větší než ostatní spoje na desce. Například spoje u síťových zdrojů nebo výkonové spoje pro řízení motoru... U ostatních uzlu se izolací vzdálenost nastavuje skupinově až před vlastním rozmístování součástek a návrhem vedení spoju.
- **Nastavení typu prokovu.** Vybranému spoji se určí, jaký typ a velikost prokovu bude nastaven pro přechod mezi vrstvami vícevrstvého plošného spoje.

1.1.4. Kontrola návrhových pravidel

Kromě výstupu pro náročné analogové nebo číslicové simulace chování obvodu umožňují návrhové programy velmi operativní a účinnou kontrolu návrhových pravidel, která odhalí formální chyby typu „nezapojené vstupní piny“, „výstupní piny připojené na napájení“ atd. Taková kontrola má smysl pouze tehdy, jsou-li v knihovnách schematických značek správně nadefinované typy vývodu součástek (například vstupní, výstupní, napájecí...).

Součástí může být i kontrola integrity hierarchického návrhu. Při hierarchickém návrhu totiž nezdědka dochází k formálním chybám při definici portu, zajišťujících propojení mezi jednotlivými úrovněmi schématu. A jelikož propojeny jsou ty porty, které mají stejný název, může při překlepu nebo jiné syntaktické chybě při jejich popisu dojít k tomu, že nebudou propojeny.

Další běžnou chybou, kterou je nutné odstranit, bývá označení více součástek totožnou referencí (například dva odpory R1).

1.1.5. Výstupy schematického návrhu

Výstupem návrhu schématu může být tisk na tiskárne, seznam použitých součástek a dále celá sada souborů dat různých formátů, umožňujících další zpracování schématu. Temto souborům se zpravidla říká **netlist**. Netlist je popis zapojení schématu včetně uvedení vlastností a popisových položek v určitém formátu. Jiný formát bude mít netlist pro návrh plošných spoju a jiný ten, který je určený jako vstupní soubor pro simulace chování obvodu. Vygenerováním netlistu ve formátu srozumitelném programu pro návrh plošných spoju končí fáze návrhu schématu.

1.2. Návrh plošného spoje

Návrh plošného spoje spočívá v tvorbe pouzder součástek, nastavení technologických podmínek, nactení netlistu, definici obrysu desky, rozmístění součástek, návrhu vedení spoju, finálních úpravách, kontrole návrhových pravidel a generování technologických dat. V každé fázi návrhu je třeba mít na zřeteli tři hlediska:

1. **Vyrobiteľnosť** – deska musí byť navrhovaná tak, aby bola vyrobiteľná. Musíme určiť **pocet vrstiev** plošného spoja, respektovať **triedy presnosti** a vubec mať na zreteli **technologické možnosti** výrobcu a formáty výrobných technologických dat. Samozrejme do úvah vstupujú ekonomické otázky. *Triedy presnosti by mal návrhár ovládať naprosto brilantne.* Jedná sa o znalosť minimálnych šírek spoja, izolacných vzdáleností, priemeru vrtáku atď. z hľadiska technologických možností. Prehľad rozmeru tried presnosti je v *tabuľke 2.2*.
2. **Osazovanie a pájenie** – spôsob osazovania navrhovanej desky ovplyvňuje požiadavky na **definíciu pouzder** součástek a jejich **rozmístění** na desce plošného spoja. Například při osazování do pájecí pasty a následném pájení pomocí pretavení (*reflow*) musí pouzdra součástek obsahovat vrstvu, ve které budou definovány plošky pro nanášení pájecí pasty, při pájení na vlně nesmíme porušit pravidla o minimálních vzájemných vzdálenostech součástek...
3. **Elektrická funkce** – hledisko elektrické funkce je velmi obsáhlé. Na základě znalosti funkce obvodu navrhovaného plošného spoja musí být provedeno správné rozmístění součástek, při návrhu vedení spoju musí být respektována pravidla maximálního proudového a napetového zatížení spoju, otázky přeslechu, impedancí, zpoždění při šíření signálu, způsobu zemnění, odvodu tepla, elektromagnetické kompatibility...

1.2.1. Princip vrstev a jejich využití

Program pro návrh plošných spoju umožňuje pracovat v mnoha vrstvách, určených pro různé účely (například vrstvy spoju, nepájivých masek, servisního potisku atď.). Do vrstev se potom vkládají různé typy objektu (pájecí plošky, spoje, texty, obrysy součástek, obrysy plošného spoja...). Následuje výčet nejčastěji používaných vrstev, jejich názvu, případně zkratk:

- | | |
|-----------------------|--|
| • Vedení spoju | Top, Bottom, GND, PWR, Inner 1... (TOP, BOT...) |
| • Nepájivé masky | Solder Mask Top, Bottom (SMTop, SMBot) |
| • Pájecí pasta | Solder Paste Top, Bottom (SPTop, SPBot) |
| • Obrysy součástky | Place Outline |
| • Servisní potisk | Silkscreen Top, Bottom (SSTop, SSBot) |
| • Osazovací výkres | Assembly Top, Bottom (ASTop, ASBot) |
| • Vrtací výkres | Drill Drawing (DRD) |
| • Data pro NC vrtacku | Drill (NCD nebo DRL) |

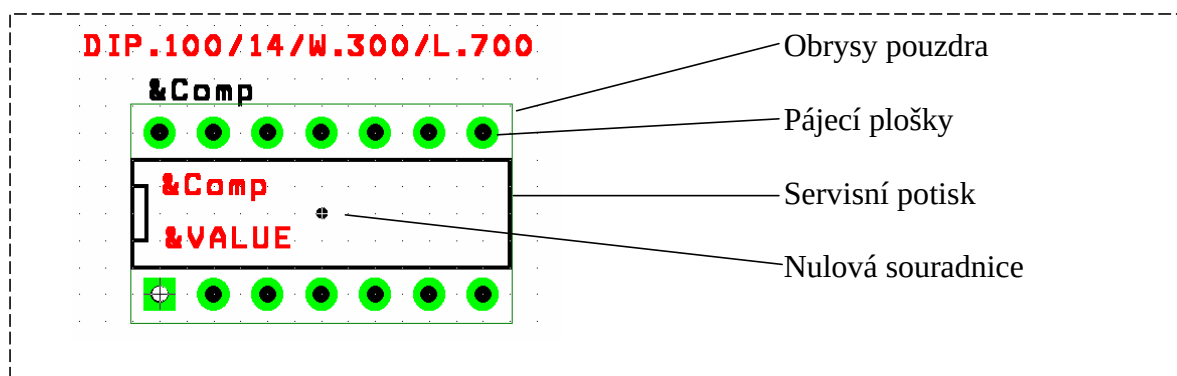
1.2.2. Knihovny pouzder

Před nactením netlistu je nutné zkontrolovat, popřípadě nadefinovat pouzdra pro všechny použité součástky. Je nutné dát pozor především na tato pravidla:

- **Triedy presnosti** – je nutné dodržovat základní parametry tried presnosti. Pri definíci pouzder pripadajú v úvahu především tyto položky: *minimální otvor, minimální velikost pájecích plošek* (tabulka 2.2).
- **Prumery vrtáku nebo konečných otvoru** – v definicích pájecích plošek by se mely používat spíše konečné průmery otvoru.
- **Správné průmery otvoru a rady používaných hodnot** – otvor pájecí plošky by měl být minimálně o 0,2 mm větší než je průměr nožicky součástky. Zároveň je dobré ujasnit si, jaké průmery otvoru budeme ve svých knihovnách používat. Souradnicová vrtacka má

omezený počet zásobníku (zpravidla 9) a použití většího počtu průměru zpomalí a prodraží výrobu.

- **Obrysy pouzdra** – tím jsou míněny obrysy pouzdra za účelem správného rozmístění součástek (v OrCADu nazývaná *Place Outline*). Tyto obrysy musí respektovat nejen vlastní rozměry součástek, ale i další aspekty, související se způsobem osazování, pájení a testování. U součástek, které vyžadují chlazení, se nesmí zapomenout na obrysy chladiče včetně způsobu jeho uchycení na plošném spoji.
- **Servisní potisk** – jedná se o motiv, který bude vytištěn na plošném spoji (zpravidla metodou síťotisku). Nesmí zasahovat do pájecích plošek a šířka čar nesmí být tenčí než 8 milů (0,2 mm).
- **Pájecí pasta** – v případě osazování součástek do pájecí pasty a následném pájení pomocí pretavení je nutné definovat ve speciální vrstvě plošky pro nanášení pájecí pasty. Pájecí pasta se totiž na plošný spoj nanáší protlačení pájecí pasty přes planžety metodou síťotisku. Vstupními podklady pro výrobu planžet jsou filmy s obrázky pájecích plošek.
- **Nulová souradnice součástky** – při perspektive strojního osazování je nutné na součástce označit referenční bod, tedy místo, které reprezentuje souradnice součástky na plošném spoji. Za tento bod bude součástka chycena vakuovou pipetou osazovací ruky automatu.



Obr. 1.2: Pouzdro součástky.

1.2.3. Nactení netlistu

Při načítání netlistu dochází k postupnému vyvolávání pouzder součástek z knihoven, umísťování na pracovní plochu a nadefinování propojení jejich pinů. Současně se přenášejí všechny příslušné položky a nastavení vlastností součástek a uzlů. Jinak nactení netlistu spadá spíše do kategorie „klikání myší“, a proto nebudeme tuto fázi návrhu dále rozebírat.

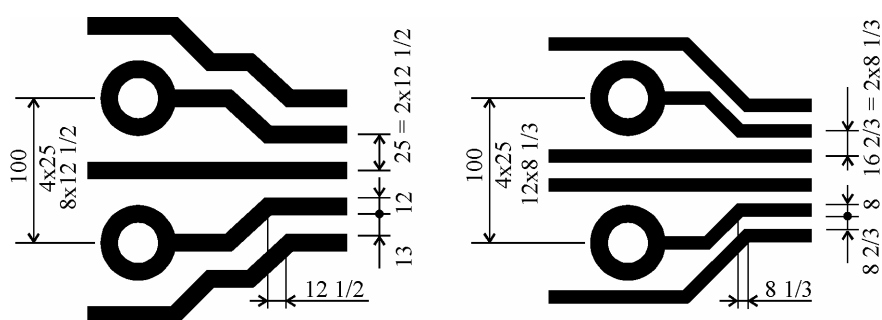
1.2.4. Nastavení technologických podmínek

Správné nastavení programu je velmi důležitým předpokladem pro celý další postup návrhu plošného spoje. Konkrétní způsob nastavení závisí na použitém návrhovém systému. Nechci zde zmiňovat nastavení barev zobrazení na monitoru, tvar kurzoru, strategie autorouteru a podobně. Z metodického hlediska návrhu plošného spoje je nutné provést nastavení nebo kontrolu především těchto položek:

- **Rastr** – jedná se o nastavení kvantování rozměrových jednotek pro různé typy operací při návrhu plošného spoje. Rozlišujeme například rastr pro rozmísťování součástek, pro vedení spoju atd. Samozřejmě návrhové programy umožňují pracovat takzvané „bezrastrově“, což zpravidla šetří místo na plošném spoji. Doporučuji ovšem tuto eventualitu ponechat jako zálohu pro řešení konkrétních jinak nevyřešitelných situací na plošném spoji a většinu času pokud možno pracovat se zapnutým rastrem. Při jeho nastavování je nutné sledovat dva základní aspekty:

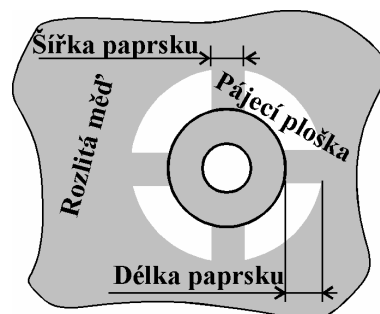
1. **Použitá trída presnosti** z hlediska šířky spoju a izolacních vzdáleností. Z ekonomických důvodů je žádoucí pokládat spoje s co možná největší hustotou na hranici třídy presnosti.
2. **Rastr pro rozmístění součástek**, respektive rastr umístění jejich pájecích plošek. Při manuálním návrhu spoju je velmi nepraktické a neefektivní, jestliže nebude rastr pro vedení spoju delitelem rastru rozmístění pájecích plošek. V současné době se zpravidla používá rastr 25 milu (0,635 mm).

Rastr pro rozmísťování součástek tedy volíme 25 milu. Rastr pro vedení spoju musí respektovat šířku spoju a izolací vzdálenosti a zároveň se musíme „trefit“ do rastru pájecích plošek součástek. Splnit oba tyto požadavky celocíselným rastrem je někdy nemožné. Programy pro návrh plošných spoju proto umožňují zadávat rastr v podobě zlomku. Například ve 4. třídě presnosti je minimální šířka spoju i izolací vzdálenost 12 milu. Při rastru pájecích plošek 25 milu tedy použijeme rastr pro vedení spoju $12 \frac{1}{2}$. V 5. třídě presnosti je minimální šířka spoju a izolací vzdálenost 8 milu, vhodný rastr pro vedení spoju bude tedy $8 \frac{1}{3}$ (obrázek 1.3).



Obr.1.3: Rastr pro 4. a 5. třídu presnosti (rozměry v milech).

- **Vrstvy** – jedná se především o určení počtu elektrických vrstev a určení jejich významu. Rozlišujeme vrstvy pro **vedení signálových spoju** (*Routing Layer*) a vrstvy s rozlévanou mědí jako napájecí a zemní **zóny** (*Plane Layer*).
- **Izolací vzdálenosti** – u uzlu, kterým nebyla nastavena izolací vzdálenost již ve schématu, je tuto nutné stanovit nyní. Pritom se musejí respektovat jak minimální vzdálenosti vyplývající z použité třídy presnosti, tak i vzdálenosti vyplývající z elektrické pevnosti.
- **Šířka spoju** – nastavení šířek spoju je opět možné již ve schématu, nicméně zpravidla se tak činí pouze u kritických spoju a u ostatních běžných spoju se šířka nastavuje právě v rámci vlastního návrhu plošného spoju. Pritom je nutné respektovat hledisko použité třídy presnosti a zároveň podmínky maximální povolené proudové hustoty.
- **Další nastavení uzlu** – uzlům můžeme přiřadit některé další vlastnosti, jako například barvu spojových vektorů neboli takzvaných „gumíček“ (=grafické znázornění odkud a kam má být navržen spoj), metody vedení spoju (90° , 45° , libovolný úhel...), použité prokovy, pravidla pro autorouter atd.
- **Prokovy** – jsou to vodivé pruchody zjedné spojové vrstvy do druhé. Je nutné nastavit jejich parametry v souladu s použitou třídou presnosti, jmenovite průměr pruchozího otvoru a velikost plošky.



Obr. 1.4: Definice termální plošky.

- **Termální plošky** – pájecí plošky, které mají být připojené k medené ploše (rozlité zóně), se připojují pomocí takzvaných termálních plošek, které zabranují nadměrnému odvodu tepla

při pájení. U termálních plošek se definuje šířka a délka jejich paprsku (*obrázek 1.4*). Šířka by měla korespondovat s minimální šířkou spoje a délka s izolační vzdáleností dle použité třídy přesnosti (*tabulka 2.2*).

1.2.5. Obrysy plošného spoje, výřezy a montážní otvory

Před rozmístováním součástek je nutné obecně recenou vymezit plochu, na které se smí vyskytovat součástky a spoje, to znamená stanovit obrysy plošného spoje, výřezy, případně do plošného spoje umístit montážní otvory. Takto definovaný obrys ještě neznámá, že bude použitý jako údaj pro výrobce pro oříznutí finálního výrobku. Při finálních úpravách je samozřejmě možné vytvořit speciální ořezové značky dle požadavku výrobce nebo vygenerovat obrysy ve speciální vrstvě za účelem jejich zpracování pro automatické frézování.

Při umísťování montážních otvorů se nesmí zapomenout na vymezení prostoru pro hlavicku šroubku, podložku či maticku. Je-li deska určena k zasunutí do drážek, musíme při rozmístování součástek zohlednit i hloubku těchto drážek.

1.2.6. Rozmístění součástek

Rozmístění součástek je třeba věnovat zásadní pozornost. Nejprve je třeba udelat rozvahu o rozmístění jednotlivých skupin obvodu (analogová, digitální část, zdroj...) včetně rozložení konektoru, a teprve potom můžeme přistoupit k vlastnímu rozmístování. Přitom je nutné dodržovat pravidla a zásady, popsané v kapitole **Návrhová pravidla a Vlastnosti plošných spoju**. Zároveň je nutné zohlednit způsob osazování a pájení navrhované desky. Některá další pravidla vyplynou z kapitoly **Povrchová montáž**. Mezi formální, ale důležité zásady, patří například též požadavek, aby po osazení desky byl vidět servisní potisk součástek, což znamená, že mezi součástkami musí být dostatečná vzdálenost pro umístění jejich popisu.

Obecně je možné říci, že na kvalitu a způsobu rozmístění součástek závisí správná funkce navrhovaného obvodu. Při návrhu složitých desek se rozmístování součástek zpravidla venuje podstatně více času a pozornosti než návrhu vedení spoju. Správné rozmístění součástek totiž usnadňuje návrh spoju.

1.2.7. Vedení spoju

Teprve po „dokonalém“ rozmístění součástek je možné přistoupit k návrhu vedení spoju. Težko říci, zda existují nějaké obecné rady a tipy, jak správně postupovat. Do návrhu spoju vstupuje příliš mnoho faktorů, které způsobují, že výsledný návrh je jedinečný. Co obvod, to jiná konfigurace problému, které mohou mít vliv na jeho správnou funkci. Při návrhu spoju je třeba dodržovat zásady, popsané v následujících kapitolách. Uvedme si tedy výčet nejfrekventovanějších zásad, které je nutné dodržovat:

- **Rozložení spoju v jednotlivých vrstvách** – u vícevrstevných desek plošných spoju jsou vrstvy sousedící s rozlitou medí vhodnější pro návrh kritických spoju...
- **Napájení a zemnění** – často porušovanými principy jsou nevhodné způsoby návrhu spoju usměrnovací, blokovacích kondenzátorů, spínaných zdrojů a rozvod napájení a zemí vůbec.
- **Délka vodičů a jejich vzájemná vzdálenost** – s délkou spoju rostou jejich parazitní vlastnosti (odpor, indukčnost, kapacita, impedance), které mají vliv na rychlost šíření elektrického signálu nebo způsobují odrazy na vedení. Negativní vliv na funkci obvodu mají též přeslechy.
- **Plochy proudových smyček** – zbytečně velká plocha proudové smyčky má vliv na vyzařování elektromagnetického pole z plošného spoje a zároveň na jeho odolnost proti rušivým vlivům.
- **Rozlévaná med** – „nalití“ medi na místa, kde nevedou spoje a její připojení ke společnému vodiči (zpravidla zemi) snižuje impedanci, vliv přeslechu, vyzařování...

- **Maximální hustota spoju** – návrhář je samozřejmě tlacen do co nejnižších výrobních nákladů na plošné spoje.

Tak bychom mohli pokračovat dále. Z uvedeného výčtu je zřejmé, že návrh plošných spoju je velmi náročná inženýrská práce a například využití autorouteru pro správný návrh plošného spoje je prinejmenším diskutabilní. Nechci říci že vyloučené. Jen to, že jeho používání nezbaví návrháře nutnosti znalosti výše uvedených zásad. Autorouter je nutné před jeho použitím správně nastavit a výslednou desku potom zkontrolovat a upravit všechny prohřešky proti zásadám správného vedení spoju.

1.2.8. Finální úpravy

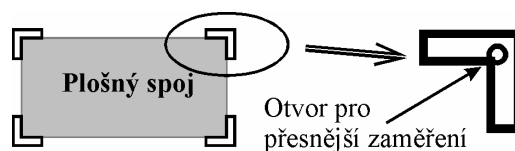
Propojením posledního spoje návrh nekončí. Nastává fáze přípravy pro generování výrobních podkladů, tedy takzvané **finální úpravy**. Mezi finální úpravy tedy patří například příprava orezových značek nebo dat pro frézování či drážkování, umístění sesazovacích značek, kótování, popisy desky plošného spoje, ošetření zlacených konektorů ...

Obsah finálních úprav závisí plně na způsobu výroby plošného spoje a na požadavcích výrobce. Jiné požadavky bude mít výrobce jednostranné desky a jiné výrobce vícevrstvé desky s prokovením, nepájivou maskou a zlacenými konektory.

1.2.8.1. Podklady pro formátování na výsledný rozměr

Způsobu formátování desky plošného spoje na výsledný rozměr je několik. Mezi nepoužívanější patří ostříh na padacích nužkách, frézování a drážkování. Pro tyto tři způsoby je nutné dodat následující podklady:

- **Ostříh na padacích nužkách** – většinou postací prosté orámování plošného spoje, při vyšších požadavcích na přesnost je dobré v rozích desky umístit orezové značky, případně i vrtací otvory.



Obr.1.5: Příklad ostříhových značek.

- **Frézování** – při malých nárocích na přesnost je možné plošný spoj frézovat podle prostého orámování. Optimální ovšem je dodat výrobcovi obrysy ve speciální vrstvě jako samostatný datový soubor v dohodnutém formátu. Z těchto dat je možné vygenerovat data pro NC frézování.
- **Drážkování** – platí stejná pravidla jako pro frézování.

V případě požadavku velmi přesného oríznutí nebo frézování je nutné určit, zda má být tato operace provedena na střed, vnější okraj nebo vnitřní okraj obrysové čáry nebo ostříhové značky. Při frézování je vhodné dodat navíc okótovaný výkres obrysu i všech výřezu včetně tolerancí rozměrů.

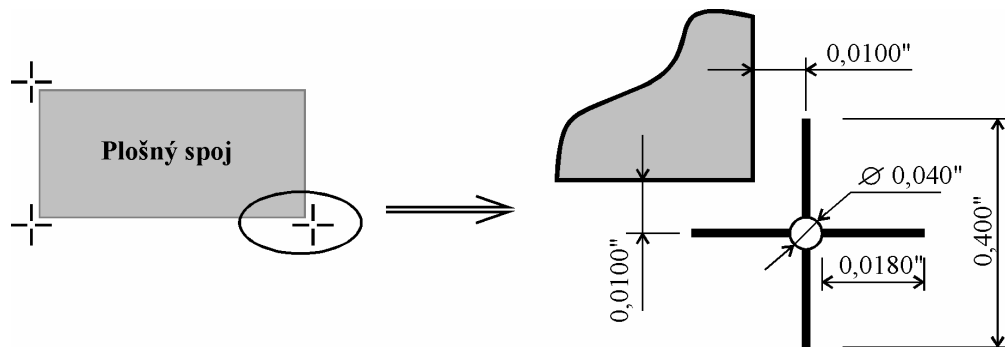
1.2.8.2. Sesazovací značky

Pomocí sesazovacích značek se přikládají jednotlivé filmy na předem vyvrtanou desku plošného spoje při jeho výrobě. Proto musí být umístěny *ve všech vrstvách, určených pro výrobu*. Při výrobě dvoustranných desek s nepájivou maskou a servisním potiskem musí být tedy ve vrstvách *Top, Bottom, Solder Mask Top, Solder Mask Bottom, Silk Screen Top* a *Silk Screen Bottom* (názvy dle kapitoly **Princip vrstev a jejich využití**).

Je ovšem otázkou, zda vůbec sesazovací značky v návrhu umísťovat, a jestliže ano, tak jaké. Platí pravidlo, že budeme-li výrobcovi dodávat sami přímo filmy, je nutné tyto kříže navrhnout, a budeme-li výrobcovi dodávat data v elektronické podobě, udelá si je výrobce většinou sám.

Pro většinu výrobců postací jako sesazovací značka jednoduchý kříž, který má ve svém středu vrtací otvor o průměru 28 až 40 milů (0,7 až 1 mm). Kříž je nutné v místě otvoru přerušit tak, aby nebyl zakrytý cárou. Takovou značku je možné vytvořit jako pouzdro

součástky do knihovny. Sesazovací značky se zpravidla umísťujú vne plošného spoje ve třech rozích desky tak, aby navzájem tvorily pravý úhel. Šířka čáry kříže by měla být 8 až 12 milu.



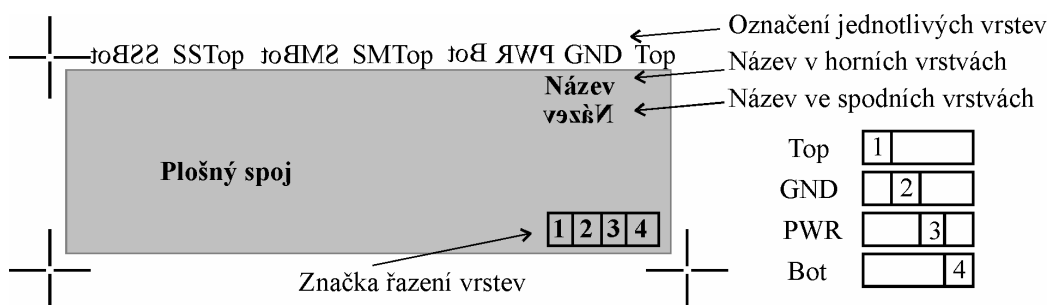
Obr.1.6: Příklad sesazovacích značek a jejich umístění.

Pri návrhu vícevrstvého spoje (4 a více) musí být filmy s motivy jednotlivých vrstev medi navíc opatřeny speciálními značkami pro správné sesazení dílců plátu v laminátoru a pro usazení laminované desky do souřadnicové vrtacky. Přípravu pro výrobu vícevrstvého spoje je ovšem vhodné ponechat na samotném výrobcu.

Navrhujeme-li desku pro automatické osazování součástek, měly by ve dvou protilehlých rozích plošného spoje ve vrstvě medi existovat dva námerné terce pro optické zamerení přesné polohy desky v osazovacím automatu. Zpravidla se používají terce o průměru 80 milu. Případné jiné umístění těchto terců a jejich tvar je vhodné konzultovat s firmou, která bude plošný spoj osazovat.

1.2.8.3. Popisy desky plošného spoje

Popisy se na plošném spoji umísťují z několika důvodů a podle toho rozlišujeme jejich funkci. **Je pritom na výrobcu plošných spoju, aby nám stanovil, jaké popisy ve kterých vrstvách požaduje pro výrobu, jakou velikost a šířku čáry písma** (zpravidla ne menší než 40 milu a ne tenčí čarou než 8 milu) **a dále ve kterých vrstvách je nutné text umístit zrcadleně.** Zrcadlení přímo souvisí s konkrétním technologickým postupem výroby plošného spoje. Většinou je nutné zrcadlit všechny texty umístěné ve spodních vrstvách (obrázek 1.7). Následuje výčet nejdůležitějších typů textu a popisu na plošném spoji:



Obr.1.7: Příklad umístění popisu na čtyřvrstvě plošném spoji (pro výrobní postup podle obrázku 2.4).

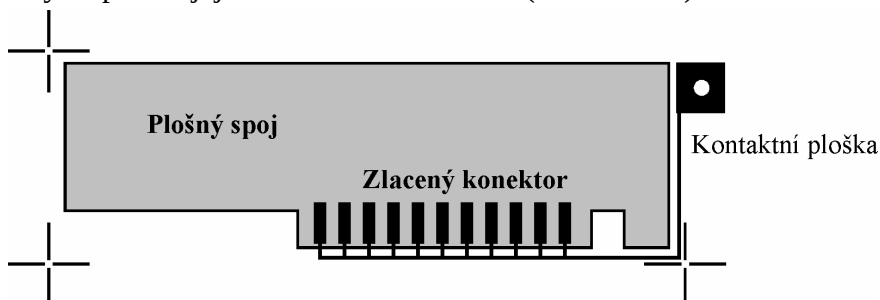
- **Název desky plošného spoje** – název je vhodné umístit ve všech vrstvách, přičemž alespoň v jedné vrstvě pokud možno uvnitř desky (aby zůstal na desce i po ostřihu či frézování). Z důvodu jednoznačnosti při výrobě je vhodné, aby byl název shodný s názvem schématu, souboru plošného spoje, souboru dat pro souřadnicové vrtání a souboru výrobních předloh (motivů jednotlivých vrstev).
- **Oznacení jednotlivých vrstev** – jednotlivé vrstvy je nutné naprosto jednoznačně označit tak, aby bylo zřejmé, o kterou vrstvu se jedná a nemohlo tak při výrobě dojít k jejich záměně. Není pritom nutné, aby označení vrstev bylo uvnitř desky. U vícevrstvého spoje se

navíc pomocí čísel ve zvláštním rámečku uvádí sled razení jednotlivých vrstev medi (toto číslování se ve spodních vrstvách nezrcadlí).

- **Servisní potisk a osazovací výkres** – Pro servisní potisk a osazovací výkres se užívá obrysu součástek a popisu, vytvořených při definici pouzder součástek v knihovnách a zpravidla není nutné je doplňovat dalšími údaji. Pro přehlednost je však vhodné provést rotace a posuny textu tak, aby byla jednoznačně dána jejich náležitost k součástkám. Pritom je nutné dbát na to, aby žádný text servisního potisku nepřekrýval pájecí plošky, případně aby se nenacházel pod součástkami (po osazení by tento text nebyl vidět).

1.2.8.4. Zlacené konektory

Nanášeli se na medené plošky galvanicky nikl a zlato, je nutné všechny plošky, které se mají poniklovat a pozlatit, vzájemně vodivě propojit a toto propojení vyvést k protejšmu okraji desky plošného spoje. Propojení se provádí vne obrysu plošného spoje a závěrečným oriznutím desky se potom jejich zkratování odstraní (obrázek 1.8).



Obr.1.8: Propojení plošek zlaceného konektoru.

1.2.9. Kontrola návrhových pravidel

Po dokončení návrhu, finálních úpravách a před generováním technologických dat pro výrobu a osazování je vhodné provést kontrolu návrhových pravidel plošného spoje. Spocívá v overení dodržení předem nastavených podmínek, především *izolačních vzdáleností* spoju, prokovu a pájecích plošek, šířky spoju. Je možné kontrolovat též pravidla rozmístění součástek. Výčet možností kontroly závisí na použitém návrhovém programu.

1.2.10. Generování technologických dat

Technologická data jsou podklady pro výrobu plošného spoje, případně další data pro jeho osazení. Formát dat plně závisí na výrobním postupu a možnostech výrobce. Před vlastním vytvářením technologických dat je nutné provést nastavení, které vrstvy, s jakými parametry a v jakém formátu budou vygenerovány.

V závislosti na způsobu zpracování dat a kvalitě výroby požaduje výrobce motivy buď v elektronické podobě určitého formátu nebo jako predlohy (klišé) v určité kvalitě:

- **Papír, fólie** – postací pro amatérskou výrobu jednostranných vzorku (rozměrová nestálost nosného materiálu).
- **Filmy z osvitky** – vhodné pro amatérskou výrobu dvoustranných spoju (pozor na rozměrovou chybu – nestálost filmu zhruba 0,1%).
- **Filmy z fotoplotru** – rozměrovo stálá cirá podložka s motivem, který má velmi dobré krytí. *Urceno pro profesionální výrobu plošných spoju.*

1.2.10.1. Podklady pro výrobu vícevrstevných spoju

Pro výrobu čtyřvrstevného plošného spoje snepájivou maskou a servisním potiskem je nutné vygenerovat následující data (zkratky odpovídají popisu z obrázku 1.7):

- Motivy jednotlivých **vrstev vodivých spoju** – strana součástek (Top), strana spoju (Bot) a obe vnitřní vrstvy (GND a PWR).
- Motivy pro **nepájivé masky** ze strany součástek a strany spoju (SMTop a SMBot).
- Predlohy pro **servisní potisk** ze strany součástek a strany spoju (SSTop a SSBot).
- Data pro **souradnicové vrtání**.
- Případná data pro **frézování**.

Vrstvy motivu spoju, nepájivých masek a servisního potisku se musí vygenerovat každá do zvláštního souboru. Data se výrobci dodávají zpravidla ve formátu *Extended Gerber 3.4*. Číslo 3 znamená počet míst před desetinnou čárkou, číslo 4 potom počet desetinných míst. Příklad dat je uveden v *tabulce 1.1*. Z těchto dat se na fotoplotru vykreslí filmové matrice.

Tabulka 1.1: Příklad datových souborů Extended Gerber 3.4 a Excellon 2.4 (v palcích).

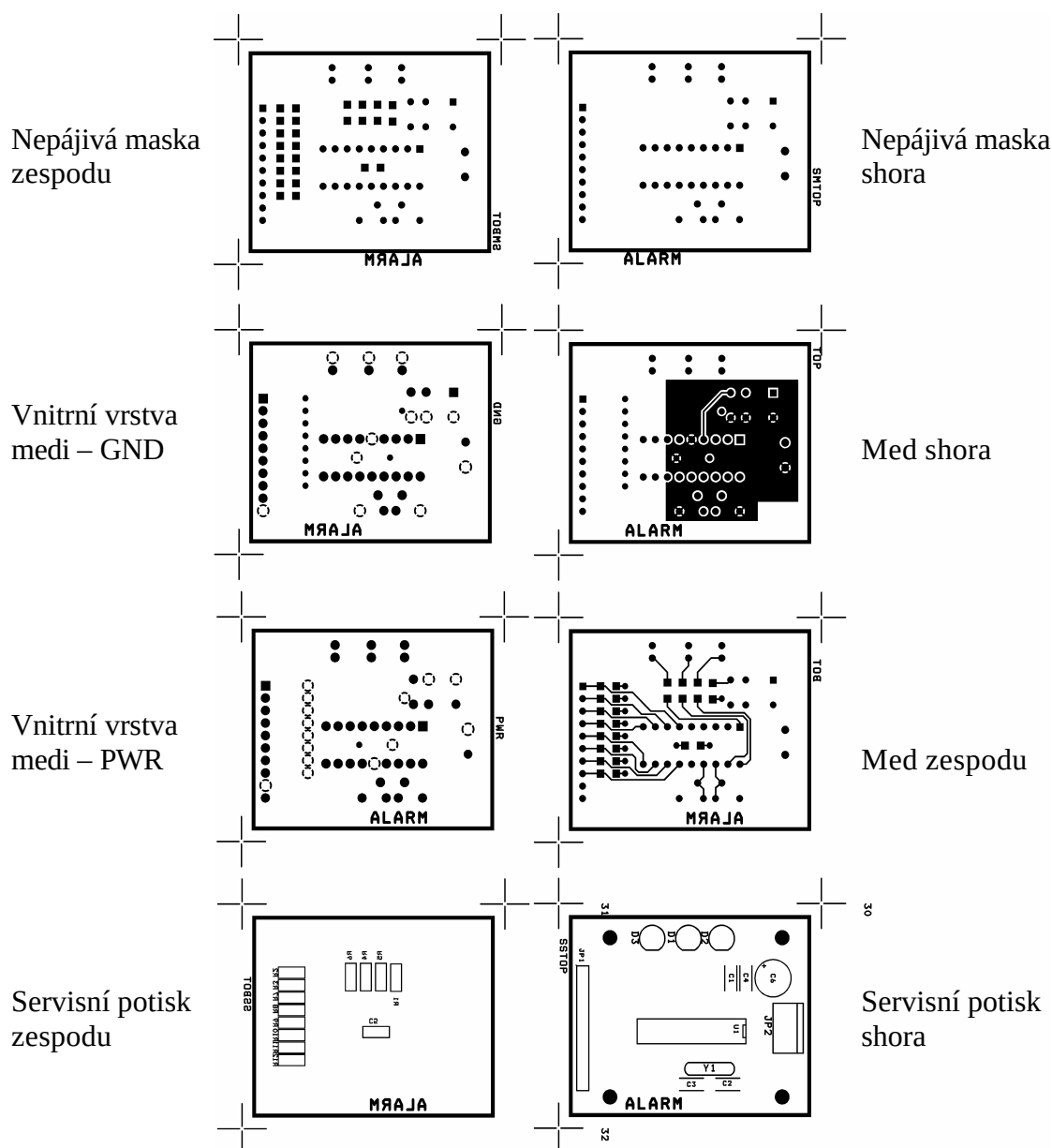
Extended Gerber 3.4	Excellon 2.4
G04 Aperture Definitions*** *%AMTHERMAL24* 1,1,0.104,0,0,* 1,0,0.074,0,0,* 21,0,0.104,0.015,0,0,45.0* 21,0,0.104,0.015,0,0,13.0*% %ADD10C,0.0550*% %ADD11C,0.0520*% %ADD12R,0.0520X0.0520*% %ADD13C,0.0580*% %ADD14THERMAL24*% G04 Plot Data *** G54D10* G01X0032750Y0014500D02* Y0012700D01* X0032750Y0010500D02* X0014950D01* G54D11* G01X0015850Y0033250D02* Y0013500D01* G54D12* G01X0018348Y0033622D02* Y0034155D01* X0018170D02* X0018810Y0034067D01* Y0033711D01* X0018854Y0033622D01* X0019761D02* G54D13* Y0030250D03* G54D14* X0019750D03* M02*	INCH,TZ T1C0.0300 <u>T2C0.0310</u> T3C0.0400 T4C0.0450 T5C0.1400 % G05 T1 X222000Y131000 X222000Y152500 X124000Y176600 X135000Y192500 T2 X182000Y145000 X212000Y155000 X212000Y145000 T3 X089000Y103500 X258000Y266000 X089000Y103500 T4 X152500Y176000 X152500Y186000 X152500Y196000 T5 X182000Y120000 X222000Y120000 X124500Y176600 X135500Y192500 T0 M30

Jednotlivé příkazy formátu *Gerber* například znamenají: ADD10C0.550* = definice kruhové clonky D10 o průměru 0,055, D01 = otevřít uzáverku, D02 = zavřít uzáverku, D03 = bliknout světlo, G54D12 = vybrat clonku D12, X0018348Y0033622D02* = přesunout se bez světla do polohy 1,8348(x), 3.3622(y), Y0034155D01* = přesunout do polohy 1,8348(x), 3.4155(y) a přitom svítit, M02* = konec souboru atd...

Příkazy formátu *Excellon*, použité v tabulce znamenají: G05 = vrtání obrazce, T1 = povel kvýmene vrtáku, M30 = nastavení registru se STOP-kódem (=konec vrtání)...

Filmy musí být vyrobeny tak, aby byl motiv v přímém kontaktu s fotocitlivým rezistem na plošném spoji. V případě kusové výroby (zhruba do 10 kusu) se filmy používají přímo a proto musí mít motiv zespodu. Pro sériovou výrobu je nutné nejprve vyrobit predlohy, ze kterých se potom fotocestou vyrobí pracovní masky. V takovém případě se predlohy vyrábějí s motivem shora. Jelikož výrobce námi dodaná data před osvitom na film kontroluje a zpracovává, budeme dodávat motivy bez jakéhokoliv zrcadlení vrstev, pouze se zrcadlením textu ve spodních vrstvách (vodivé spoje, nepájivá maska a servisní potisk ze strany spoju). Příklad takto vygenerovaných dat je na *obrázku 1.9*.

- Základním pravidlem u motivu vodivých spoju pro výrobu plošného spoje semiaditivní metodou je, že *pájecí plošky musí být vygenerovány bez vrtacích otvorů, tedy zaslepené*.



Obr.1.9: Příklad motivu, potřebných pro výrobu čtyrvrstvého plošného spoje s nepájkivou maskou a servisním potiskem (pro výrobní postup podle obrázku 2.4).

Data pro souradnicové vrtání se dodávají v elektronické podobě ve výrobcem stanoveném formátu (zpravidla *Excellon*). Předpokladem pro úspěšné vrtání je datový soubor správného formátu. V hlavičce by měl obsahovat seznam použitých nástrojů a jejich průměr. Dále následují X-Y souradnice vrtání. Příklad souboru je v *tabulce 1.1*. Výčet použitých nástrojů by neměl obsahovat příliš mnoho průměrů. Bude-li použito více vrtáku, než je počet zásobníku souradnicové vrtacky, bude nutné v průběhu vrtání zamenit některé vrtáky v zásobníku, což samozřejmě prodraží výrobu. Nemelo by se tedy stát, že v definici otvoru (*tabulka 1.1*) budou existovat nástroje s rozdílem průměru menším, než je škála průměru vrtáku (0,1 až 0,05 mm). Velmi důležité je potom výrobcovi v objednávce sdělit, zda jsou v seznamu průměrů uvedeny **průměry vrtáku** nebo **konečné průměry otvorů!!!** Vhodnější je zadávat *koncové průměry*

otvoru a nechat na výrobcí, kolik si musí připočítat na jejich průměru vzhledem k technologii výroby, kterou používá.

1.2.10.2. Podklady pro osazování

Pro osazování součástek na plošný spoj je nutné připravit náležitou dokumentaci, případně vygenerovat datové soubory v určitém formátu. Při **rucním osazování** postací připravit a vytisknout schéma, osazovací výkres, případně vygenerovat seznam použitých součástek (*Bill of Materials*). Data pro osazovací výkres jsou v OrCADu definována v samostatných vrstvách *Assembly Top* (ASYTop) a *Assembly Bottom* (ASYBot). Obsahují obrysy a popisy součástek, případně jejich pájecí plošky pro snadnější orientaci.

V případě **strojního osazování** na osazovacím automatu bývá potřeba připravit podklady ve vhodném formátu. V závislosti na použitém způsobu osazování a pájení je potřeba připravit tato data:

- **Osazování do pájecí pasty snásledným pretavením** – při pájení pomocí pretavení (*reflow*) je nutné na pájecí plošky před osazováním součástek nanést pájecí pastu. Tato se nanáší zpravidla síťotiskem. Proto je nutné vygenerovat data pro filmy, na kterých budou obrazce pájecích plošek (formát *Gerber*). Z nich se potom fotocestou a leptáním vyrobí kovové planžety pro síťotisk. Data pro tyto motivy jsou ve vrstvách *Solder Paste Top* (SPTop) a *Solder Paste Bottom* (SPBot).
- **Osazování do lepidla a pájení na vlne** – při pájení na vlne musí být součástky na plošný spoj předem přilepeny. Lepidlo se nanáší buď metodou síťotisku nebo disperzerem (dávkovacem). Pro síťotisk je nutné vygenerovat data pro filmy. Pro souřadnicové dávkování je nutné vytvořit datový soubor se souřadnicemi míst, kam má být lepidlo nadávkováno (je možno odvodit od nulové souřadnice součástky).
- **Data pro automatické osazování** – při strojním osazování automat podle zadaných dat pokládá součástky ze svých zásobníků na správná místa na plošném spoji. Data je možné zadat automatu v podstatě dvojím způsobem. Buď se automat „učí“ při osazování první desky podle osazovacího výkresu, nebo mu přímo dodáme data ve správném formátu. Při první variantě stačí vytisknout osazovací výkres, podle kterého obsluha provede osazení první desky. Pro druhou variantu je nutné vygenerovat data z návrhového programu pro plošné spoje a tato dále upravit do vhodného formátu.

2. Technologie výroby plošných spoju

V současné době se používají tři druhy výrobních postupů: Subtraktivní, aditivní a semiaditivní. Jak vyplývá z názvu, **subtraktivní** postup spočívá v odstranění přebytečné medi (leptání), **aditivní** postup znamená nanášení vodivých cest a **semiaditivní** postup je kombinací obou předchozích metod, tedy zčásti nanášení cest, zčásti leptání. Subtraktivní metodu známe téměř všichni, kteří jsme se kdy pokusili zhotovit podomácku plošný spoj. Jedná se o leptání základního materiálu smedenou fólií, tedy o standardní postup, který se vyznačuje především nízkou výrobní cenou. V technologii dvoustranných a vícevrstvých plošných spoju s prokovenými otvory se ovšem v současné době používá semiaditivní metoda, která je vhodná především pro prototypovou a malosériovou výrobu. Právě tuto metodu si blíže popíšeme.

2.1. Semiaditivní metoda výroby plošných spoju

Touto metodou je možné vyrábět jednostranné, dvoustranné i vícevrstvé desky plošných spoju. V České republice semiaditivní metodu používá zhruba 15 výrobců plošných spoju. Základní postup si ukážeme na dvoustranné desce s prokovenými otvory, nepájivou maskou a servisním potiskem. Toto skriptum si neklade za cíl seznámit čtenáře podrobně a do detailu s technologickými postupy výroby plošných spoju. V následujících kapitolách bude popsán výrobní postup do úrovně, kterou by měl znát každý návrhář plošných spoju. *Návrhář při návrhu plošných spoju totiž musí uvažovat tak, aby jeho návrh byl vyrobitelný* (DFM = Design For Manufacturing).

2.1.1. Výroba dvoustranných desek plošných spoju

Celý postup je znázorněn na *obrázku 2.2*, který zachycuje nejdůležitější výrobní kroky plošného spoje. Na rezu uvidíme, jak se postupně vytváří pájecí ploška, prokov a spoj.

Vubec prvním krokem je akt **žadání výroby**. Spocívá v dodání výrobních podkladů (takzvaných technologických dat) a vyplnění objednávkového listu. Formát technologických dat a jejich rozsah je nutné předem dohodnout s výrobcem plošných spoju. Objednávkový list by měl obsahovat přesnou specifikaci všech důležitých parametrů výsledného plošného spoje. Příklad konkrétního objednávkového listu je uveden na *obrázku 2.1*.

Před vlastní výrobou provede výrobce nejdříve **technologický rozbor zakázky a upraví technologická data**. Mezi základní operace v této fázi patří kontrola, případně umístění soutiskových křížů, úprava ostřihových značek, umístění testovacích obrazců a vytvoření galvanické protiváhy, což je zhruba 2 cm široký prstenec okolo celé desky plošného spoje. Tento prstenec napomáhá homogenizaci proudových toků při galvanických operacích. Pro výše uvedenou úpravu dat používá výrobce speciální software, určený pro předvýrobní zpracování zákaznických dat. Mezi špičky v oboru patří program CAM350 firmy *Advanced CAM Technologies (ACT)*. S jejími produkty se můžete seznámit na stránkách www.ecam.com.

Následuje **vykreslení filmových matic**, případně vytvoření výrobních kopií. Filmové matrice se vykreslují **na fotoplotru**. Jedná se o zařízení, které pomocí laseru vykreslí požadovaný motiv na fotocitlivou fólii, která se vyznačuje vysokou rozměrovou stálostí (0,1 až 0,3 mm na 1 metr délky při změně teploty o 25 K). Tloušťka filmu je 7 milů (0,18 mm). Motiv je vykreslován s přesností 1–10 μm. Výrobní kopie se potom vytvářejí z matic osvětlením na fotocitlivý materiál (diazokopie).

V tomto okamžiku je vše připraveno k započatí přímých prací na výrobě plošného spoje. Prvním krokem je **formátování základního materiálu**. Základní materiál pro semiaditivní postup je nosná deska, plátovaná z obou stran vodivou fólií medi. Formátování spočívá

v nastřižení plátované desky na určitý rozmer, vyvrtání montážních otvoru pro uchycení desky při některých výrobních operacích a obroušení hran po ostrihu.

- **Nosná deska** může být vytvořena ztvrděného papíru, teflonu, kaptonu, polyimidu, invaru na hliníkové desce atd. Mezi nejrozšířenější materiály ovšem patří *skelný laminát plněný epoxidovou pryskyřicí*. Tento materiál se označuje **FR4**. Do objednávkového listu je nutné zadat tloušťku tohoto materiálu. Standardně se používá tloušťka 1,5 mm, k dispozici jsou materiály o tloušťce v rozsahu 0,2 až 3,2 mm.
- **Medená fólie** může mít tloušťku 18, 35, 70 případně 105 μm . Ve výjimečných případech lze použít i tloušťku 5 nebo 9 μm . Standardně se používá elektrolyticky vyloučená medená fólie o čistotě 99,8% o tloušťce 18 μm . Na nosnou desku se plátuje vysokým tlakem a teplotou.

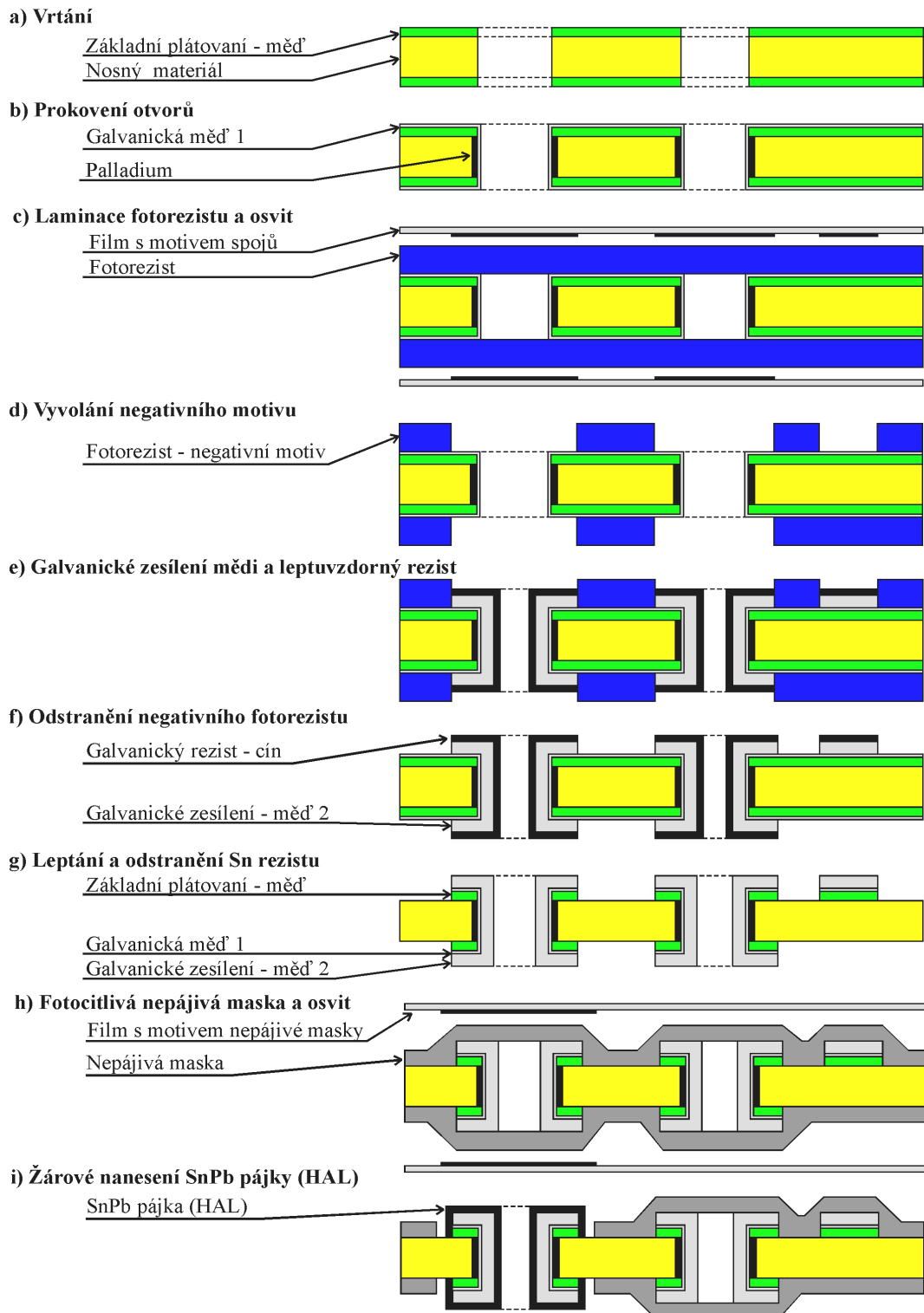
Areál Běchovice 190 11 PRAHA 9		Prago Board s.r.o.	Tel 02/6277642 Fax 02/6271254
Jméno zákazníka název DPS zakázka č.			
Rozměr DPS	 x mm	Rozměr panelu	 x mm
Počet kusů	 ks	Počet kusů v panelu	 ks
Materiál	☐ FR4 UMATEX	☐ FR4 ISOLA	☐
Tl. materiálu	☐ 1,0	☐ 1,2	☐ 1,5
Tl. mědi	☐ 18/18	☐ 35/35	☐ 70/70
Povrch	☐ cín	☐ měď+HAL	☐ cín+HAL
Maska	☐ síťotisk - fotocitlivá	☐ síťotisk - barva	
Potisk	☐ strana součástek	☐ strana spojů	
Barva potisku	☐ bílá	☐ žlutá	☐ černá
Vrtání	☐ průměry vrtáků	☐ konečné průměry otvorů	
T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7 T8 T9.....			
Opracování	☐ stříhání	☐ frézování	☐ drážkování
Doplňkové technologie	☐ galv. zlacení	☐ chem. zlacení	☐
Předané podklady	☒ filmy	☐ TOP	☐ BOT
	☐ SMT	☐ SMB	☐ SST
	☐ SSB	☐ DRL	
Převzetí	☐ poštou	☐ TEN-Ex.	☐ osobně
Vrácení podkladů	☐ vrátit	☐ uložit u výrobce	
Datum objednání		Datum dokončení zakázky	
Tel. spojení		Podpis zákazníka	

Obr.2.1: Objednávkový list výroby plošných spojů.

Po formátování nastupuje **vrtání** na souřadnicové vrtacce, vycištění otvoru a odstranění otřepu po vrtání – *obrázek 2.2 a*). Deska plošného spoje se obloží zespodu 2 mm tlustou dřevnou podložkou a shora 0,2 mm hliníkovou fólií. Hliníková fólie má dva úkoly. Jednak odvádí teplo, vznikající při vrtání a jednak eliminuje jev odchýlení vrtáku při vnoreni do vrtaného materiálu. K tomu odchýlení dochází právě v hliníkové fólii a v plošném spoji je již otvor přímý. Vrtání je vysoce přesná operace. Polohování je řízeno s přesností 10 μm . Pro uchycení

vrtačku se používá vysokoobrátkové vřeteno (20.000 až 150.000 otáček /min.) s řízeným vnorem a odsáváním pilin. Optimální rychlost vnorem je rovna polomeru vrtačky za jednu jeho otáčku. Vřeteno umí samostatne menit vrtačky pripravené vzásobníkích. Vrtáky bývají k dispozici ve škále prumeru od 0,4 mm do 6,3 mm po 0,05 až 0,1 mm. Otvory vetších prumeru se frézuji. Pocet poloh v zásobníku souradnicové vrtacky je zpravidla 9.

U vyvrtané desky je nutné kartácováním zacistit otrepy der a dále z povrchu medi odstranit piliny a mastnoty. Deska se tak pripravuje prokovení otvoru, které je bezesporu nejchoulostivejší operací výrobního postupu.

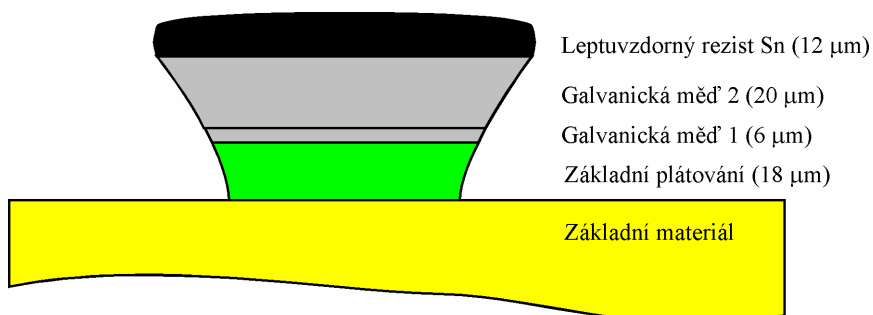


Obr.2.2: Znázornění semiaditivního postupu výroby dvoustranných plošných spoju.

Prokovení otvoru se v současné době provádí metodou přímého prokovu. Skládá se z několika kroků. Nejprve je potřeba vrtané otvory chemicky vycistit a zároveň narušit povrch základního materiálu, čímž se obnaží skelná výztuha laminátu. Do takto upraveného otvoru se v katalyzací lázni elektrostaticky nanese 0,1 μm vrstvička palladia (velikost zrn palladia v roztoku je 0,01 μm). Tím se vodive propojí obe strany plošného spoje ve všech vyvrtaných otvorech. Nakonec se galvanicky nanese 6 až 8 μm medi – *obrázek 2.2 b*).

Dalším krokem je **laminace fotorezistu, osvit motivu a vyvolání negativního motivu** (*obrázek 2.2 c* a *d*)). Jako fotorezist se používá 38 μm silná fólie fotocitlivého polymeru, která se v laminátoru naválcuje na prokovenou desku. Při velkosériové výrobě se ovšem používají tekuté rezisty. Na takto připravenou desku se přiloží film s motivem spoju a provede se osvit pomocí 5kW výbojky. Tato operace je citlivá na čistotu prostředí (částice 10 μm se již jeví jako nečistota). Proto se musí provádět v čistých prostorách, které nesmí obsahovat více než 200.000 částic větších než 1 μm na m^3 . Není třeba zdurazňovat, že film se musí na vyvrtanou a prokovenou desku přiložit s maximální přesností. Pro přesné usazení slouží soutiskové značky, které jsou umístěny v rozích plošného spoje (*obrázek 1.6*). Film je k desce fixován vakuovým rámem. Osvícený rezist se vyvolá v 1% sode. Takto vznikne negativní motiv budoucích spoju.

Na místech odkrytých fotorezistem se provede **galvanické zesílení medi** a nanese se **leptuvzdorný rezist** (*obrázek 2.2 e*)). Tloušťka galvanického zesílení medi je typicky 20 μm , přičemž poměr mezi tloušťkou zesílení na povrchu desky a v prokovu je 10:9 až 10:8. Jako leptuvzdorný rezist se používá 12 μm silná vrstva cínu a nanáší se opět galvanicky. Poté se **odstraní fotorezist**. Deska je připravená pro leptání (*obrázek 2.2 f*)). Na tomto obrázku nejlépe vynikne výhoda semiaditivní metody výroby plošných spoju. *Výsledná tloušťka spoju je větší než odleptávaná hloubka!!!* Galvanické zesílení medi se totiž provádí pouze na odkrytých místech, tedy v místech spoju, pájecích plošek a prokovu. Při leptání dochází samozřejmě k podleptání a tedy čím menší tloušťku medi leptáme, tím menšího podleptání dosáhneme. Pozorní čtenáři si jistě všimli, že na *obrázku 2.2* není ono podleptání znázorněno. Reálný profil leptaného spoje je na *obrázku 2.3*.



Obr.2.3: Reálný profil leptaného spoje.

Výsledek **leptání** a následného **odstranění cínového rezistu** je vidět na *obrázku 2.2 g*). V tomto okamžiku je deska připravena pro **testování**. Existují dva druhy testeru – optický a elektrický. Optický tester scanuje povrch desky a zjišťuje odchylky testované desky od referenčních dat. Elektrický tester měří odpor mezi zadanými místy na desce.

Na otestovanou a očištěnou desku se nanese **fotocitlivá nepájivá maska**, přiloží se film s odpovídajícími motivy a provede se osvit (*obrázek 2.2 h*)). Neexponovaná místa jsou vymyta ve vyvolávacím zařízení a maska je tepelne vytvrzena. Úkolem nepájivé masky je chránit medené spoje před vnějšími vlivy a zakrýt místa, na která nemá být nanесena pájka. Zároveň slouží jako ochrana motivu před nežádoucími zkratováním.

Po vytvrzení nepájivé masky následuje **žárové nanесení SnPb pájky**. Uvedená operace se též nazývá **HAL (Hot Air Levelling)**. Provádí se ponorením desky do tavidla a poté na čtyři sekundy do vany s roztavenou pájkou. Při vynorování se odfouknou prebytky pájky horkým vzduchem (vzduchovým nožem). Síla nanесené vrstvy se pohybuje okolo 10 μm . Pájka

zaručuje snadnou pájitelnost a klimatickou odolnost pájecích plošek. Výsledek je zřejmý z *obrázku 2.2 i*). Výroba běžných dvoustranných spoju touto operací končí. Následovalo by pouze formátování na výsledný rozmer.

Casto chceme z duvodu prehlednosti jednotlivé součástky na plošném spoji označit takzvaným **servisním potiskem**. Jedná se o popis zpravidla bílou barvou, která se na plošný spoj nanáší pomocí sítotisku. Při návrhu plošných spoju je nutné dát pozor na to, aby texty nebyly vytvořeny příliš tenkými čarami. Metoda sítotisku v dané technologii zpravidla neumí vytisknout čáry tenčí než 8 milu (0,2 mm). Pro tisky popisu se používají dvousložkové epoxidové barvy, které se po nanesení tepelne vytvrzují. Při návrhu plošného spoje je důležité zajistit, aby žádné objekty z vrstev servisního potisku nezasahovaly do pájecích plošek.

Výrobci plošných spoju nabízejí jako součást své technologie operaci **zlacení**. Podle způsobu nanášení rozlišujeme zlacení chemické a galvanické. Vlastnímu nanesení zlata ovšem předchází kromě očištění povrchu medi ještě **niklování**. Galvanicky vytvořená vrstva medi je totiž značně porézní a při přímém zlacení by zlato pronikalo do příliš velké hloubky v medi, což by znamenalo extrémně velkou spotřebu zlata. Proto se nejprve nanáší levnější nikl a na něj teprve zlato. Při chemickém nanášení se používá 1 µm niklu a 0,1 µm zlata. Při galvanické technologii potom 5 µm niklu a 1 µm zlata. **Chemické zlacení** je vhodné jako ochrana pájecích plošek při dlouhodobém skladování desek před jejich pájením (více než 1 rok). **Galvanické zlacení** se používá při **zlacení přímých konektorů**. Pozor na nutnost vzájemného spojení všech zlacených ploch při galvanickém nanášení (*obrázek 1.8*)!

Poslední výrobní operací je **formátování na výsledný rozmer**. Používají se tři způsoby:

- **Ostříh na padacích nužkách** – jedná se o nejjednodušší, nejrychlejší ale zároveň málo přesnou operaci ($\pm 0,25$ mm). Na hranách desky zůstávají otřepty skelného laminátu a proto je vhodné jejich zabroušení na rovinné brusce. Ostříh není vhodný u desek, které mají být zasunuty do přesných drážek (presnost operace) a dále u desek, které přicházejí do styku s lidskou pokožkou (otřepty laminátu). Ostříh se provádí podle speciálních ostříhových značek nebo méně přesne podle orámování obrysu plošného spoje (*obrázek 1.5*). Vzhledem k výsledným tolerancím a mechanickému namáhání materiálu při ostříhu je vhodné dodržet minimální vzdálenost vodivého motivu od okraje desky 2,5 mm.
- **Frézování** – provádí se zpravidla na stejném přístroji jako vrtání, pouze se do vřetena uchytí místo vrtáku frézka o průměru 1,5 až 2,5 mm. Presnost frézování je $\pm 0,1$ mm. Minimální vzdálenost motivu od okraje desky je 1,5 mm. Frézování se dále používá pro získání vnitřních otvorů o větším průměru než 6,3 mm, nepravidelných otvorů a výřezu. Za tímto účelem bývá vhodné výrobci dodat ve speciální vrstvě obrysy ve formátu *Gerber* (shodně s ostatními). Z těchto dat je totiž možné vygenerovat data pro počítačem řízené frézování.
- **Drážkování** – je vhodné při výrobě velkého množství malých desek vedle sebe, které navíc mají být osazovány a pájeny strojne. Výrobce plošných spoju provede pouze oboustranné naríznutí obrysu a destičky zůstanou vedle sebe jako jedna velká deska. Naríznutí ztenčí desku po celém obvodu obrysu na 0,4 mm. Šířka drážky je 0,8 mm. Po osazení se potom jednotlivé destičky snadno oddělí *rozříznutím*. **POZOR!!!** Drážkování není určeno pro následné rozlámání. Mohlo by dojít k zlomení SMD součástek u okraji destiček. Minimální vzdálenost motivu od okraje desky je 2,5 mm.

Součástí výrobního procesu je také **ekologie**. Použité lázně z chemických procesu se musejí zneutralizovat ve speciální neutralizační stanici a zbavit se sraženin na polypropylenových membránách tak, aby do splaškové kanalizace odcházela čistá voda.

Z uvedeného postupu vyplývá, že se jedná o časově náročný proces. Je overeno, že minimální celková technologická doba výroby je vyšší než 7 hodin. Z počtu operací nutně vyplývá, že interní chybovost výroby nebude nulová. Pohybuje se v řádu 1 až 2 %.

Tabulka 2.1: Přehled vrstev plošného spoje a jejich typických tlouštěk.

Vrstva	Tloušťka
Filmy z fotoplotru	0,18 mm
Nosný materiál	0,2 až 3,2 mm, standardne 1,5 mm
Základní plátování medi	5, 9, 18, 35, 70 nebo 105 μm , standardne 18 μm
Prokov – aktivace palladiem	0,1 μm
Prokov – galvanická med	6 až 8 μm
Fotorezist (fólie)	38 μm
Galvanické zesílení medi	20 μm
Leptuvzdorný rezist – cín	12 μm
Nepájivá maska	25 μm
SnPb HAL	10 až 15 μm
Nikl (chemicky/galvanicky)	1 μm / 5 μm
Zlato (chemicky/galvanicky)	0,1 μm / 1 μm

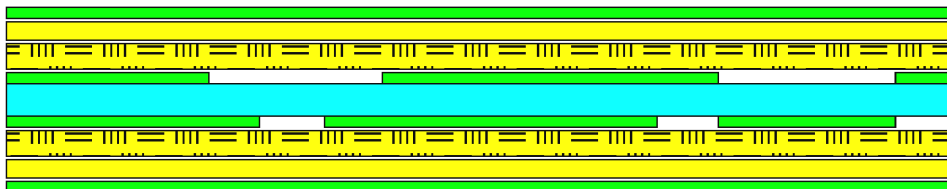
2.1.2. Výroba vícevrstevných desek plošných spoju

Výroba vícevrstevných desek plošných spoju semiaditivní technologií je odvozena od postupu pro dvoustranné spoje. Obecně je možné vícevrstvé spoje vyrábět buď dalším postupným vrstvením izolacních laminátů a medených plátů na základní jádro (tenkou dvoustrannou desku) nebo laminací dílcích tenkých dvoustranných desek. V následujících odstavcích si popíšeme jeden z možných postupů výroby čtyřvrstvé desky, pro jednoduchost pouze s otvory procházejícími celou deskou, přičemž vynecháme veškeré detaily, shodné sdíle popsanou technologií pro dvoustranné desky.

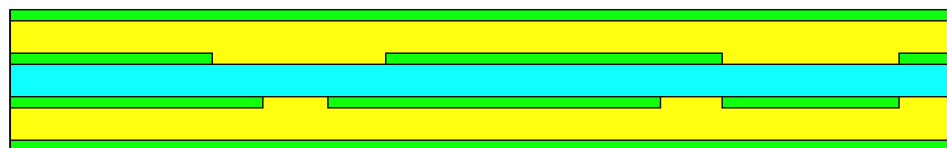
a) Oboustranně vyleptané jádro



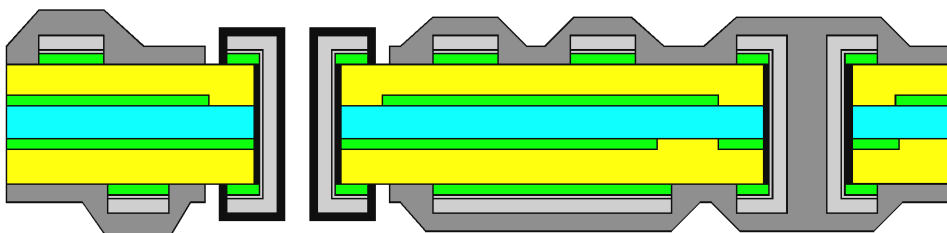
b) Vrstvení fólií nevytvrzených laminátů a medi



c) Laminace



d) Finální výrobek



Obr.2.4: Znáznornění postupu výroby čtyřvrstvé desky.

1. Nejdrříve se vytvoří vodivé obrazce na základním jádru (*obrázek 2.4 a*)).
2. Na jádro se postupne navrství hrubší a jemnější fólie ze skelné tkaniny s pryskyřicí, která není úplně vytvrzená a na ne medené fólie. (*obrázek 2.4 b*)). Hrubší fólie musí vyplnit a vyrovnat nerovnosti na základním jádru (mezi medenými spoji). K jemnější fólii potom dobře prilne medená fólie.
3. Ve výkonném laminátoru (lis s vysokou teplotou a tlakem) se provede vytvrzení celé sestavy (*obrázek 2.4 c*)).

Jelikož zvenci vypadá takto vyrobený sendvic jako dvoustranná deska, bude další výrobní postup shodný s *obrázkem 2.2* – vrtání, prokovy, fotorezist, zesílení medi, leptuvzdorný rezist atd. Výsledná deska je potom znázorněna na *obrázku 2.4 d*).

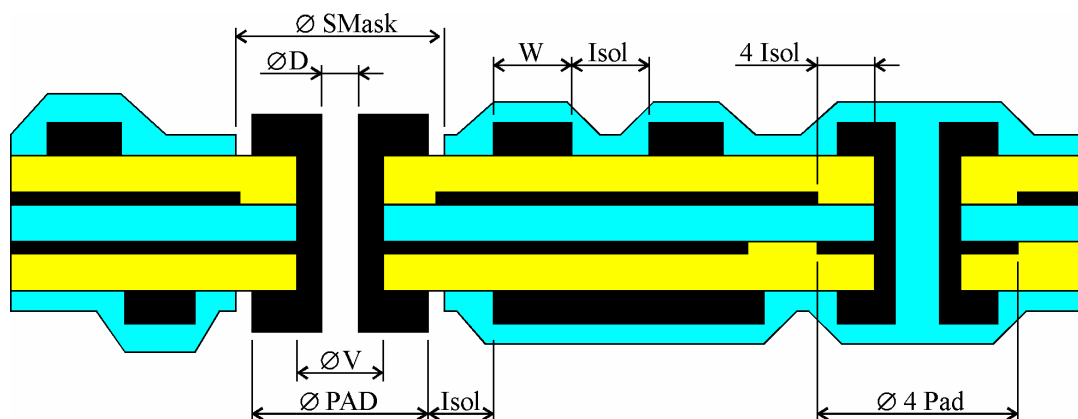
2.2. Trídy presnosti

Trídy presnosti definují parametry základních objektu na plošném spoji, jako je například minimální šířka spoje, izolací vzdálenost, minimální průměr vrtaného otvoru a minimální rozmer pájecí vrtané plošky. V současné době v České republice na toto téma neexistují žádné platné státní normy. V dřívějších dobách platily podnikové normy, ve kterých se odrážely konkrétní technologické možnosti jednotlivých podniku, vyrábějících plošné spoje (například Tesla Prelouc, ZAVT atd.).

V současné době je nutné se řídit technologickými možnostmi a tomu odpovídajícími ceníky jednotlivých výrobcu plošných spoju. V *tabulce 2.2* jsou uvedeny nejdůležitější položky ve třech nejpoužívanějších třídách presnosti. Všechny údaje jsou v milech (1 mil = 0,001 inch = 0,0254 mm). Význam jednotlivých položek je patrný z *obrázku 2.5*. Upozorňuji, že se jedná o kompilát údaju několika vybraných výrobcu. Před návrhem plošných spoju je nutné se obrátit na konkrétního výrobce a vyžádat si od nej nejen aktuální parametry tříd presnosti, ale i veškeré další technické a obchodní podmínky, jako například požadované prvky finálních úprav, formát dat, ceníky atd.

Tabulka 2.2: Trídy presnosti.

Trída presnosti:	4	5	6
Šířka spoje (W)	12	8	6
Isolací vzdálenost (Isol)	12	8	6
Průměr vrtáku (ØV)	28	20	16
Průměr pájecí plošky (ØPAD)	ØV + 24	ØV + 16	ØV + 12
Průměr nepájivé masky (ØSMask)	ØPAD + 10	ØPAD + 8	ØPAD + 6



Obr.2.5: Vyznačení parametru tříd presnosti.

U vícevrstvých spoju se navíc obvykle definují izolační vzdálenosti a průmery plošek ve vnitřních vrstvách (**4 Isol a 4 Pad**). V závislosti na přesnosti sesazování jednotlivých vrstev a přesnosti jejich následného vrtání výrobce požaduje zvětšení těchto parametrů oproti standardním hodnotám o 4 až 8 milů.

Je dobré si povšimnout, že v tabulce je průměr pájecí plošky **ØPAD** a nepájivé masky **ØSMask** vztažen k průměru vrtáku **ØV** ale výrobci budeme zadávat konečné průmery otvoru **ØD!!!** V knihovných návrhového systému budou mít tedy pájecí plošky a prokovy nastaveny také průměr **ØD!!!** Musíme tedy na základě tohoto faktu při definici rozměru plošek kúdaži **ØPAD** a **ØSMask** připočíst rozdíl mezi **ØV** a **ØD**, který činí zpravidla 4 milů (0,1 mm).

Poznámka:

Konečný průměr otvoru zpravidla stanovujeme jako průměr nožicky součástky plus 8 milů (0,2 mm).

Příklad:

Pro pájecí plošku ve 4. třídě přesnosti tedy pro nožickou součástku o průměru 24 milů (0,6 mm) budeme zadávat (v milích):

Průměr otvoru **ØD** = 24 + 8 = **32** = nožicka + 8 milů

Průměr pájecí plošky **ØPAD** = 32 + 4 + 24 = **60** = otvor + nakovení + min. pájecí ploška

Průměr nepájivé masky **ØSMask** = 60 + 10 = **70** = pájecí ploška + min. nepájivá maska

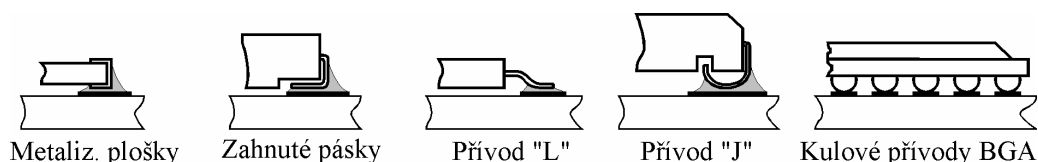
3. Povrchová montáž

Pri klasické montáži jsou součástky s drátovými přívody po předchozím natvarování a ostrižení zasouvány do prokovených nebo neprokovených der desky s plošnými spoji a následně zapájeny ze strany plošných spoji. Technika povrchové montáže předpokládá využití bezvývodových součástek, případně součástek s vývody, které se pájejí přímo na povrch desky s plošnými spoji (obrázek 3.1). Takové součástky mohou mít podstatně menší rozměry a vyšší hustotu vývodu. V současné době jsou k dispozici kompletní rady součástek jak pasivních (rezistory, kondenzátory, cívky, trimry), tak i aktivních (tranzistory, diody, integrované obvody), včetně různých typů univerzálních pouzder a konektorů. Technika povrchové montáže je tak stále užívanější pro výhody, které je možno shrnout do několika bodů:

- Zmenšení rozmeru a hmotnosti desky s plošnými spoji.
- Zmenšení počtu prokovených der pájecích plošek.
- Vyšší pracovní frekvence (kratší přívody součástek a vzdálenosti vubec).
- Snadné osazování desek pomocí automatu.
- Vyšší spolehlivost, nižší cena osazené desky.

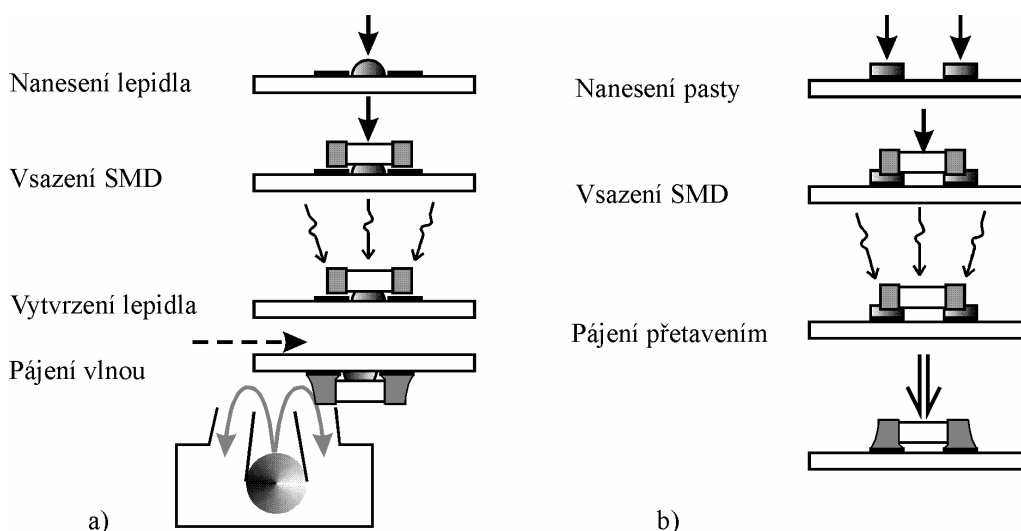
V terminologii povrchové montáže se používají dvě základní zkratky:

1. **SMT** (Surfaces **M**ounted **T**echnology) = technologie povrchové montáže.
2. **SMD** (Surface **M**ounted **D**eVICES) = součástky pro povrchovou montáž.



Obr.3.1: Typy přívodu součástek pro povrchovou montáž.

Odlíšný způsob osazování a pájení klade specifické nároky na počítačový návrh plošných spoju, týkající se zejména tvorby pouzder součástek, rozmístění součástek a způsobu vedení spoju. V dalších kapitolách si tedy popíšeme některé typy pouzder součástek pro povrchovou montáž a způsoby jejich osazování a pájení. Pro bližší seznámení se s technologií povrchové montáže doporučuji literaturu [2].



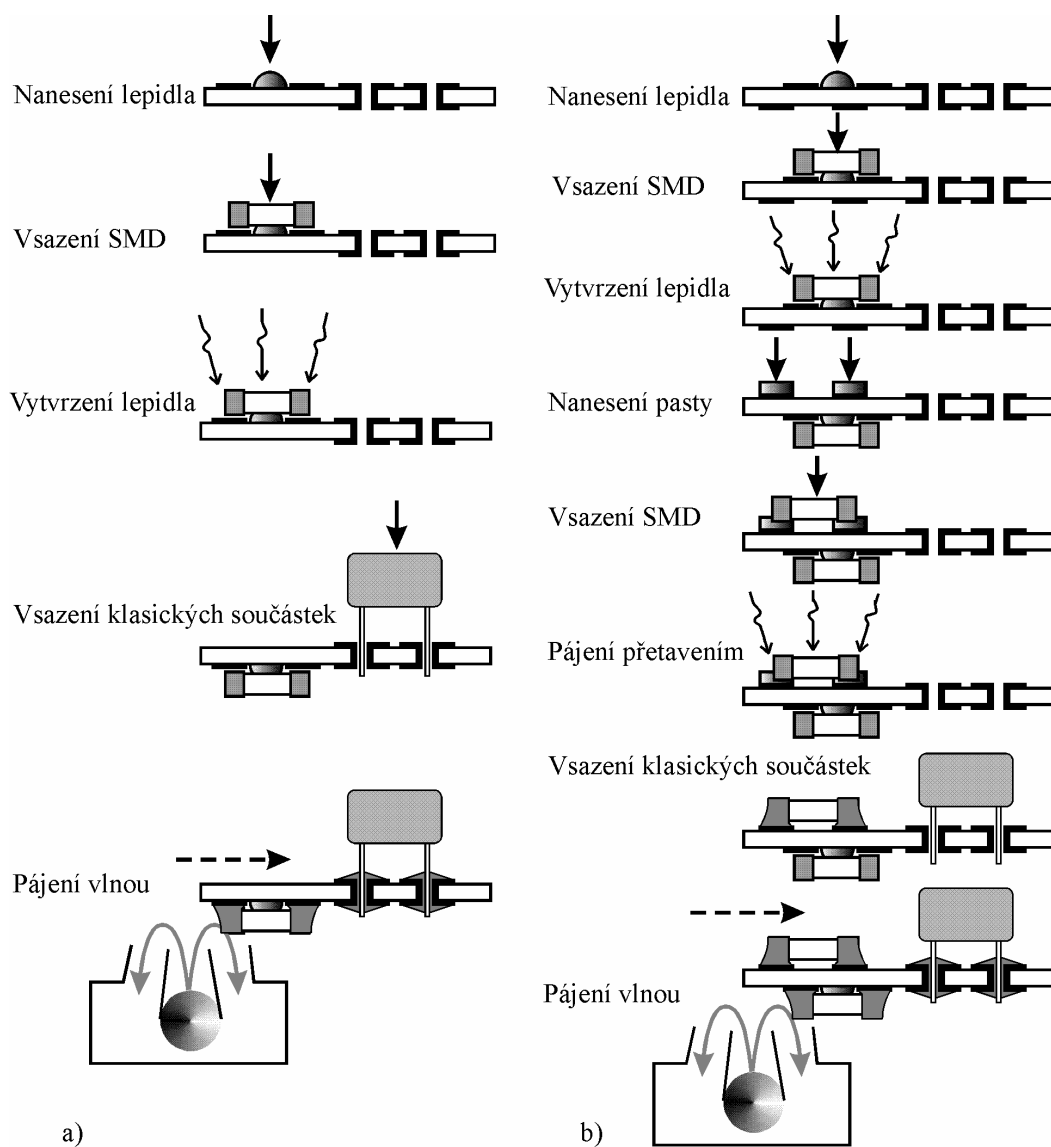
Obr.3.2: Postup při osazování a pájení SMD a) vlnou, b) přetavením.

Pro hromadné pájení velkých sérií plošných spojů se radu let používá technologie **pájení vlnou** (*wave soldering*). Při pájení součástek pro povrchovou montáž pomocí této metody je nutné součástky předem na plošný spoj přilepit (*obrázek 3.2 a*).

Zásadní obrát v montážních technologiích nastal se zavedením nové technologie **pájení pretavením** (*reflow*) do sériové výroby (*obrázek 3.2 b*). Pájka je nanášena na kontaktní plošky desky plošného spoje předem v podobě pasty (sítotiskem nebo disperzerem). Do ní jsou osazovány součástky a nakonec je takto osazená deska ohráta na teplotu, která zajistí pretavení pájky. Vzhledem k tomu, že ne vždy máme k dispozici všechny součástky v provedení pro povrchovou montáž, může být kombinováno pájení pretavením s rucním pájením.

U složitějších obvodů se často používá **smíšená montáž**. Zde jsou použity oba typy součástek. Za podmínky striktního dodržení pravidla osazení SMD z jedné strany a klasickými součástkami ze strany druhé je možno použít pájení vlnou (*obrázek 3.3 a*). Při oboustranné montáži SMD a jednostranné montáži klasických součástek je nutné kombinovat pretavení s pájením vlnou (*obrázek 3.3 b*).

I když se technika osazování desek s plošnými spoji povrchovou montáží zavádí především z důvodu vyšší produktivity výroby zavedením osazovacích automatů, prosazuje se SMT stále více i v prototypové a malosériové konstrukci a též v amatérské praxi.



Obr.3.3: Postup při osazování a pájení – a) jednostranná, b) dvoustranná smíšená montáž.

3.1. Součástky pro povrchovou montáž

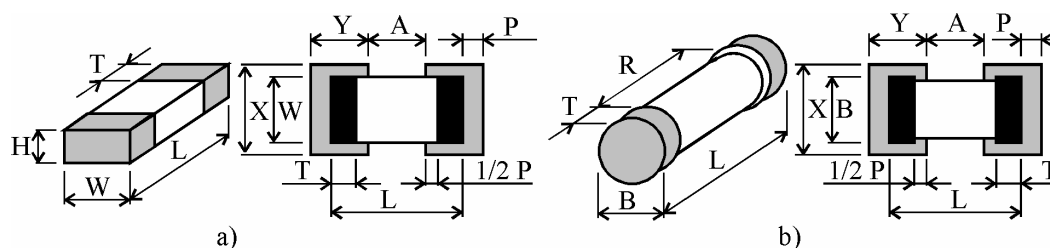
Vzhledem k rozsahu a tématu tohoto skriptu se omezíme na zbežný popis některých nepoužívanějších typu pouzder součástek pro povrchovou montáž s důrazem na zvláštnosti při návrhu knihoven pouzder těchto součástek. Tato problematika je obsahem **Společné normy pro elektrotechniku SNE 2151 – Obrazce pájecích plošek pro povrchovou montáž** [3] a je též podrobně popsána v literatuře [2]. Při tvorbě pouzder SMD součástek v knihovně návrhového systému je nutné správně definovat zejména:

- **Pájecí plošky** – je vhodné dbát doporučení katalogových listů a aplikacních zpráv pro danou součástku respektive typ jejího pouzdra, kde zpravidla bývá uveden vhodný rozměr a umístění pájecích plošek.
- **Nepájecí masku** – Rozměr nepájecí masky, respektive její odstup od pájecích plošek je dán třídami přesnosti (*tabulka 2.2*).
- **Plochu pro nanesení pájecí pasty** – pro pájení přetavením se musí nadefinovat plošky, na které bude nanášena pájecí pasta. Velikost plošek pro pájecí pastu se doporučuje o 10 až 20% menší než je rozměr plošek ve vrstvě medi. V knihovně pouzder součástek postací rozměry plošek ve vrstvě pájecí pasty ponechat shodné s rozměry ve vrstvě medi a úpravu na správný rozměr ponechat na firmě, která bude nanášení pasty a osazování provádět.
- **Místo pro lepidlo** – pro pájení vlnou je nutné nadefinovat místo kam bude metodou sítotisku nebo disperzerem (dávkovacem) nanášeno lepidlo (u rozmernejších součástek několik míst). Nanášení disperzerem je vhodnější, neboť velikostí dávky je možné nadefinovat výšku kapek lepidla pro každou součástku zvlášť.
- **Referenční bod** – pro uchycení součástky osazovacím automatem. Tento bod se zpravidla stanovuje do geometrického středu součástky.
- **Plochu vymežující obrys součástky** – tento obrys je zpravidla větší, než je vlastní rozměr součástek. Obzvláště při pájení vlnou je totiž nutné dodržet minimální vzájemné odstupy součástek. Jejich porušení by mohlo znamenat, že některé pájecí plošky budou ve „stínu“ vlny a nebudou správně připájené. Doporučené vzdálenosti součástek jsou na *obrázku 3.10*.

Obecně platí, že při návrhu pouzder a dále při rozmísťování součástek a návrhu jejich propojení je nutné zohlednit všechny požadavky a podmínky, které stanoví firma, která bude plošný spoj osazovat a pájet. Zároveň je vhodné si všechna vytvořená pouzdra vytisknout a součástky na ně zkusit přiložit.

3.1.1. Pouzdra s metalizovanými ploškami

Do pouzder s metalizovanými ploškami se používají především rezistory a kondenzátory. V provedení SMD mají tvar kvádrů (*obrázek 3.4*). Velikost pouzdra se značí čtyřmístným číslem, kde první dvě číslice znamenají délku L a druhé dvě číslice šířku W kvádrů (v desítkách milu). V současné době se vyrábějí pouzdra velikostí 2040 až 0201. Vyrábějí se též pouzdra obsahující několik rezistorů. Diody se zpravidla používají do válcových pouzder typu MELF (**M**etal **E**lectrode **F**ace **B**onding) a vyrábějí se v několika velikostech.



Obr.3.4: Pouzdro a) cipového rezistoru nebo kondenzátoru, b) MELF.

Tabulka 3.1: Rozměry vybraných pouzder a pájecích plošek (rozměry v milích).

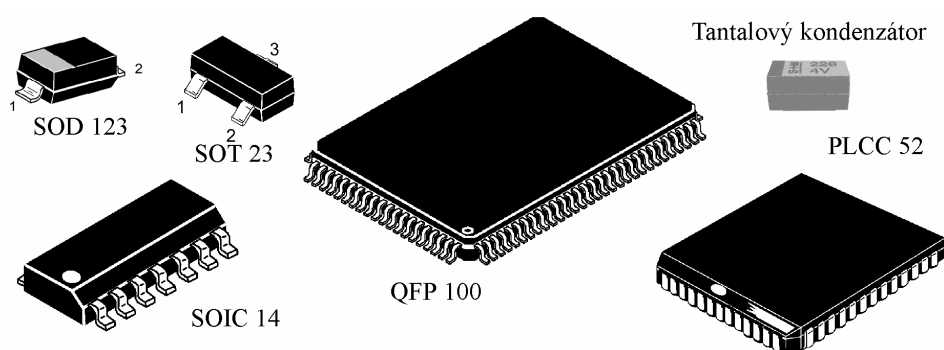
Pouzdro	W/B	L	H	T	X	Y	A
1206	60	120	22	16	60	60	70
0805	50	80	20	12	50	50	34
0402	20	40	12	4	22	22	20
MELF (MLL41)	Ø100	200	–	20	114	60	132
MiniMELF (MLL34)	Ø63	140	–	16	80	56	76

Pri návrhu pájecích plošek platí obecná zásada, že $X \sim W$, $Y \sim P+T+P/2$, kde P je presah, který se doporučuje u kvádrových pouzder $P \sim H$ a pro pouzdra typu MELF $P \sim B/4$.

3.1.2. Pouzdra s páskovými vývody

Do této skupiny patří především následující pouzdra (obrázek 3.5):

- **Tantalové kondenzátory** – pouzdra s průvody typu „zahnuté pásky“ z obrázku 3.1.
- **SOD, SOT** – pouzdra pro diody a tranzistory (**S**mall **O**utline **D**iode, **T**ransistor).
- **SOIC** – pouzdra pro integrované obvody s vývody na dvou protilehlých stranách (**S**mall **O**utline **I**ntegrated **C**ircuit). Rozteč vývodu vřadě je 50 milu, vzdálenost jejich řad 150 nebo 300 milu.
- **QFP** – ctvercová nebo obdélníková pouzdra s vývody na čtyřech stranách (**Q**uad **F**lat **P**ack). Rozteč vývodu se v současné době pohybuje od 12 do 50 milu.
- **PLCC** – cipové nosice s vývody typu „J“ (**P**lastic **L**eaded **C**hip **C**arrier). Tato pouzdra se často zasouvají do patič a rozteč jejich vývodu je 50 milu.



Obr.3.5: Příklady pouzder s páskovými vývody.

Pájecí plošky pro součástky s páskovými vývody musí být větší než je pudorys vývodu a jejich konkrétní rozměry jsou pro jednotlivé typy pouzder doporučeny v [3]. Pájecí plošky pro tantalové kondenzátory jsou uvedeny v tabulce 3.2. Dále například vývody pouzder SOIC 16x32 milu mají doporučenou pájecí plošku 25x80 milu, u PLCC je doporučeno při rozměru plošky 16x70 milu použít plošky 25x80 milu a u QFP vývodu 10x25 milu plošku 12x60 milu. Obecně šířka plošek by neměla být větší než polovina rozteče vývodu součástky.

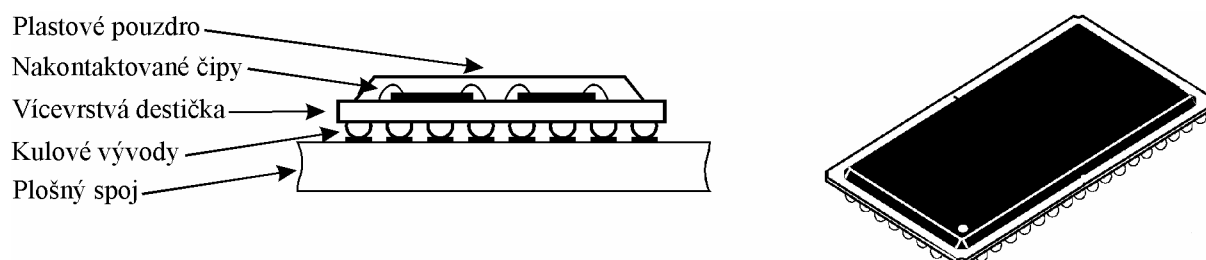
Tabulka 3.2: Rozměry vybraných pouzder a pájecích plošek tantalových kondenzátoru.

Pouzdro	W	L	H	W ₁	T	X	Y	A
A (3216)	60	126	63	46	32	54	80	32
B (3528)	110	138	75	86	32	94	80	48
C (6032)	126	236	100	86	32	94	96	126
D (7243)	183	284	110	94	32	102	96	166

Symbolika je shodná s kótováním na obrázku 3.4, W₁ je šířka vývodu (je odlišná od šířky celé součástky W), všechny rozměry v milích.

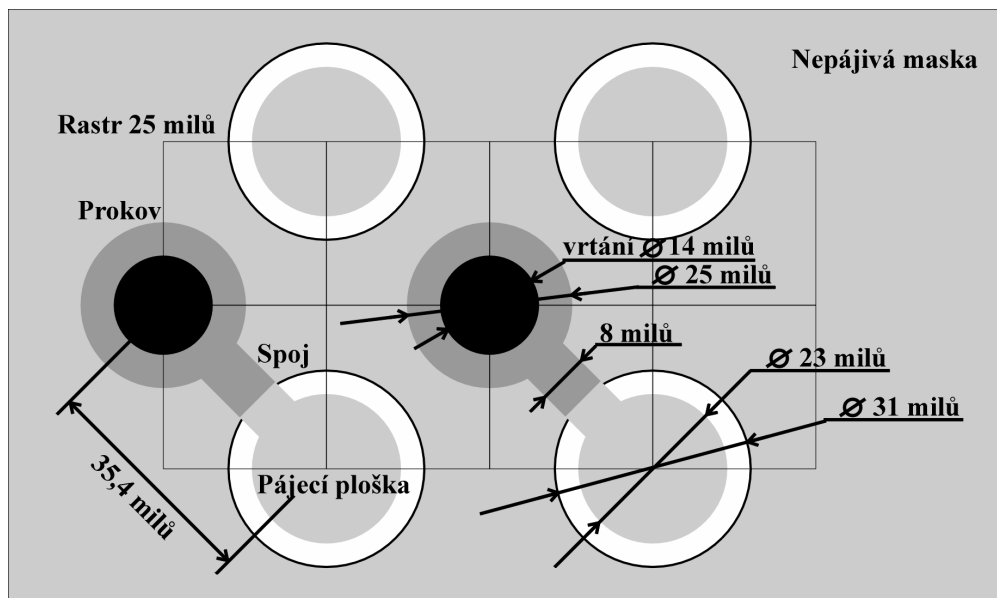
3.1.3. Pouzdra BGA

Velmi rozšířeným pouzdrům, určeným pro montáž do der nebo do patice, bylo PGA (**P**in **G**rid **A**rray). Toto pouzdro bylo vyvinuto pro hradlová pole a procesory v počítačích. Má ctvercový tvar a vývody umístěné na spodní straně základny. Roztec pinu je 100 milu a nelze ji snižovat, protože nelze více zmenšovat průměr vývodu a tedy i průměr vrtaného otvoru v plošném spoji. Miniaturizace těchto pouzder je tedy možná pouze záměnou kolíkových vývodů za kulovité vývody, které budou osazovány technologií povrchové montáže. Tak vznikla pouzdra BGA (**B**all **G**rid **A**rray) – *obrázek 3.6*. Základní nosnou podložkou je zpravidla vícevrstvá destička plošného spoje. Na ní jsou z jedné strany umístěny a nakontaktovány polovodivé čipy, zalité v plastovém pouzdře, a z druhé strany kulové vývody v rastru 50 milu nebo 1 mm. Průměr kulových vývodů je od 24 milu do 36 milu a základním materiálem je pájka Sn63Pb37 nebo Sn62Pb36Ag2. Bod tavení se tak pohybuje okolo 180°C, což umožňuje snadné a spolehlivé pájení přetavením.



Obr.3.6: Princip pouzdra BGA.

Pro pouzdra BGA jsou doporučeny **pájecí plošky** o průměru 24 milu, **nepájivá maska** 31 milu, propojení do dalších vrstev plošného spoje pomocí **spoju** o šířce 8 milu, **prokovu** o průměru 25 milu, vrtaných vrtákem 14 milu (*obrázek 3.7*) [4].



Obr.3.7: Doporučené pájecí plošky a prokovy pro BGA [4].

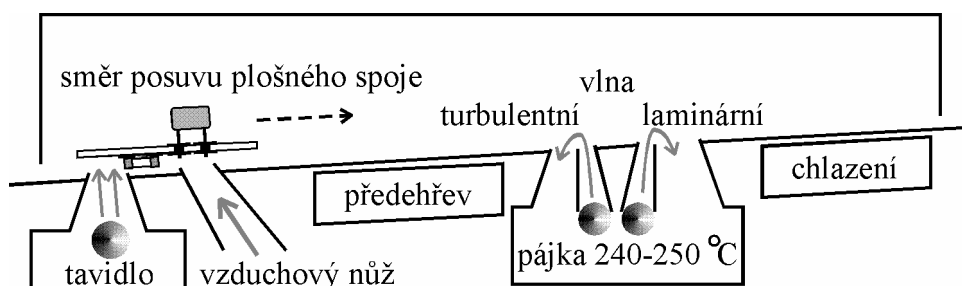
3.2. Pájení SMD

Jak vyplývá z předchozích kapitol, existují pro hromadnou výrobu elektroniky dvě odlišné metody pájení spoju. Pájení vlnou a přetavením. Kromě toho je někdy nezbytné, především při opravách nebo v amatérské sféře, použít i rucní způsob pájení.

3.2.1. Princip vlny

Pájení vlnou se používá radu let. Jeho výhoda spočívá mimo jiné v tom, že je možné ho použít pro kombinovanou montáž klasických součástek se součástkami SMD. Základní princip zařízení pro pájení vlnou je na *obrázku 3.8*. Deska s přilepenými součástkami je uložena na dopravník, řešený většinou s pomocí rámečku posouváných retezovým pohonem. Osazená deska prochází postupně přes následující zóny:

- **Nanášení tavidla** – pena nebo spray, poté se vzduchem odstraní prebytné tavidlo.
- **Predehrev** – aktivace tavidla, snížení teplotního šoku pro desku i součástky (120 – 150°C).
- **Pájení** – průchod desky po vlně roztavené pájky vytlačované kolmou tryskou. Nejčastěji se používá pájka Sn63Pb37 o teplotě v zásobníku 240 až 250°C, požadovaná teplota pájky na plošném spoji je 215 až 220°C. Pro pájení desek obsahujících SMD je nutná dvojitá vlna. Deska je nejprve smáčena pájkou proudící turbulentně, aby se zajistilo dokonalé smáčení všech plošek a jejich dokonalé prohrátí. Druhá část vlny s laminárním prouděním zabezpečuje vytvoření dokonalého kužele pájky na pájeném spoji. Pomer času pájení mezi turbulentní a laminární sekcí je 1:4. Celkový čas pájení se pohybuje od 2 do 5 sekund.
- **Chlazení** – pozvolné ochlazení desky se zapájenými součástkami na teplotu okolí.



Obr.3.8: Princip vlny.

SMD součástky je nutné na plošný spoj před průchodem vlnou přilepit. Geometrie kapek lepidla závisí na způsobu jeho vytvrzování. Na rozdíl od vytvrzování teplem (*obrázek 3.9 a*) je při vytvrzování ultrafialovým zářením nutné zajistit přímou viditelnost kapek lepidla (*obrázek 3.9 b*). Průměr kapek je zhruba 1 mm.

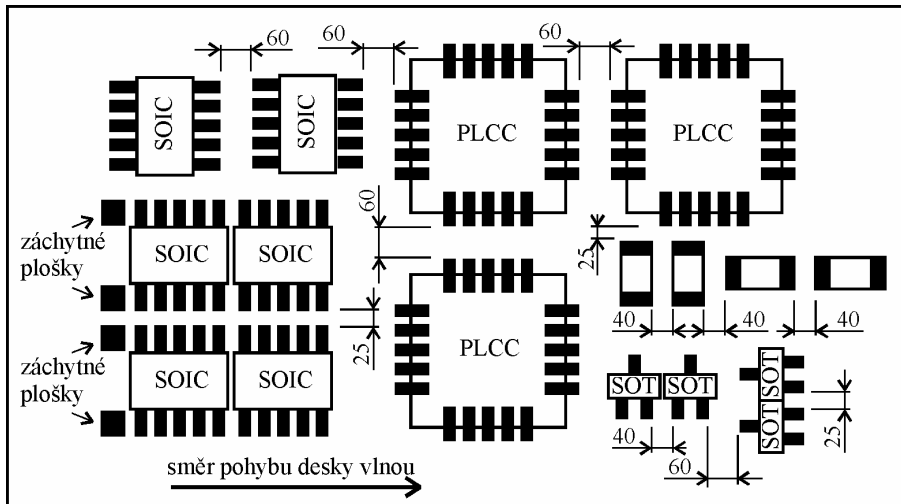


Obr.3.9: Lepící body při vytvrzování teplem a) a ultrafialovým zářením b).

Při pájení vlnou vznikají dva nežádoucí průvodní jevy: **1. stínový efekt**, **2. tvoreni zkratu**. Jsou-li na desce umístěny součástky s určitou výškou, dochází tak z pohledu směru průběhu vlny v prostoru za nimi k tvoreni takzvaných hluchých míst, tj. míst, která neprijdou do styku s dostatečným množstvím pájky. To lze částečně eliminovat právě použitím dvojité vlny. Pro úplné potlačení stínového efektu je nutné provést úpravu velikosti pájecích plošek na strane stínu (zvětšení o 1/3) a hlavně dodržet minimální vzájemné vzdálenosti součástek v závislosti na orientaci součástek vzhledem ke směru pohybu vlnou (*obrázek 3.10*). Z obrázku je zřejmé, že s výškou součástek se zvětšují také minimální vzdálenosti. Z důvodu snadného testování desek je ovšem vhodné vzdálenosti především mezi integrovanými obvody zvětšit ještě více.

Tvoreni zkratu představuje nežádoucí vodivé spojení především mezi vývody součástek s menší roztečí vývodu (pod 50 milu). V technologii povrchové montáže se jedná o nejčastější typ závady. Vyskytuje se především tam, kde jsou pájecí plošky opakovaně za sebou ve směru pohybu vlnou. Nejvyšší pravděpodobnost výskytu zkratu je u posledních vývodu vrady, tj.

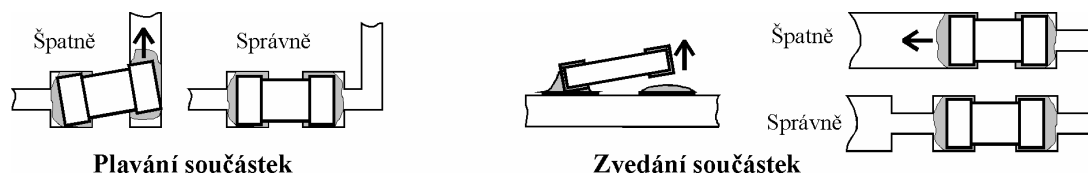
v místě, kde součástka opouští vlnu. Proto se doporučuje umístit na plošném spoji za kritickými místy přídatné plošky pro zachycení prebytné pájky (obrázek 3.10).



Obr.3.10: Minimální vzdálenosti při různé orientaci součástek [3] (údaje v milech).

3.2.2. Pájení pretavením

Pájka je předem nanesena na pájecí plošky ve formě pasty, potom se do ní osadí součástka a vzápětí se pretaví teplotou poněkud vyšší, než je bod tání pájky. V okamžiku změny skupenství pájky vyvolá její povrchové napětí posuv součástky do takové polohy, která odpovídá stavu minimální energie. Pokud jsou teplotní poměry na desce plošného spoje rovnoměrné, dochází k takzvanému vystředování součástek, což je v případě správně navržených pájecích plošek a spoju žádoucí jev. Poněvadž teplota tavené pájky nemusí být na všech pájecích ploškách v rámci jedné součástky stejná, nejsou pak stejná ani povrchová napětí jednotlivých pájených spoju. To pak může zapříčinit nežádoucí posuv součástek – **plavání** („swimming“) nebo jejich **zvednutí** („tombstoning“ nebo také „Manhattan effect“) (obrázek 3.11). Behem návrhu vedení spoju je tedy třeba dbát na symetrii odvodu tepla z pájecích plošek do spoju při pájení.



Obr.3.11: Pruvodní jevy při pájení pretavením.

3.2.3. Rucní pájení a opravy SMD

Rucní pájení SMD se používá především ke zhotovování malých sérií, prototypu a při opravách nefunkčních desek. Navíc i doma na amatérské úrovni bez drahého vybavení se dají pájet SMD součástky s roztečí vývodu menší než je například tres lidské ruky. „*Nebojme se tedy SMT*“. V případě rucního pájení je ovšem potřeba navrhnout pouzdra součástek s většími pájecími ploškami a při návrhu rozmístění součástek dodržovat větší vzdálenosti součástek.

4. Vlastnosti plošných spoju

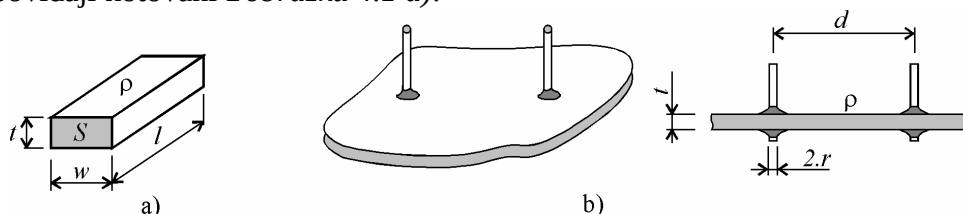
V této kapitole budou uvedeny některé důležité vlastnosti plošných spoju, potřebné pro správný návrh layoutu. Jedná se především o odpor, kapacitu, indukčnost a impedanci různých geometrických konfigurací vodičů a plošných spoju. Znalosti těchto vlastností jsou potom vstupní podmínkou pro úvahy o některých parazitních jevech na deskách plošných spoju a jejich eliminaci při návrhu (zpoždění průchodu signálu, odrazy na vedení, přeslechy...). Veškeré vztahy uvedené v následujících kapitolách jsou čerpány z literatury [5], [6], [7], [8]. Vztahy jsou ve většině případů zjednodušené, což pro potřeby tohoto skriptu postačuje, neboť cílem je ukázat, na jakých parametrech tyto vlastnosti závisí a ne vypočítat jejich přesnou hodnotu. Přesné výpočty přenecháme počítačovým simulacním programům.

4.1. Odpor

Pro odpor vodiče platí základní vztah:

$$R = r \cdot \frac{l}{S} = r \cdot \frac{l}{t \cdot w} \quad [\Omega] \quad (4.1)$$

kde r je merný elektrický odpor [Ω.m], l je délka vodiče [m] a S jeho průřez [m²]. Symboly t a w odpovídají kótování z obrázku 4.1 a).



Obr.4.1: Znárodnění odporu a) vodiče, b) vodivé plochy.

Odpor vodivé plochy mezi dvěma vodiči o průměru $2.r$ [m] vzdálených od sebe d [m] je potom (obrázek 4.1 b):

$$R = \frac{r}{p \cdot t} \cdot \ln\left(\frac{d}{r}\right) \quad [\Omega] \quad (4.2)$$

Merný elektrický odpor r je pro měď $r_{Cu}=17,8 \cdot 10^{-9}$ Ω.m, pro cín $r_{Sn}=170 \cdot 10^{-9}$ Ω.m, pro stříbro $r_{Ag}=16 \cdot 10^{-9}$ Ω.m a pro zlato $r_{Au}=24 \cdot 10^{-9}$ Ω.m.

Príklad:

Odpor 10 cm dlouhého měděného spoje o šířce $w=0,3$ mm (4. třída přesnosti) a tloušťce $t=45$ μm bude $R=0,132$ Ω. Naproti tomu odpor vodivé plochy stejné tloušťky mezi vodiči o vzdálenosti $d=10$ cm při průměru $2.r=1$ mm bude $R=0,580$ mΩ. (Tloušťka 45 μm představuje základní plátování 18 μm a zhruba 26 μm zesílení, způsobené semiaditivní technologií výroby plošného spoje – obrázek 2.3 nebo tabulka 2.1).

4.1.1. Skin efekt

Při vysokých kmitočtech bude proudová hustota blíže ke středu vodiče klesat – **skin efekt**. Definuje se hloubka vnikání d , která představuje vzdálenost od povrchu vodiče, ve které klesne proudová hustota na hodnotu $1/e$ (~ 37%). Platí zjednodušený vztah:

$$d = \sqrt{\frac{r}{p \cdot m_0 \cdot m_r \cdot f}} = K \cdot \sqrt{\frac{1}{f}} \quad [m] \quad (4.3)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua ($1,26 \cdot 10^{-6}=4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m), μ_r je relativní permeabilita (pro FR4 i měď je $\mu_r=1$), r je merný elektrický odpor [Ω.m] a f je frekvence [Hz]. Dosazením do vztahu (4.3) dostaneme pro měď $K=0,067$. Pro měděný plošný spoj o tloušťce 45 μm se tak skin efekt začne projevovat od frekvence 9 MHz.

Vztah (4.1) je tedy pro páskový vodič při vysokých kmitočtech a pro hodnoty $2 \cdot d = t$ nutné korigovat na:

$$R = r \cdot \frac{l}{d \cdot 2(w+t)} \quad [\Omega] \quad (4.4)$$

Pro odpor vodivé plochy můžeme při vysokých kmitočtech použít zjednodušený vztah

$$R = \frac{r}{2 \cdot p \cdot d} \cdot \ln\left(\frac{d}{r}\right) \quad [\Omega] \quad (4.5)$$

Předpokladem opět je, že tloušťka vodivé plochy t je větší než dvojnásobek ekvivalentní hloubky vnikání d .

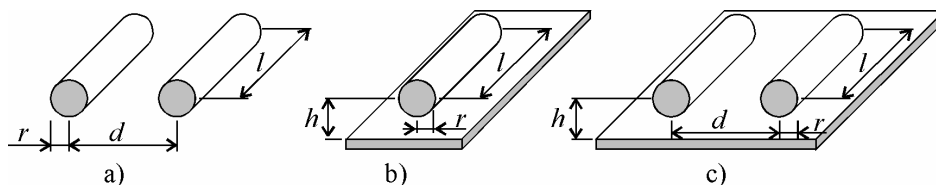
4.2. Kapacita

Kapacitu dvou deskových elektrod můžeme vypočítat ze vztahu:

$$C = e_0 \cdot e_r \cdot \frac{S}{h} \quad [F] \quad (4.6)$$

kde e_0 je permitivita vakua ($8,8 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$), e_r je relativní permitivita (pro nosné jádro plošných spoju typu FR4 je $e_r=4,7$), S je plocha desek $[\text{m}^2]$ a h jejich vzdálenost $[\text{m}]$.

Velmi důležité je znát kapacitu různých geometrických konfigurací vodičů, plošných spoju a vodivých ploch (obrázky 4.2, 4.3 a 4.4).



Obr.4.2: Kapacita vodičů kruhového průřezu.

Mezi dvěma vodiči kruhového průřezu (obrázek 4.2 a) je kapacita:

$$\frac{C}{l} = \frac{p \cdot e_0 \cdot e_r}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)} \quad [F/m] \quad (4.7)$$

Uvedený vztah platí pro $r \ll d$.

Vodič kruhového průřezu nad vodivou plochou (obrázek 4.2 b) má při $r \ll h$ kapacitu:

$$\frac{C}{l} = \frac{2 \cdot p \cdot e_0 \cdot e_r}{\ln\left(\frac{2 \cdot h}{r}\right)} \quad [F/m] \quad (4.8)$$

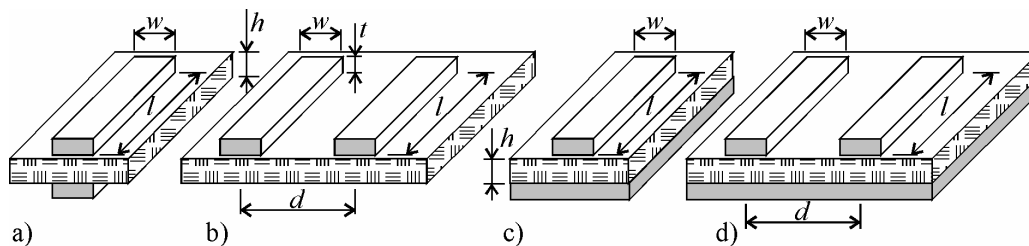
Dva vodiče kruhového průřezu nad vodivou plochou (obrázek 4.2 c) mají při $r \ll 2 \cdot h$ vzájemnou kapacitu:

$$\frac{C_m}{l} = \frac{p \cdot e_0 \cdot e_r \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{2 \cdot h}{d}\right)^2\right]}{\left[\ln\left(\frac{2 \cdot h}{r}\right)\right]^2} \quad [F/m] \quad (4.9)$$

Dva plošné vodiče nad sebou (obrázek 4.3 a) mají vztah pro kapacitu odvozený ze základní rovnice (4.6).

$$\frac{C}{l} = e_0 \cdot e_r \cdot K_{C1} \cdot \frac{w}{h} \quad [F/m] \quad (4.10)$$

Koeficient K_{C1} zohledňuje vliv nehomogenity elektrického pole na okrajích plošných spoju. $K_{C1} \approx 1 + h/2 \cdot w$ a pro $h/w \ll 1$ je $K_{C1} = 1$. Pro plošný spoj FR4 je $\epsilon_r = 4,7$.



Obr.4.3: Kapacita plošných vodičů.

Dva plošné vodice vedle sebe (obrázek 4.3 b) mají kapacitu:

$$\frac{C}{l} = \frac{p \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r(\text{eff})}}{\ln\left(\frac{p \cdot (d - w)}{w + t} + 1\right)} \quad [F / m] \quad (4.11)$$

Jelikož jsou plošné vodice na rozhraní dvou prostředí s odlišnou permitivitou ϵ_r (vzduch $\epsilon_r = 1$ a laminát $\epsilon_r = 4,7$), je ve vztahu (4.11) použita takzvaná efektivní permittivita $\epsilon_{r(\text{eff})} \approx (\epsilon_r + 1)/2$.

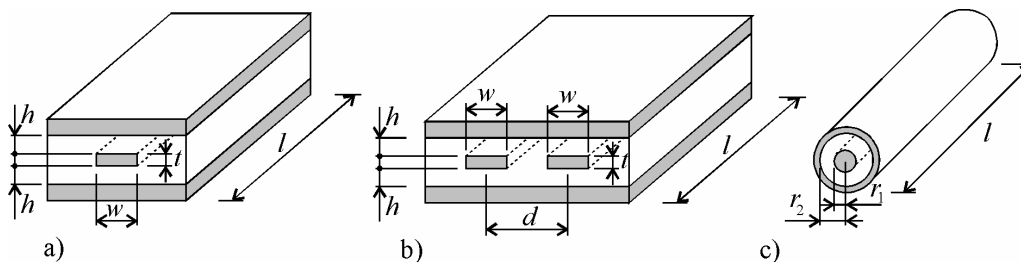
Plošný vodič nad vodivou plochou (obrázek 4.3 c) má vztah pro kapacitu odvozený opět ze základní rovnice (4.6). Koeficient K_{C2} , zohledňující vliv nehomogenity elektrického pole na okrajích plošného spoje $K_{C2} \approx 1 + h/w$ a pro $h/w \ll 1$ je $K_{C2} = 1$.

$$\frac{C}{l} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot K_{C2} \cdot \frac{w}{h} \quad [F / m] \quad (4.12)$$

Dva plošné vodice nad vodivou plochou (obrázek 4.3 d) mají vzájemnou kapacitu:

$$\frac{C_m}{l} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{4 \cdot p} \cdot K_{C2} \cdot K_{L2} \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^2 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{2 \cdot h}{d}\right)^2\right] \quad [F / m] \quad (4.13)$$

Koeficienty $K_{C2} \approx 1 + h/w$ a $K_{L2} \approx 1 + 1,5 \cdot h/w$.



Obr.4.4: Kapacita plošných vodičů ve vnitřních vrstvách a kapacita koaxiálního kabelu.

Plošný vodič mezi dvěma vodivými plochami – spoj ve vnitřní vrstvě vícevrstvé desky (obrázek 4.4 a) má kapacitu:

$$\frac{C}{l} = 2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot K_{C2} \cdot \left(\frac{w}{h}\right) \quad [F / m] \quad (4.14)$$

kde $K_{C2} \approx 1 + h/w$. Ze vztahu je videt, že kapacita bude dvojnásobkem kapacity konfigurace z obrázku 4.3 c.

Dva plošné vodice mezi dvěma vodivými plochami (obrázek 4.4 b) mají vzájemnou kapacitu ($K_{C2} \approx 1 + d/w$):

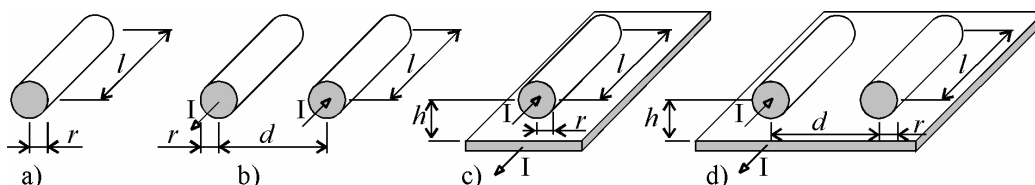
$$\frac{C_m}{l} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{p} \cdot (K_{C2})^2 \cdot \left(\frac{w}{d}\right)^2 \quad [F / m] \quad (4.15)$$

Kapacita koaxiálního kabelu (obrázek 4.4 c) je:

$$\frac{C}{l} = \frac{2 \cdot p \cdot e_0 \cdot e_r}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad [F / m] \quad (4.16)$$

4.3. Indukčnost

V následující části budou uvedeny vztahy pro indukčnosti různých geometrických konfigurací vodičů, plošných spoju a vodivých ploch (obrázky 4.5, 4.6 a 4.7). Ve vztazích jsou použity konstanty μ_0 – permeabilita vakua ($1,26 \cdot 10^{-6} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m) a μ_r – relativní permeabilita (pro FR4, vzduch i med je $\mu_r=1$).



Obr.4.5: Indukčnost vodičů kruhového průřezu.

Indukčnost přímého vodiče kruhového průřezu (obrázek 4.5 a) je:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot p} \cdot l \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot l}{r}\right) - 1 \right] \quad [H] \quad (4.17)$$

Proudová smyčka dvou vodičů kruhového průřezu z obrázku 4.5 b), tvořících dvouvodičové vedení, má indukčnost:

$$\frac{L}{l} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{p} \cdot \ln\left(\frac{d}{r}\right) \quad [H / m] \quad (4.18)$$

Dva vodiče kruhového průřezu z obrázku 4.5 b), netvořících dvouvodičové vedení (při $r < d$), má vzájemnou indukčnost:

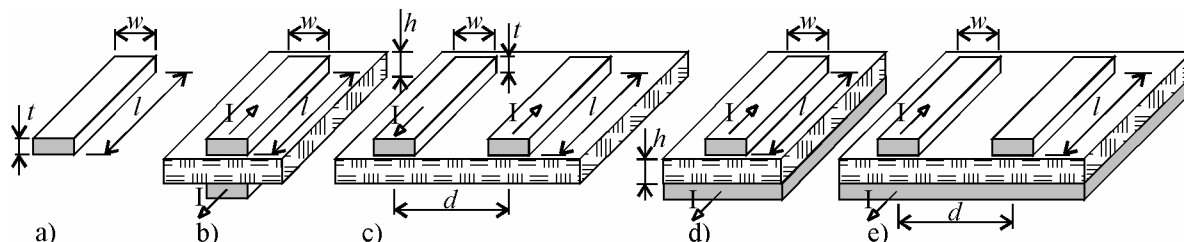
$$L_m = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot p} \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot l}{d}\right) - 1 + \frac{d}{l} \right] \quad [H] \quad (4.19)$$

Vodič kruhového průřezu nad vodivou plochou (obrázek 4.5 c) má indukčnost:

$$\frac{L}{l} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot p} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r}\right) \quad [H / m] \quad (4.20)$$

Dva vodiče nad vodivou plochou (obrázek 4.5 d) mají vzájemnou indukčnost ($r < d$):

$$\frac{L_m}{l} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{4 \cdot p} \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{2 \cdot h}{d} \right)^2 \right] \quad [H / m] \quad (4.21)$$



Obr.4.6: Indukčnost plošných vodičů.

Indukčnost přímého plošného vodiče (obrázek 4.6 a) je:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot p} \cdot l \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot l}{t + w}\right) + 0,5 + 0,2235 \cdot \frac{t + w}{l} \right] \quad [H] \quad (4.22)$$

Dva plošné vodice nad sebou dle obrázku 4.6 b) mají indukčnost:

$$\frac{L}{l} = \frac{m_0 \cdot m_r}{K_{L1}} \cdot \left(\frac{h}{w} \right) \quad [H/m] \quad (4.23)$$

kde koeficient $K_{L1} \approx 1 + 0,8 \cdot h/w$.

Dva plošné vodice vedle sebe (obrázek 4.6 c) mají indukčnost:

$$\frac{L}{l} = \frac{m_0 \cdot m_r}{p} \cdot \ln \left[\frac{p(d-w)}{w+t} + 1 \right] \quad [H/m] \quad (4.24)$$

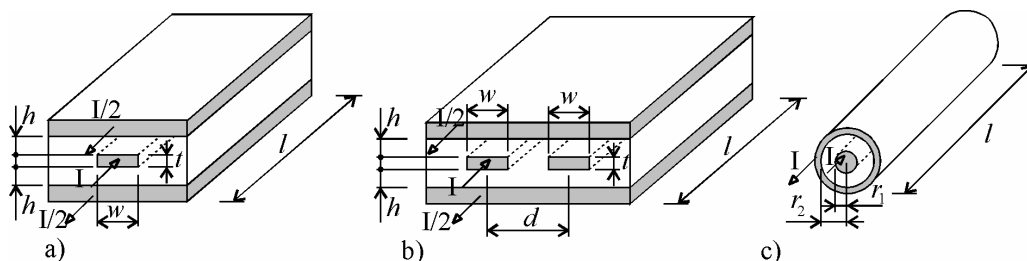
Indukčnost plošného vodice nad vodivou plochou (obrázek 4.6 d) je:

$$\frac{L}{l} = \frac{m_0 \cdot m_r}{K_{L2}} \cdot \left(\frac{h}{w} \right) \quad [H/m] \quad (4.25)$$

kde koeficient $K_{L2} \approx 1 + 1,5 \cdot h/w$.

Vzájemná indukčnost dvou vodičů nad vodivou plochou (obrázek 4.6 e) je:

$$\frac{L_m}{l} = \frac{m_0 \cdot m_r}{4 \cdot p} \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{2 \cdot h}{d} \right)^2 \right] \quad [H/m] \quad (4.26)$$



Obr.4.7: Indukčnost vodičů ve vnitřních vrstvách a indukčnost koaxiálního kabelu.

Plošný vodič mezi dvěma vodivými plochami – spoj ve vnitřní vrstvě vícevrstvé desky (obrázek 4.7 a) má indukčnost:

$$\frac{L}{l} = \frac{m_0 \cdot m_r}{2 \cdot K_{L3}} \cdot \left(\frac{h}{w} \right) \quad [H/m] \quad (4.27)$$

kde koeficient $K_{L3} \approx 1 + h/w$.

Dva plošné vodice mezi dvěma vodivými plochami (obrázek 4.7 b) mají vzájemnou indukčnost:

$$\frac{L_m}{l} = \frac{m_0 \cdot m_r}{4 \cdot p} \cdot \left(\frac{h}{d} \right)^2 \quad [H/m] \quad (4.28)$$

Indukčnost koaxiálního kabelu (obrázek 4.7 c) je:

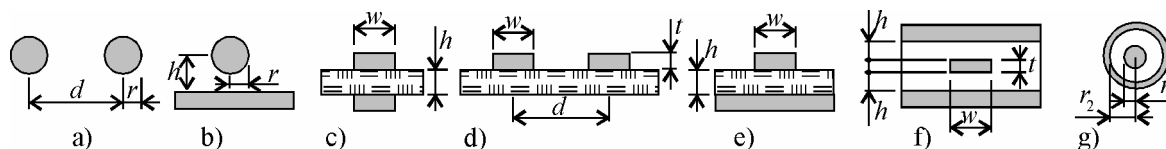
$$\frac{L}{l} = \frac{m_0 \cdot m_r}{2 \cdot p} \cdot \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad [H/m] \quad (4.29)$$

4.4. Impedance

Impedance dvouvodicového vedení Z_0 je, při zanedbání odporu vedení a vodivosti izolace mezi vodiči, dána vztahem:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L/l}{C/l}} \quad [\Omega] \quad (4.30)$$

kde za L/l a C/l je možno dosadit vztahy z předchozích kapitol. Po matematických úpravách dostaneme pro konfigurace vodičů dle obrázku 4.8 následující vztahy.



Obr.4.8: Impedance.

Impedance dvou vodičů kruhového průřezu (obrázek 4.8 a) je při $r \ll d$:

$$Z_0 = \frac{120}{\sqrt{e_r}} \cdot \ln\left(\frac{d}{r}\right) \quad [\Omega] \quad (4.31)$$

Vodič kruhového průřezu nad vodivou plochou (obrázek 4.8 b) má impedanci:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{e_r}} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r}\right) \quad [\Omega] \quad (4.32)$$

Vztah platí při $r \ll h$.

Dva plošné vodiče nad sebou (obrázek 4.8 c) mají impedanci:

$$Z_0 = \frac{120 \cdot p}{\sqrt{K_{L1} \cdot K_{C1}} \sqrt{e_r}} \cdot \left(\frac{h}{w}\right) \quad [\Omega] \quad (4.33)$$

$K_{L1} \approx 1 + 0,8 \cdot h/w$ a $K_{C1} \approx 1 + h/2 \cdot w$.

Dva plošné vodiče vedle sebe (obrázek 4.8 d) mají impedanci:

$$Z_0 = \frac{120}{\sqrt{e_{r(\text{eff})}}} \cdot \ln\left(\frac{p \cdot (d - w)}{w + t} + 1\right) \quad [\Omega] \quad (4.34)$$

kde efektivní permitivita $e_{r(\text{eff})} \gg (e_r + 1)/2$.

Plošný vodič nad vodivou plochou (obrázek 4.8 e) má impedanci:

$$Z_0 = \frac{120 \cdot p}{\sqrt{K_{L2} \cdot K_{C2}} \cdot \sqrt{e_r}} \cdot \left(\frac{h}{w}\right) \quad [\Omega] \quad (4.35)$$

kde koeficienty $K_{L2} \approx 1 + 1,5 \cdot h/w$ a $K_{C2} \approx 1 + h/w$.

Plošný vodič mezi dvěma vodivými plochami (obrázek 4.8 f) má impedanci:

$$Z_0 = \frac{60 \cdot p}{K_{C2} \cdot \sqrt{e_r}} \cdot \left(\frac{h}{w}\right) \quad [\Omega] \quad (4.36)$$

kde koeficient $K_{C2} \approx 1 + h/w$.

Impedance koaxiálního kabelu z obrázku 4.8 g) je:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{e_r}} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad [\Omega] \quad (4.37)$$

4.5. Rychlost šíření signálu

Rychlost šíření signálu ideálním homogenním bezztrátovým vedením je možné vypočítat ze vztahu:

$$v = \frac{c}{\sqrt{e_r \cdot m_r}} \quad [m/s] \quad (4.38)$$

kde $c = 3 \cdot 10^8$ m/s je rychlost světla ve vakuu.

Rychlost šíření signálu na plošném spoji určíme ze vztahu:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{l} \cdot \frac{C}{l}}} \quad [m/s] \quad (4.39)$$

a zpoždění pruchodu signálu t_{pd} na jednotku délky ($l=1$ m) je definováno jako:

$$t_{pd} = \frac{1}{v} = \sqrt{\frac{L}{l} \cdot \frac{C}{l}} \quad [s/m] \quad (4.40)$$

kde za L/l a C/l je možno dosadit vztahy z předchozích kapitol. Po matematických úpravách dostaneme dle obrázku 4.8 následující zpoždění pro různé konfigurace vodičů:

Konfigurace z obrázku 4.8 a, b, f, g:

$$t_{pd} = \sqrt{m_0 \cdot m_r \cdot e_0 \cdot e_r} = \frac{1}{c} \cdot \sqrt{e_r} = 3,33 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{e_r} \quad [s/m] \quad (4.41)$$

Dva plošné vodiče nad sebou (obrázek 4.8 c):

$$t_{pd} = 3,33 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{e_r} \cdot \sqrt{\frac{K_{C1}}{K_{L1}}} \quad [s/m] \quad (4.42)$$

$K_{C1} \approx 1 + h/2 \cdot w$ a $K_{L1} \approx 1 + 0,8 \cdot h/w$.

Dva plošné vodiče vedle sebe (obrázek 4.8 d):

$$t_{pd} = 3,33 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{e_{r(eff)}} \quad [s/m] \quad (4.43)$$

kde efektivní permitivita $e_{r(eff)} \gg (e_r + 1)/2$.

Plošný vodič nad vodivou plochou (obrázek 4.8 e):

$$t_{pd} = 3,33 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{e_r} \cdot \sqrt{\frac{K_{C2}}{K_{L2}}} \quad [s/m] \quad (4.44)$$

kde koeficienty $K_{C2} \gg 1 + h/w$ a $K_{L2} \gg 1 + 1,5 \cdot h/w$.

4.6. Vliv kapacitní zátěže

Je-li k vedení připojena zátěžovací kapacita C_d , bude zpoždění šíření signálu t'_{pd} :

$$t'_{pd} = t_{pd} \cdot \sqrt{1 + \frac{C_d / l}{C / l}} \quad [s/m] \quad (4.45)$$

kde C/l je kapacita a t_{pd} zpoždění pruchodu danou geometrickou konfigurací vedení bez kapacitní zátěže. Zátěžovací kapacitu C_d musíme prepocítat na jednotku délky. Jako kapacitní zátěž si můžeme představit vstupní kapacitu hradel číslicových integrovaných obvodů (vstupní kapacity většiny typu číslicových obvodů se pohybují okolo 5 pF).

Analogicky bude mít zátěžovací kapacita vliv i na výslednou impedanci vedení Z'_0 :

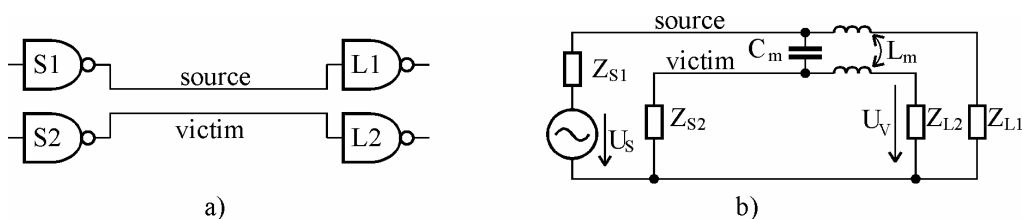
$$Z'_0 = \frac{Z_0}{\sqrt{1 + \frac{C_d / l}{C / l}}} \quad [\Omega] \quad (4.46)$$

4.7. Preslechy

Preslechy jsou jedním z nejzávažnějších problémů, které musíme při návrhu layoutu řešit. Jsou způsobeny elektrickou a magnetickou vazbou mezi vodiči na plošném spoji. Preslech definujeme jako poměr rušícího napětí U_s (source) a rušeného napětí U_v (victim) vyjádřený v decibelech:

$$X_{talk} = 20 \cdot \log \left| \frac{U_v}{U_s} \right| \quad (4.47)$$

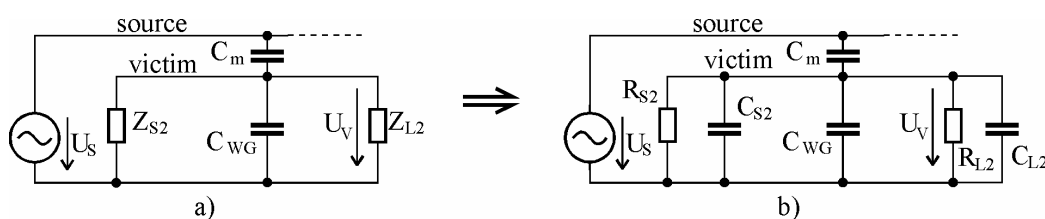
Na obrázku 4.9 je znázornen typický prípad preslechu na plošném spoji. Je zřejmé, že preslechy způsobuje vzájemná kapacitní (C_m) a induktivní vazba (L_m). U kapacitní vazby způsobují rušení zmeny napětí, u induktivní vazby potom zmeny proudu.



Obr.4.9: Typický příklad preslechu na plošném spoji.

4.7.1. Kapacitní vazba

V obrázku 4.9 zanedbáme vzájemnou indukčnost L_m . Budeme-li předpokládat, že průběh napětí U_S je v praxi to napětí, které bychom namerili na rušícím spoji, můžeme impedanci Z_{S1} nahradit zkratem a impedanci Z_{L1} rozpojit (obrázek 4.10 a). Dále v impedancích Z_{S2} a Z_{L2} zanedbáme induktivní složky. Kapacita C_{WG} je parazitní kapacita vedení (plošného spoje).



Obr.4.10: Kapacitní vazba.

Pro výsledné zjednodušené schéma (obrázek 4.10 b) můžeme odvodit vztah pro poměr napětí $|U_V/U_S|$:

$$\left| \frac{U_V}{U_S} \right| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{C_{WG} + C_{L2} + C_{S2}}{C_m}\right)^2 + \frac{1}{\omega^2 \cdot C_m^2 \cdot (R_{L2} \parallel R_{S2})^2}}} \quad (4.48)$$

Omezíme-li se na řešení kapacitní vazby vedení, v němž dochází ke **skokovým změnám napětí** (tedy například číslicové obvody), dostaneme pro náhradní zapojení obrázku 4.10 b poměr:

$$\frac{u_V}{u_S} = \frac{\pm 1}{1 + \frac{C_{WG} + C_{L2}}{C_m}} \cdot e^{-t/\tau} \quad \text{kde } \tau = (C_m + C_{WG} + C_{L2} + C_{S2}) \cdot (R_{L2} \parallel R_{S2}) \quad (4.49)$$

Kladné znaménko v citateli platí při náběžné hraně a záporné při sestupné hraně rušícího signálu U_S . Vrcholová hodnota U_{Vm} napětí na rušeném vedení závisí na poměru kapacit a je dána vztahem (4.49) pro $t=0_+$.

4.7.2. Induktivní vazba

Dva elektrické obvody se navzájem ovlivňují prostřednictvím magnetického pole, které je vyvoláno proudy, které jimi protékají. Proud I_S indukuje vzájemnou indukčností do rušeného obvodu napětí U_{Lm} . Toto napětí vyvolá v rušeném obvodu proud I_V .

$$U_{Lm} = I_V \cdot (Z_{S2} + Z_{L2}) \quad (4.50)$$

Velikost napětí U_V , které se dostává induktivní vazbou do rušeného vedení a dále do zátěže Z_{L2} , je dána rovnicí:

$$U_V = I_V \cdot Z_{L2} \quad (4.51)$$

Pro sinusový průběh proudu I_S je indukované napětí U_{Lm} dáno vztahem:

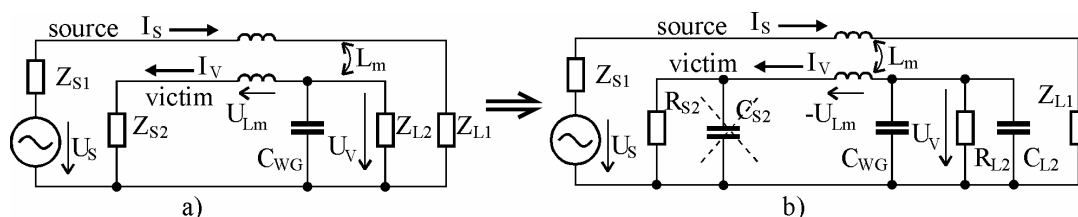
$$U_{Lm} = -j \cdot \omega \cdot L_m \cdot I_S \quad \text{a} \quad |U_{Lm}| = \omega \cdot L_m \cdot I_S \quad (4.52)$$

Pro napětí U_V dostaneme vztah:

$$|U_V| = \frac{|U_{Lm}|}{1 + \frac{Z_{S2}}{Z_{L2}}} = \frac{\omega \cdot L_m \cdot I_S}{1 + \frac{Z_{S2}}{Z_{L2}}} \quad (4.53)$$

kde za Z_{S2} a Z_{L2} dosadíme parametry dle vlastností příslušných obvodů. Pro většinu běžných obvodů stací vstupní impedanci Z_{L2} nahradit paralelní kombinací R_{L2} a C_{L2} a výstupní impedanci Z_{S2} nahradit odporem R_{S2} (vliv kondenzátoru C_{S2} je možné zanedbat, neboť $R_{S2} \ll 1/\omega C_{S2}$). Z výsledného zapojení z obrázku 4.11 b) je možné odvodit vztah pro napětí U_V :

$$|U_V| = \frac{\omega \cdot L_m \cdot I_S}{\sqrt{\left(1 + \frac{R_{S2}}{R_{L2}}\right)^2 + [\omega \cdot (C_{L2} + C_{WG}) \cdot R_{S2}]^2}} \quad (4.54)$$



Obr.4.11: Induktivní vazba.

Pri řešení induktivní vazby vedení, v němž dochází ke **skokovým změnám proudu**, dostaneme pro maximální hodnotu napětí U_V dle náhradního zapojení z obrázku 4.11 výraz:

$$u_{Lm} = -L_m \cdot \frac{di_S}{dt} \quad \text{a} \quad u_{V \max} = \frac{-L_m \cdot \frac{di_S}{dt}}{1 + \frac{Z_{S2}}{Z_{L2}}} \quad (4.55)$$

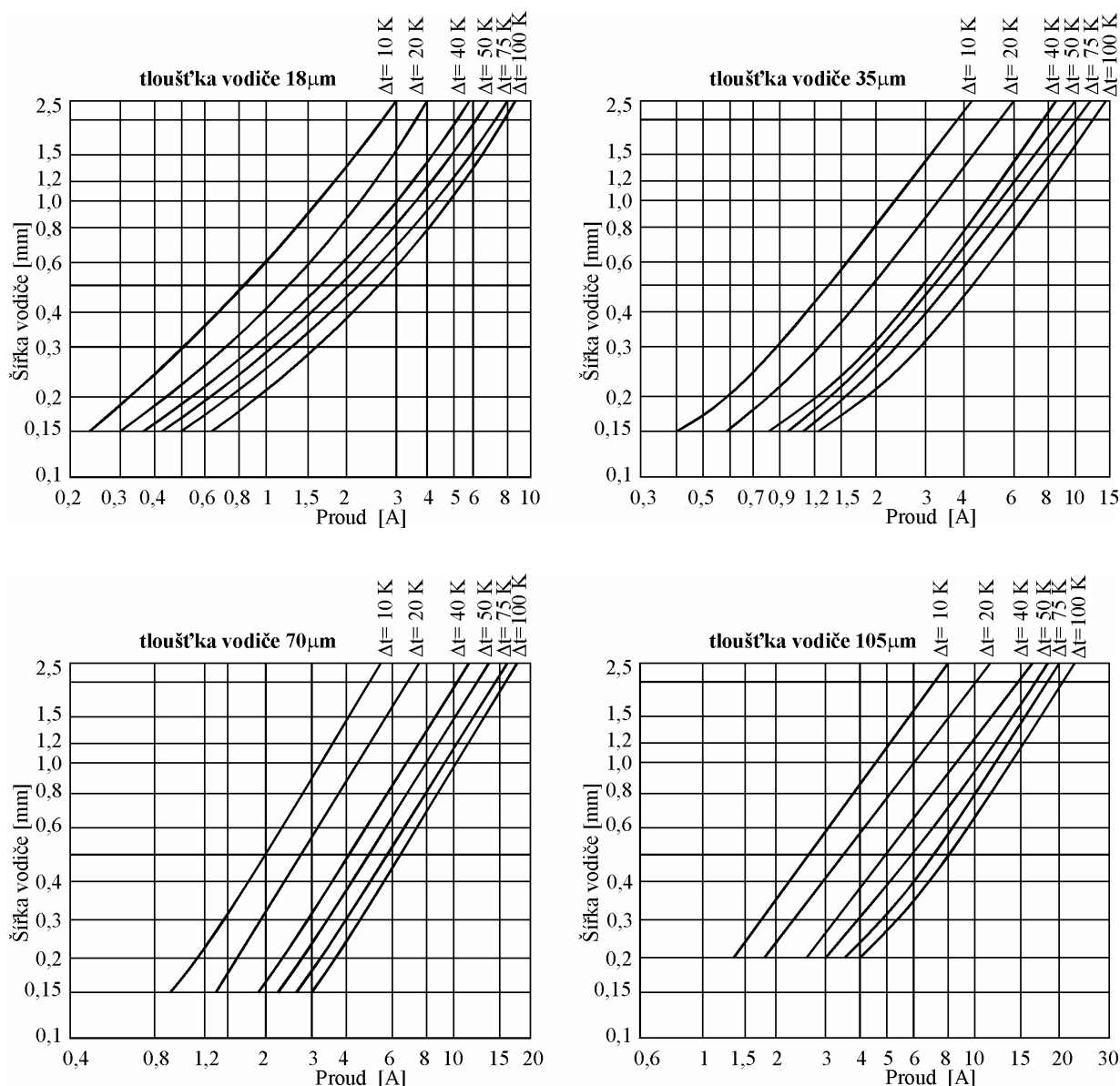
4.8. Zatížení vodivu na plošném spoji

Pri návrhu plošných spojů je nutné znát jejich proudovou a napetovou zatížitelnost. Pri vysokém **proudovém zatížení** může dojít vlivem ztrátového výkonu na odporu plošného vodice k jeho nadměrnému zahřátí a dokonce až k přetavení. **Napetová zatížitelnost** souvisí s elektrickou pevností izolačních mezer mezi vodiči na plošném spoji.

4.8.1. Proudové zatížení

Proudová zatížitelnost plošných spojů je neobvykle velká, neboť v porovnání s drátovým vodičem má plošný spoj daleko větší ochlazovací plochu. Měděný drát o průřezu $0,07 \text{ mm}^2$ se přetaví při proudu 15 A, kdežto měděná fólie plošného spoje o stejném průřezu, se přetaví až při proudu 60 A. To odpovídá proudové hustotě 850 A/mm^2 . Ovšem trvalá provozní zatížitelnost je poněkud menší. Na obrázku 4.12 jsou křivky závislosti stejnosměrné proudové

zatížitelnosti na šířce vodice pro různé zmeny teploty. Při přepočtu na proudové hustoty potom vychází trvalá provozní zatížitelnost vrádu 100A/mm^2 . Maximální provozní teplota je dána takzvaným bodem meknutí základního materiálu, který je u FR4 125°C .



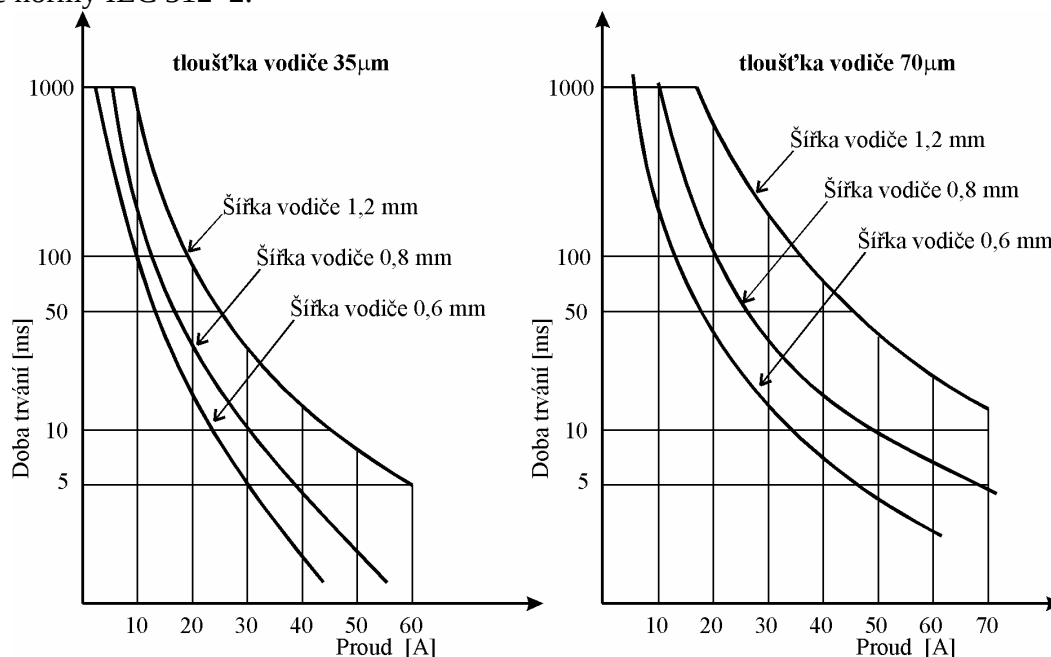
Obr.4.12: Proudová zatížitelnost plošných vodičů (nosný materiál FR4).

Stupen ohřátí plošného vodiče vlivem průchodu elektrického proudu závisí na odporu vodiče, velikosti a době průchodu proudu a možnostech odvodu tepla. Proudové přetížení má za následek nejen zhoršení adheze vodiče k základnímu materiálu účinkem vyvinutého tepla, ale také vznik značných mechanických sil vlivem průtoku proudu a tepelné dilatace. Na obrázku 4.13 jsou uvedeny informativní grafy, které mají sloužit jako pomůcka pro odhad přípustných zkratových proudů a jejich trvání, pro tři šířky a dvě tloušťky plošného vodiče.

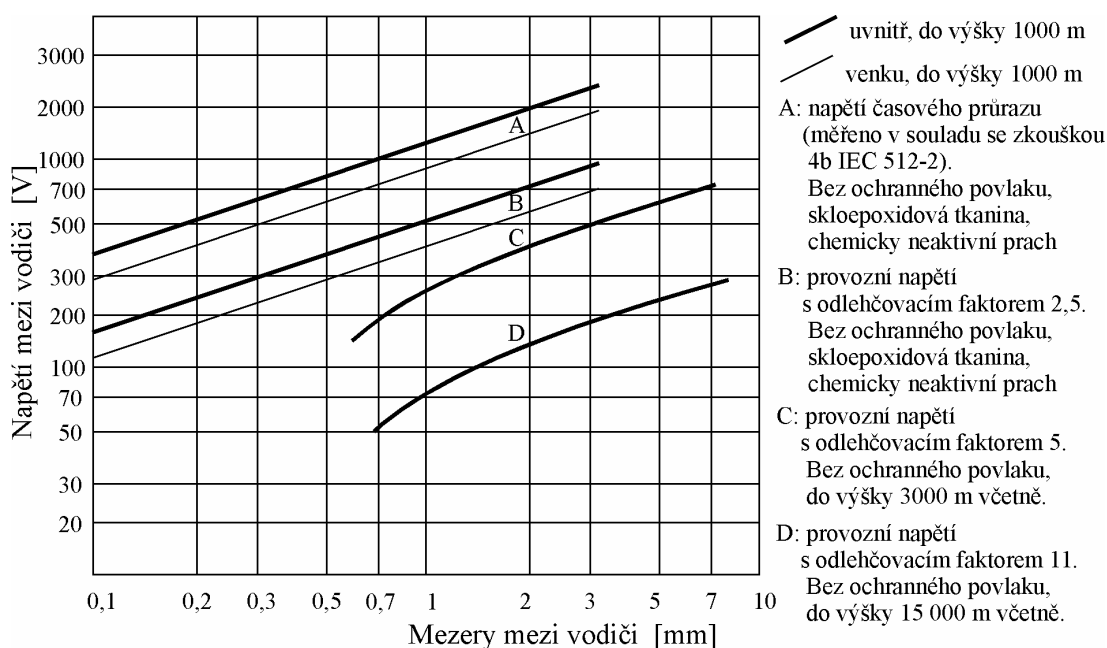
4.8.2. Napetové zatížení

Velikost přípustného napětí mezi vodiči závisí na mnoha faktorech. Jsou to například velikost mezery, druh základního materiálu, ochranný povlak (nepáživá maska), vlastnosti prostředí a v neposlední řadě provozní a předepsané bezpečnostní požadavky. Ochranný povlak přispívá k zachování vlastností desky s plošnými spoji, je-li vystavena působení nepříznivých vlivů jako je prach a vlhkost. Rozlišujeme prurazné napětí a maximální provozní napětí. Velikosti

techto napětí a způsoby jejich zkoušení jsou předmětem norem. Na *obrázku 4.14* je uvedena závislost prurazného a pracovního napětí na velikosti izolační mezery mezi plošnými vodiči podle normy IEC 512-2.



Obr.4.13: Přípustné jednorázové přetížení proudem.

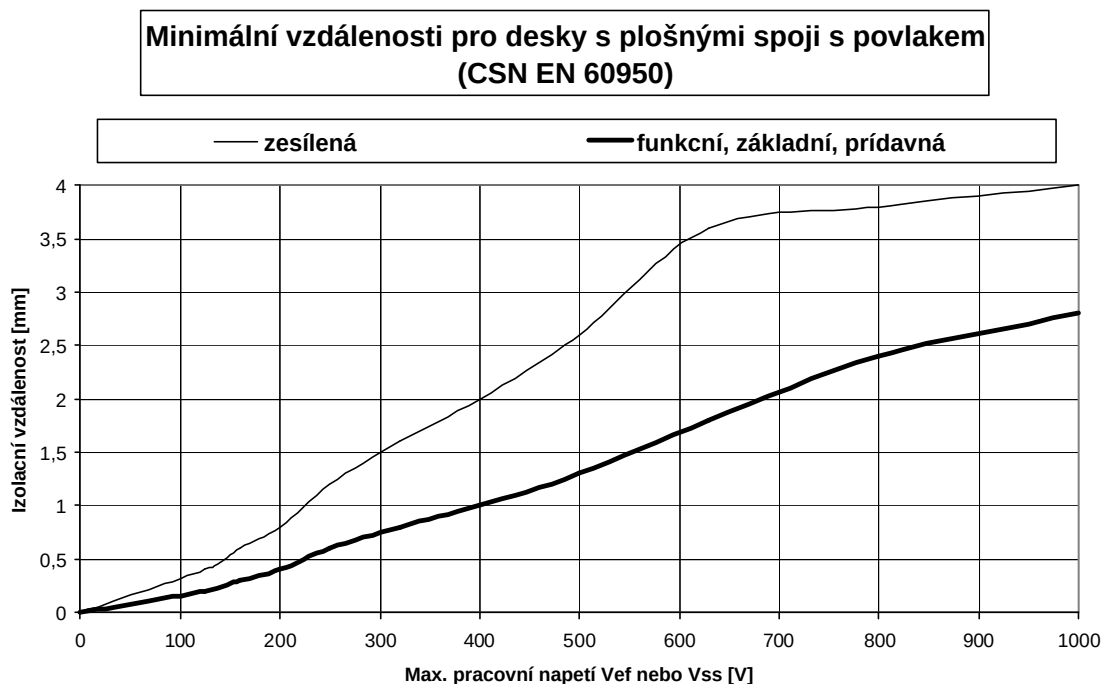


Obr.4.14: Elektrická pevnost izolačních mezer (IEC 512-2).

V České republice určují izolační vzdálenosti normy, které specifikují bezpečnostní požadavky na různé druhy zařízení – například CSN EN 60960 – „Bezpečnost zařízení informační techniky včetně elektrických kancelářských zařízení“ a CSN EN 61010-1 – „Bezpečnostní požadavky na elektrická měřicí, řídicí a laboratorní zařízení“ atd. Na *obrázku 4.15* je uveden příklad minimálních izolačních vzdáleností na plošném spoji s nepájivou maskou podle normy CSN EN 609 50, kapitola 2.9.5.

- **Základní izolace** je izolace, jejímž porušením může vzniknout nebezpečí úrazu elektrickým proudem. Tato izolace může sloužit též pro **funkční** účely = *tato hodnota je tedy určující pro návrh plošných spoju.*
- **Prídavná izolace** je nezávislá izolace, přidaná k základní izolaci, aby zajistila ochranu před úrazem elektrickým proudem v případě poruchy základní izolace.
- **Zesílená izolace** je izolace, zajišťující ochranu před úrazem elektrickým proudem ve stejné míře jako základní plus přídavná izolace.

V každém případě je vhodné se při návrhu každého zařízení seznámit s platnými normami nejen v oblasti bezpečnosti.



Obr.4.15: Příklad minimálních vzdáleností podle normy CSN EN 60950.

5. Elektromagnetická kompatibilita

Rozvoj elektroniky, zejména mikroprocesorové techniky, radikálně mění jak koncepci a způsoby použití elektronických zařízení, tak i nároky na jejich instalaci a umístění. Přenos informací, automatické zpracování a záznam dat jsou vystaveny působení rušivých vlivů, pocházejících z rozmanitých průmyslových zdrojů rušení, jako například výkonových spínačů, stykačů, relé, motorů, meničů atd. Bezvýznamné není ani rušení elektronických zařízení navzájem. Rušivý vliv prostředí, projevující se nežádoucími vazbami, interferenčním šumem, rezonancemi a prechodovými jevy, může vyvolat nejen nesprávnou funkci elektronických zařízení nebo zkrácení či znehodnocení přenosu a záznamu dat, ale v některých extrémních případech může způsobit i destrukci citlivých elektronických obvodů. Jak omezení rušení na jedné straně, tak zvyšování odolnosti elektronických systémů a zajištění jejich elektromagnetické kompatibility (neboli sloučitelnosti) na straně druhé, se stává v současné době jedním z rozhodujících faktorů při návrhu elektronických zařízení.

Pojem elektromagnetická kompatibilita (EMC) vznikl v šedesátých letech v USA a označuje novou vědeckotechnickou disciplínu, která zkoumá podmínky sloučitelnosti provozu jednotlivých systémů a cesty vedoucí k její optimalizaci. EMC a spolehlivost jsou neoddelitelné požadavky systému, který má správně fungovat v každém okamžiku a za všech okolností. Elektromagnetická pole mají vliv též na živý organismus. Vysokofrekvenční pole způsobují ohřev tkání, působí na centrální nervový systém, a dále i na srdeční, cévní, krvetvorný a imunitní soustavu.

Tematika elektromagnetické kompatibility je popisována v řadě publikací a je dokonce součástí legislativy všech vyspělých států. V roce 1998 u nás vyšla ucelená publikace, zabývající se elektromagnetickou kompatibilitou elektrotechnických systémů [11]. V tomto skriptu se budeme zabývat především souvislostmi elektromagnetické kompatibility s návrhem plošného spoje a elektronického zařízení vůbec. Nejprve ale přeci jen několik základních pojmů a vysvětlení legislativního rámce EMC v České republice.

5.1. Základní pojmy a definice

Základní pojmy a definice z oblasti EMC jsou obsaženy v mezinárodním elektrotechnickém slovníku, kapitole 161: Elektromagnetická kompatibilita – CSN IEC 50(161). Další pojmy jsou součástí jednotlivých norem, týkajících se konkrétních oborů, jako například níže a výše jevy, ochrana proti rušení, odolnost, měření apod. Většinou jsou to normy z řady CSN EN 61000 nebo CSN IEC 1000.

- **Elektromagnetická kompatibilita (EMC)** – schopnost zařízení nebo systému fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřijatelného elektromagnetického rušení cokoliv v tomto prostředí.
- **Elektromagnetické prostředí** – souhrn elektromagnetických jevů existujících v daném místě.
- **Elektromagnetické rušení** – jakýkoliv elektromagnetický jev, který **může zhoršit** provoz přístroje, zařízení nebo systému, anebo nepříznivě ovlivnit živou nebo neživou hmotu.
- **Elektromagnetická interference (EMI)** – elektromagnetické rušení, které **zhoršuje** provoz zařízení, přenosového kanálu nebo systému.
- **Mez rušení** – maximálně přípustná úroveň elektromagnetického rušení měřeného předepsaným způsobem.
- **Mez interference** – maximálně přípustné zhoršení provozu přístroje, zařízení nebo systému, způsobené elektromagnetickým rušením.
- **Odolnost (proti rušení)** – schopnost přístroje, zařízení nebo systému být v provozu bez zhoršení charakteristik za přítomnosti elektromagnetického rušení.

Obecné schéma elektromagnetického rušení se skládá ze tří základních prvků:

1. **Zdroj rušení – umělé zdroje** jsou motory, spínací, relé, stykací, menice, zářivky, obloukové pece, svářečky, číslicová technika, počítače, televizní a rozhlasové vysílání, spalovací motory, nukleární výbuch... **přírodní zdroje** jsou například slunce, atmosférické poruchy, blesky, galaktický šum...
2. **Vazební médium** – vzdušný prostor, elektrická energetická soustava (kabely, vodiče, zemnění, stínění), parazitní elektromagnetické vazby (galvanická, indukční, kapacitní, vyzarováním elektromagnetického pole).
3. **Přijímací rušení** – číslicová technika, počítače, měřicí přístroje, telekomunikační prostředky, systémy přenosu dat, automatizační prostředky, střelivo a munice, rozhlasové a televizní přijímače, živí tvorové...

5.2. Legislativní rámec v České republice

Legislativně problematiku EMC v České republice řeší především zákon Parlamentu ČR číslo 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých předpisů. Na něj navazují Nařízení vlády, kterými se stanovují a upřesňují některé pojmy a požadavky zákona 22/1997 Sb.:

- Nařízení vlády č. 168/1997 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na elektrická zařízení nízkého napětí.
- Nařízení vlády č. 169/1997 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na výrobky z hlediska jejich elektromagnetické kompatibility.
- Nařízení vlády č. 173/1997 Sb., kterým se stanoví vybrané výrobky k posuzování shody.
- Nařízení vlády č. 179/1997 Sb., kterým se stanoví grafická podoba české značky shody, její provedení a umístění na výrobku.

Všechny výše uvedené dokumenty, případně další nově vzniklé, by měl mít dobře prostudované každý návrhář elektronických obvodů či zařízení. Zároveň je vhodné dobře prostudovat normy, které souvisejí s typem navrhovaného zařízení.

Pripomínám, že toto skriptum necituje žádný z výše uvedených dokumentů ani jejich částí doslovně, cílem je pouze informovat čtenáře o nejzávažnějších myšlenkách těchto dokumentů.

5.2.1. Zákon č. 22/1997 Sb. a Nařízení vlády č. 169/1997 Sb.

Zákon č. 22/1997 Sb. (dále jen „zákon“) upravuje mimo jiné způsob stanovování technických požadavků na výrobky, které by mohly ohrozit zdraví, bezpečnost, majetek nebo přírodní prostředí a dále upravuje **práva a povinnosti osob, které uvádějí na trh tyto výrobky**.

V §8 zákona jsou vymezeny povinnosti výrobce, dovozce a distributoru při uvádění výrobku na trh. Výrobce a dovozce je povinen uvádět na trh jen bezpečné výrobky, přičemž za bezpečný se považuje výrobek, splňující požadavky příslušného technického předpisu, nebo pokud pro něj technický předpis neexistuje, buď splňující požadavky norem, anebo odpovídající stavu vědeckých a technických poznatků známých v době jeho uvedení na trh.

§12 zákona říká, že vláda svými nařízeními stanoví výrobky, které představují zvýšenou míru ohrožení a u kterých proto musí být **posouzena shoda** jejich vlastností s požadavky technických předpisů (Nařízení vlády č. 169/1997 Sb.), způsob posouzení shody u vybraných výrobků (Nařízení vlády č. 173/1997 Sb.) a dále výrobky, které musí být při uvádění na trh označeny českou značkou shody (Nařízení vlády č. 179/1997 Sb.). Vláda dále musí upravit nařízením pro jednotlivé skupiny výrobků podmínky pro jejich uvádění na trh, zahrnující postupy a úkony, které musí být splněny při posuzování shody (dále jen "postupy posuzování shody"). Jednotlivými postupy posuzování shody jsou zejména:

- a) posouzení shody za stanovených podmínek výrobcem nebo dovozcem, popřípadě akreditovanou osobou,
- b) posouzení shody vzorku (prototypu) výrobku autorizovanou osobou,

c) posouzení shody, při níž autorizovaná osoba zkouší specifické vlastnosti a namátkově kontroluje dodržení stanovených požadavků u výrobku, a tak dále. VNarízení vlády číslo 169/1997 Sb. potom vláda stanovila, že podle §12 zákona „stanovené výrobky jsou všechny přístroje, které mohou při své funkci způsobovat elektromagnetické rušení nebo jejichž funkce může být takovým rušením ovlivněna“ a dále že „přístroje musí být provedeny tak, aby elektromagnetické rušení, které způsobují, nepřesáhlo přípustnou úroveň a měly odpovídající odolnost vůči elektromagnetickému rušení“. Je tedy jasné, že posouzení shody je nutné u všech zařízení, kterými protéká elektrický proud. Z Narízení vlády 173/1997 Sb. ovšem dále vyplývá, že u většiny běžných elektronických zařízení není nutné provádět posouzení akreditovanou nebo autorizovanou osobou.

§13 zákona říká, že výše uvedené stanovené výrobky mohou výrobci nebo dovozci uvést na trh jen po posouzení shody jejich vlastností s požadavky na bezpečnost výrobku stanovenými tímto zákonem a technickými předpisy (dále jen „**posouzení shody**“) a že výrobce nebo dovozce stanoveného výrobku je povinen před uvedením výrobku na trh vydat písemné prohlášení o shodě výrobku s technickými předpisy a o dodržení stanoveného postupu posouzení shody (dále jen „**prohlášení o shodě**“). Náležitosti prohlášení o shodě stanovila vláda nařízením (opet c.169/1997 Sb.). K těmto náležitostem patří především:

1. Technická dokumentace, umožňující posouzení shody, obsahující

- obecný popis přístroje,
- koncepční návrh, výrobní výkresy a schémata,
- popisy a komentáře nutné ke srozumitelnosti,
- seznam českých technických norem a technických předpisů, které byly využity,
- výsledky konstrukčních výpočtů a provedených zkoušek...

2. Prohlášení o shodě (v českém jazyce), které má tyto náležitosti:

- identifikační údaje o výrobcu nebo dovozci (jméno a příjmení, bydliště, místo podnikání a identifikační číslo fyzické osoby, nebo obchodní jméno, sídlo a identifikační číslo právnické osoby),
- identifikační údaje o přístroji (název, typ, značka, model),
- popis a určení přístroje,
- údaj o použitém způsobu posouzení shody,
- seznam technických předpisů a norem použitých při posouzení shody,
- pokud byl vydán zkušební protokol, údaje o autorizované nebo akreditované osobě, která tento dokument vydala,
- potvrzení výrobce nebo dovozce o tom, že vlastnosti přístroje splňují základní požadavky podle tohoto nařízení, že přístroj je bezpečný a že přijal opatření, kterými zabezpečuje shodu všech přístrojů uvedených na trh s technickou dokumentací a se základními požadavky,
- datum a místo vydání prohlášení o shodě.

Doklady o použitém způsobu posouzení shody a prohlášení o shodě je výrobce nebo dovozce povinen uchovat na území České republiky do 10 let od ukončení výroby, dovozu nebo uvedení na trh.

!!! Prohlášení o shodě nezabývá výrobce a dovozce odpovědností za vady výrobku ani za škody jím způsobené !!! (§13, odst.6 zákona)

Dozor nad tím, zda bylo pro stanovené výrobky vydáno prohlášení o shodě, provádí Česká obchodní inspekce, která může uložit pokutu za nesplnění podmínek zákona až 20 milionů korun (§18 a 19 zákona).

5.2.2. Normy EMC – odolnost a vyzařování

Z předchozí kapitoly vyplývá, že všechny přístroje, které mohou při své funkci způsobovat elektromagnetické rušení nebo jejichž funkce může být takovým rušením ovlivněna musí být provedeny tak, aby elektromagnetické rušení, které způsobují, nepřesáhlo přípustnou úroveň, a měly odpovídající odolnost vůči elektromagnetickému rušení. Český normalizační institut proto vydává normy, které se týkají elektromagnetické kompatibility, rušení a odolnosti a jsou harmonizované s evropskými a mezinárodními normami. Nás budou při návrhu plošného spoje elektronického zařízení zajímat především normy, týkající se požadavků na zkoušky vyzařování a odolnosti, a dále normy, upřesňující způsob měření.

V normách popisujících **požadavky** na zkoušky nejprve musíme zjistit meze pro vyzařování a odolnost navrhovaného výrobku. Meze se budou lišit podle prostředí, ve kterém mají být výrobky používány. Poté v normách týkajících se **měření** najdeme bližší údaje o způsobu měření a konkrétním zkušebním uspořádání. Rozlišuje se prostředí:

- obytné, obchodní, lehký průmysl,
- průmyslové,
- speciální.

Norem popisujících požadavky na zkoušky a především způsoby měření a zkušební uspořádání je mnoho a normotvorný proces není ukončený. V následujících odstavcích budou uvedeny pouze některé vybrané normy.

Požadavky na zkoušky – vyzařování:

Účelem těchto norem je stanovení mezí a zkušebních metod elektrických zařízení, přístrojů a strojů, které jsou zdrojem elektromagnetického rušení a mohou způsobovat rušení v jiných přístrojích.

- CSN EN 50081–1 EMC – všeobecná norma týkající se vyzařování
Část 1: Prostory obytné, obchodní a lehkého průmyslu.
- CSN EN 50081–2 EMC – všeobecná norma týkající se vyzařování
Část 2: Průmyslové prostředí.

Požadavky na zkoušky – odolnost:

Tyto normy stanoví požadavky na odolnost elektrických a elektronických zařízení, přístrojů a strojů. Účelem je definovat požadavky na zkoušky odolnosti ve vztahu ke spojitému rušení a rušení přechodnými deji, šířenému jak po vodičích, tak i vyzařováním elektromagnetického pole, včetně elektrostatických výbojů.

- CSN EN 50082–1 EMC – všeobecná norma týkající se odolnosti
Část 1: Prostory obytné, obchodní a lehkého průmyslu.
- CSN EN 50082–2 EMC – všeobecná norma týkající se odolnosti
Část 2: Průmyslové prostředí.

Měření a zkušební uspořádání – vyzařování:

Merí se dva typy vyzařování. Jednak vyzařování rušivého elektromagnetického pole a jednak vyzařování svorkového rušivého napětí. Elektromagnetické pole se měří logaritmicko-periodickou anténou v rozsahu 30 až 1000 MHz a ve vzdálenosti 10 m/30 m nesmí překročit 30 až 47 dB(μV/m). Rušivé napětí na svorkách nesmí překročit 46 až 66 dB(μV) v kmitočtovém rozsahu 0,15 až 30 MHz. Vzdálenosti a konkrétní maximální hodnoty napětí či intenzity pole jsou dány kmitočtem, typem přístroje a prostředím, ve kterém bude využíván.

- CSN EN 55022 Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení zařízením informační techniky.

- CSN EN 55014 Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení způsobeného zařízením s elektrickým pohonem, tepelným zařízením pro domácnost a podobné účely, elektrickým náradím a podobnými elektrickými přístroji.
- CSN EN 55015 Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení způsobeného elektrickými svítilnami a podobným zařízením.
- CSN EN 55011 Meze a metody měření charakteristik elektromagnetického rušení od průmyslových, vědeckých a lékařských (PVL) zařízení

Měření a zkušební uspořádání – odolnost:

Požadavky odolnosti jsou definovány v normách rady 61000–4–X. Přehled zkoušek odolnosti je přitom uveden hned v první normě 61000–4–1, kterou doporučuji do vlastnictví každého profesionálního návrháře a konstruktéra elektronických obvodů a plošných spojů. Z dalších norem, které popisují jednotlivé zkoušky odolnosti podrobně, potom vyplynou požadavky na měřicí přípravky, kabeláž, speciální měřicí software, technickou dokumentaci a další položky, které musí návrhář nebo konstruktér testovaného zařízení dodat pro zdárný běh měření odolnosti. Na tomto místě bych chtěl upozornit, že **příprava měření EMC je součástí návrhu zařízení.**

- **CSN EN 61000-4-1 Přehled zkoušek odolnosti.** Norma poskytuje všeobecný návod a doporučení týkající se volby vhodné zkoušky a jejího použití, přičemž se bere v úvahu typ zkoušeného zařízení a jeho předpokládaného prostředí (místo použití, úroveň rušení, požadovaný stupeň odolnosti atd.). Seznam uvažovaných zkoušek odolnosti obsahuje následující zkoušky:
 - nízkofrekvenční rušení šířené vedením v rozvodných sítích nízkého napětí (harmonické, meziharmonické, krátkodobé poklesy a přerušování, nesymetrie třífázového napětí, změny kmitočtu sítě, stejnosměrná složka ve střídavé síti...),
 - přechodové jevy šířené vedením a vysokofrekvenční rušení (rázové impulzy, skupiny rychlých přechodových jevů, vysokofrekvenční rušení šířené vedením...),
 - elektrostatická rušení (ESD – elektrostatické výboje),
 - magnetická rušení (magnetická pole síťového kmitočtu, impulzní magnetická pole...),
 - elektromagnetická rušení (elektromagnetická pole šířená zářením),
 - jiné zkoušky odolnosti (napětí síťového kmitočtu v ovládacích a signálních vedeních, stejnosměrné napětí v ovládacích a signálních vedeních).
- **CSN EN 61000-4-2 Elektrostatický výboj – zkouška odolnosti.** Účelem zkoušky je ověření odolnosti zařízení proti elektrostatickým výbojům (ESD), generovaným například při dotyku zařízení s obsluhou nebo předmětem, při vzájemném dotyku osob a předmětu v blízkosti zařízení. V závislosti na okolnostech může napětí dosáhnout až 15 kV. Používají se zkušební úrovně 2 až 15 kV s náběžnou hranou do 1 ns a dobou trvání 60 ns. Zkouška se vztahuje na všechna elektrická a elektronická zařízení.
- **CSN EN 61000-4-3 Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole – zkouška odolnosti.** Účelem zkoušky je ověření odolnosti zařízení proti elektromagnetickým polím generovaným rozhlasovými vysílaci nebo jakýmkoliv jiným přístrojem vyzařujícím spojitě elektromagnetickou energii (ruční vysíláčky, mobilní telefony...). Používají se zkušební úrovně 1 až 10 V/m v kmitočtovém pásmu 80 až 1000 MHz s 80% modulací sinusovou vlnou 1 kHz.
- **CSN EN 61000-4-4 Rychlé elektrické přechodové jevy/skupiny impulzů – zkouška odolnosti.** Účelem zkoušky je ověření odolnosti zařízení proti skupinám impulzů velmi krátkých přechodných jevů generovaných například spínáním malých indukčních zatížení a odsakovaním kontaktu relé, spínáním vysokonapetových vypínačů. Zkouška se provádí na napájecích přívodech a na přívodech ovládání a signálu ke zkoušenému

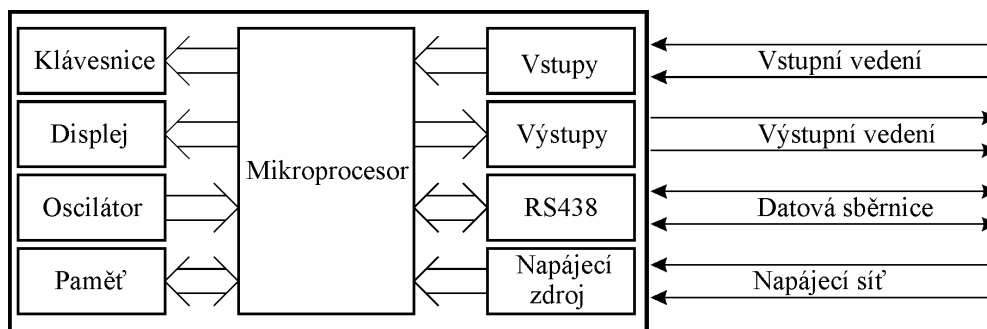
zařízení. Používají se opakující se skupiny impulzu s náběžnou hranou 5 ns, dobou trvání 50 ns, opakovací frekvencí 5 nebo 2,5 kHz, dobou trvání skupiny 15 ms a periodou skupin 300 ms. Zkušební napětí 0,25 až 4 kV se privádí na vstupy zařízení pomocí vazebního clenu o kapacitě 50 až 200 pF.

- **CSN EN 61000-4-5 Rázový impuls – zkouška odolnosti.** Účelem zkoušky je overení odolnosti zařízení proti jednosměrnému prechodovému jevu způsobenému spínacími jevy nebo poruchami v rozvodné síti, přímými nebo nepřímými údery blesku. Zkouška se provádí napetovým impulzem 0,5 až 4 kV s náběžnou hranou 1,2 μ s a dobou trvání 50 μ s nebo proudovým impulzem 0,25 až 2 kA s náběžnou hranou 8 μ s a dobou trvání 20 μ s. Jako vazební člen se používá kapacita 9 nebo 18 μ F.
- **CSN EN 61000-4-6 Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli – zkouška odolnosti.** Účelem zkoušky je overení odolnosti zařízení proti elektromagnetickým rušením šířeným vedením, jejichž zdrojem jsou úmyslné vysokofrekvenční vysílance v kmitočtovém rozsahu 9 kHz až 80 MHz. Měření se provádí napětím 1 až 10 V v rozsahu 150 kHz až 80 MHz s 80% modulací sinusovou vlnou 1 kHz. Rušivý signál je injektován do kabelu zařízení přímo přes rezistor 100 Ω .
- a tak dále.

5.3. Elektromagnetická kompatibilita a návrh plošného spoje

Nejprve si v krátkosti shrneme obsah předchozích kapitol. Uvádí-li fyzická či právnická osoba na trh elektronický výrobek, musí pro něj vystavit a uchovávat prohlášení o shodě (= shodě s normami, nařízeními či nejnovějšími vedeckotechnickými poznatky, známými v době jeho uvedení na trh). Způsob posouzení shody a požadované formální náležitosti určuje pro daný typ zařízení vláda svými nařízeními.

Prakticky to znamená, že tyto výrobky – a tedy i jejich plošné spoje – musí být odolné proti rušení a samy nesmí vyzařovat rušení nad přípustnou mez. Rozeberme si tedy, jaké faktory mají na rušení vliv. Uvažujme přitom jednoduché elektronické zařízení, obsahující mikroprocesor, paměť, oscilátor, klávesnici, displej, napájecí zdroj, optoelektronické digitální a odporové vázané analogové vstupy a tranzistorové a reléové výstupy (obrázek 5.1).



Obr.5.1: Blokové schéma zařízení.

5.3.1. Rušení

Za rušivý zdroj můžeme považovat každý elektronický obvod, kterým protéká elektrický proud nebo je zdrojem elektrického napětí. Každý takový obvod potom více či méně vyzařuje rušivou energii, kterou může rušit jednak sám sebe, jednak bezprostřední či vzdálené okolí. Za zdroj rušení musíme v našem případě (obrázek 5.1) považovat bohužel úplně všechny bloky zařízení. Prvotní snahou návrháře elektronického obvodu je v co největší míře potlačit již samotné vytváření rušivého výkonu. V dalším kroku potom zamezit jeho šíření.

Úplné **potlacení vzniku rušivého výkonu** je možné pouze tak, že zařízení vůbec nebudeme používat, což asi není naším cílem. Při návrhu elektronického zařízení tedy musíme

dodržovat návrhová pravidla, vedoucí k vytváření co nejnižších úrovní rušení již na samotném plošném spoji.

V zásadě každý rušivý zdroj šíří rušivou energii dvěma způsoby:

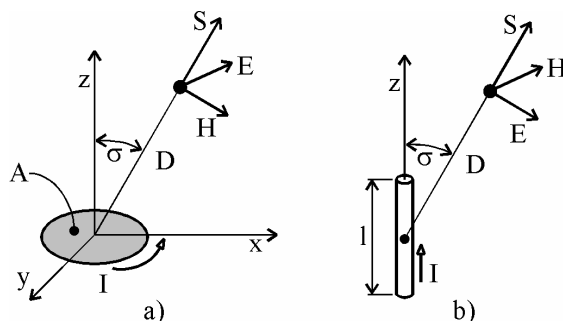
1. po vedeních ve formě rušivých proudů a jimi vyvolaných rušivých napětí na impedancích sítě a zátěže,
2. vyzařováním ve formě elektromagnetického pole.

Do vedení (rozuměj napájení, rozvodné sítě, datová kabeláž...) se rušení dostává galvanickou, indukční nebo kapacitní vazbou. V našem modelovém případě to může být přes zdroj do napájecí sítě a přes vstupní a výstupní obvody do jejich kabeláže. Tomu můžeme zabránit například vhodnou filtrací či kvalitním galvanickým oddělením.

Vyzařování elektromagnetického pole budou způsobovat všechny proudové smyčky našeho obvodu včetně těch, které tvoří vstupně-výstupní a napájecí kabeláž. Nezanedbatelnou složku pole může vyzařovat nesprávné zapojení klávesnice a displeje. K potlačení této složky šíření rušení je nutné znát alespoň základní principy vytváření a šíření elektromagnetického pole.

5.3.1.1. Elektromagnetické pole vyzařované proudovou smyčkou

Elektromagnetické pole je charakterizováno svojí elektrickou a magnetickou složkou E a H . Složky pole jsou na sebe kolmé a jejich vektorový součin $S=E \times H$ je Poytingův vektor, jehož směr odpovídá směru šíření pole (obrázek 5.2). Jeho velikost udává hustotu vyzařované energie na jednotku plochy v daném místě. Pro elektromagnetické pole, vytvořené **proudovou smyčkou** o ploše A , platí vztahy [12] (obrázek 5.2 a):



Obr.5.2: Vyzařování proudové smyčky a dipólu.

$$|H| = \frac{p \cdot I \cdot A}{l^2 \cdot D} \sqrt{1 - \left(\frac{l}{2 \cdot p \cdot D} \right)^2 + \left(\frac{l}{2 \cdot p \cdot D} \right)^4} \cdot \sin s \quad [\text{A/m}] \quad (5.1)$$

$$|E| = \frac{Z_0 \cdot p \cdot I \cdot A}{l^2 \cdot D} \sqrt{1 + \left(\frac{l}{2 \cdot p \cdot D} \right)^2} \cdot \sin s \quad [\text{V/m}] \quad (5.2)$$

kde I je proud smyčkou [A], A je plocha smyčky [m^2], l je vlnová délka [m], D je vzdálenost vyšetřovaného bodu od proudové smyčky a Z_0 je vlnová impedance prostředí (377 Ω).

V oblasti **blízkého pole** ($l/2 \cdot p \cdot D > 1$) budou intenzity E a H záviset na:

$$H \approx \frac{I \cdot A}{4 \cdot p \cdot D^3} \quad [\text{A/m}] \quad (5.3)$$

$$E \approx \frac{Z_0 \cdot I \cdot A}{2 \cdot l \cdot D^2} \quad [\text{V/m}] \quad (5.4)$$

V oblasti **vzdáleného pole** ($l/2 \cdot p \cdot D < 1$) budou intenzity E a H záviset na:

$$H \approx \frac{p \cdot I \cdot A}{l^2 \cdot D} \quad [\text{A/m}] \quad (5.5)$$

$$E \approx \frac{Z_0 \cdot p \cdot I \cdot A}{l^2 \cdot D} \quad [\text{V/m}] \quad (5.6)$$

5.3.1.2. Elektromagnetické pole vyzařované prímým vodícem

Podle [12] platí pro elektrické a magnetické pole, vytvorené prímým vodícem (obrázek 5.2 b), následující vztahy:

$$|H| = \frac{I \cdot l}{2 \cdot l \cdot D} \sqrt{1 + \left(\frac{l}{2 \cdot p \cdot D} \right)^2} \cdot \sin s \quad [\text{A/m}] \quad (5.7)$$

$$|E| = \frac{Z_0 \cdot I \cdot l}{2 \cdot l \cdot D} \sqrt{1 - \left(\frac{l}{2 \cdot p \cdot D} \right)^2 + \left(\frac{l}{2 \cdot p \cdot D} \right)^4} \cdot \sin s \quad [\text{V/m}] \quad (5.8)$$

kde I je proud protékající smyčkou [A], l je délka vodice (dipólu) [m], p je vlnová délka [m], D je vzdálenost vyšetřovaného bodu od proudové smyčky a Z_0 je vlnová impedance prostředí (377 Ω).

V oblasti **blízkého pole** ($p/2 \cdot D > 1$) budou intenzity E a H záviset na:

$$H \approx \frac{I \cdot l}{4 \cdot p \cdot D^2} \quad [\text{A/m}] \quad (5.9)$$

$$E \approx \frac{Z_0 \cdot I \cdot l \cdot l}{8 \cdot p^2 \cdot D^3} \quad [\text{V/m}] \quad (5.10)$$

V oblasti **vzdáleného pole** ($p/2 \cdot D < 1$) budou intenzity E a H záviset na:

$$H \approx \frac{I \cdot l}{2 \cdot l \cdot D} \quad [\text{A/m}] \quad (5.11)$$

$$E \approx \frac{Z_0 \cdot I \cdot l}{2 \cdot l \cdot D} \quad [\text{V/m}] \quad (5.12)$$

5.3.1.3. Kmitoťové spektrum lichobežníkového prubehu

Každý periodický signál je reprezentován v časové i kmitoťové oblasti. Prevod mezi časovou a kmitoťovou oblastí provádíme pomocí Fourierovy transformace. Na obrázku 5.3 a) vidíme vyjádření lichobežníkového prubehu v kmitoťové oblasti. Toto kmitoťové spektrum může být vyzářeno jako rušivá energie. Znamená to tedy, že z hlediska elektromagnetického rušení jsou kromě pracovní frekvence f_0 a jejích násobků velmi důležité hodnoty délek impulzu t a náběžné a sestupné hrany t_r a t_f . Práve kmitoťy, odpovídající délce impulzu a náběžné respektive sestupné hrane, představují zpravidla složku rušení s největší amplitudou. Proto je velmi důležité při návrhu elektronického obvodu pečlivě zvážit typ použitých obvodu právě z hlediska velikostí parametru t_r a t_f (tabulka 5.1). Zároveň je vhodné zvážit potřebnou délku impulzu, která je zpravidla odvozena od kmitoťu řídicího oscilátoru, nebo je možné ji upravit programově. Pro amplitudy spektrálních čar platí následující vztahy (za předpokladu $t_r = t_f$) [12]:

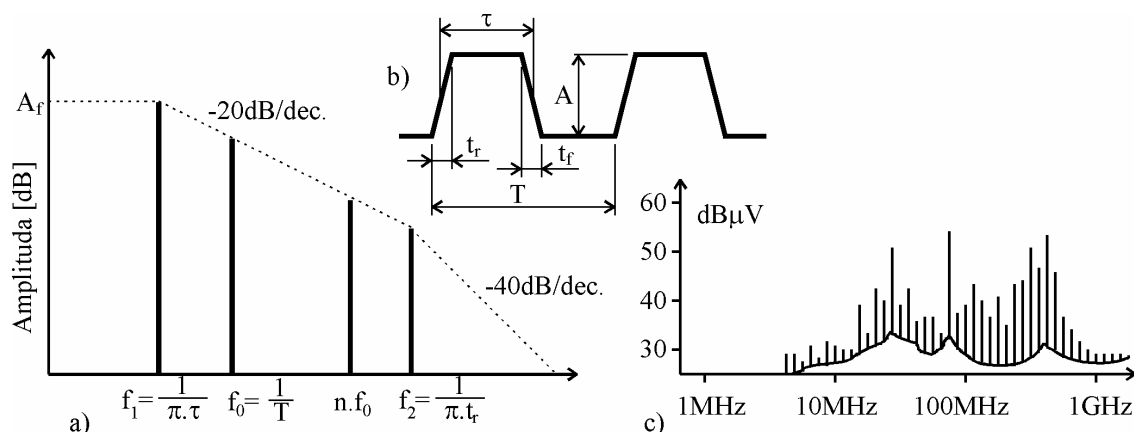
$$\text{pro } f < f_1 \quad A_f = \frac{2 \cdot A \cdot (t + t_r)}{T} \quad (5.13)$$

$$\text{pro } f_1 < f < f_2 \quad A_f = \frac{2 \cdot A}{p \cdot f \cdot T}$$

$$\text{pro } f > f_2 \quad A_f = \frac{2 \cdot A}{p^2 \cdot f^2 \cdot t_r \cdot T}$$

Na plošném spoji ovšem najednou pracuje více obvodu, jejichž frekvence, délka impulzu i náběžné a sestupné hrany nejsou totožné, a tedy jejich kmitoťové spektrum je poněkud

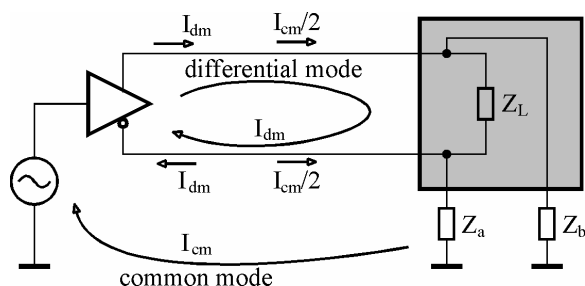
bohatší. Na *obrázku 5.3 c)* je videt praktický příklad spektra, které bylo namereno spektrálním analyzátořem s kalibrovanou anténou při měření vyzařování podle norem EMC.



Obrázek 5.3: Spektrální analýza periodického prubehu a), b) a příklad namereného spektra c).

5.3.1.4. Souhlasné a nesouhlasné rušení

Odlišnost souhlasného rušení (common mode) a nesouhlasného rušení (differential mode) je nejlépe patrná z *obrázku 5.4*. Zatímco proudová smyčka nesouhlasné složky rušení je uzavřena přes vodiče, vedoucí od zdroje k zátěži, souhlasná složka rušení má proudovou smyčku uzavřenou přes parazitní vazební impedance (zpravidla kapacity) Z_a , Z_b a společný vodič (zem).

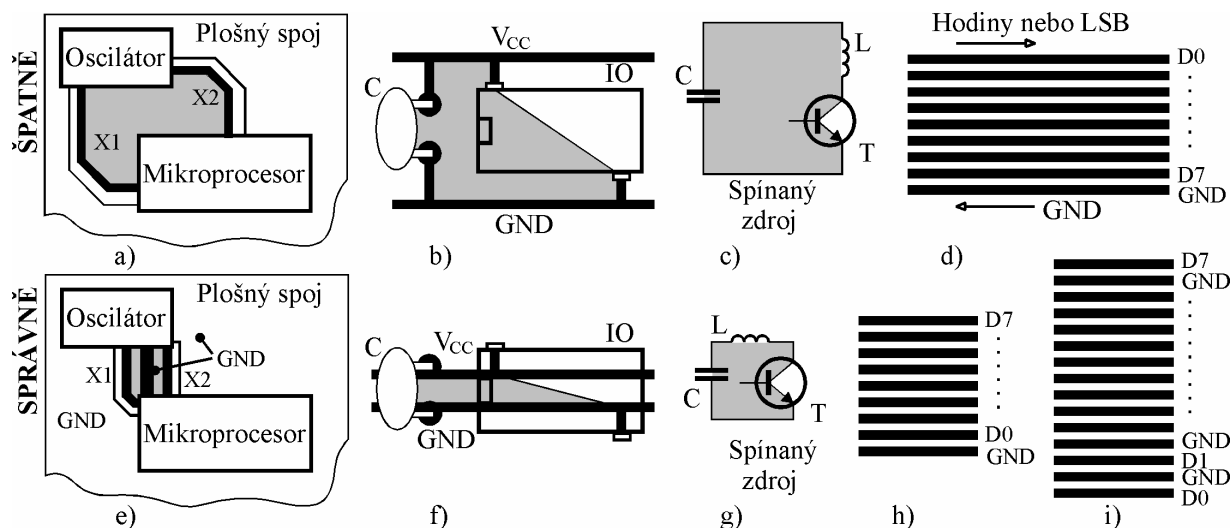


Obr.5.4: Souhlasné a nesouhlasné rušení.

5.3.2. Návrh plošných spoju z hlediska EMC

Jak již bylo receno, elektronická zařízení, a tedy i jejich plošné spoje, musí být odolné proti rušení a samy nesmí vyzařovat rušení nad přípustnou mez. Oddelit od sebe návrhová pravidla pro potlačení vyzařování a vysokou odolnost nelze. Zpravidla totiž platí, že elektronické zařízení, které „nevyzařuje“ je zároveň odolné proti rušení. **Návrh plošného spoje je z hlediska vyzařování a odolnosti treba chápat jako komplexní činnost, která začíná již na při ideovém či blokovém návrhu schématu každého zařízení.** Z obsahu předchozích kapitol lze snadno vyvodit, že mezi základní pravidla návrhu plošného spoje z hlediska elektromagnetické kompatibility patří především:

- **Minimalizace hodnot proudu** = volba vhodných typu obvodu, výběr obvodu z hlediska vstupních impedancí, správné impedance vůbec...
- **Minimalizace proudových smyček respektive délek spoju** = vhodné rozmístování součástek a vedení spoju, zemnění, rozlévaná med, správná konfigurace napájecí, vstupní i výstupní kabeláže, správné blokování napájení pomocí kondenzátoru... Zároveň dodržení tohoto pravidla zvyšuje odolnost zařízení před elektromagnetickým rušením.
- **Minimalizace kmitočtového spektra** = nepoužívat zbytečně rychlé obvody (náběžné a sestupné hrany), zbytečně rychlou datovou komunikaci...
- **Filtrace a ochrany napájení a I/O svorek** = ochrana před ESD a prechodovými jevy, omezení vyzařování do vedení...
- **Stínění** = potlačení vyzařování a zároveň zvýšení odolnosti.



Obr.5.5: Typické chyby na plošném spoji [12] a jejich řešení.

Na obrázku 5.5 a) až d) vidíme typické návrhářské chyby. Všechny čtyři konfigurace mají jednu chybu společnou, a tou je **průliš velká plocha proudové smyčky**. V případě oscilátoru a procesoru je nutné spoje X1 a X2 vést co nejblíže u sebe, případně mezi nimi umístit společný vodič (GND). Napájení VCC a GND v případě obrázku 5.5 b) je vhodné vést blízko sebe pod integrovaným obvodem, u spínaných zdroje je nutné součástky C, L a T umístit tak blízko sebe, aby plocha proudové smyčky byla minimální. Případ 5.5 d) je typickou chybou nevhodně navržené konfigurace sběrnice, a to jak na plošném spoji, tak i v případě kabeláže. Tato chyba zpravidla způsobuje, že celé zařízení nevyhoví požadavkům EMC na vyzarování !!! Vodič s nejrychlejšími změnami logických úrovní by měl bezprostředně sousedit se společným vodičem. Jelikož ovšem vyzarované kmitočtové spektrum závisí nejen na samotné frekvenci změn logických úrovní, ale i na náběžných a sestupných hranách, jsou problematické vlastně všechny vodiče. Nejlepší úpravou je proložení společných vodičů (GND) mezi každý signálový vodič, což sice téměř zdvojnásobí počet vodičů, ale z vlastních zkušeností vím, že taková konfigurace sníží úroveň vyzarování sběrnice až o 20 dB !!! Na vícevrstevném plošném spoji je možné tuto situaci vyřešit také tím, že pod všemi signálovými vodiči bude v bezprostřední sousední vrstvě rozlitá med, která bude připojená na obou koncích sběrnice ke společnému vodiči (GND).

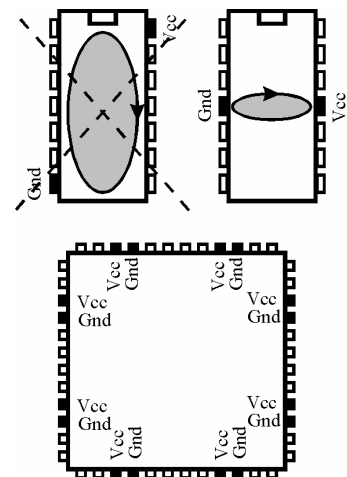
5.3.3. Součástky a EMC

Problematika elektromagneticky kompatibilních součástek je velmi široká a začíná již při návrhu layoutu cipu a jeho pouzdření. Nove vyvíjené součástky nemají například napájecí vývody v úhlopříčce pouzdra, ale proti sobě, složitější součástky musí mít napájecích vývodu více (obrázek 5.6). Z důvodu omezení vyzarování se používají oscilátory s co nejnižším kmitočtem a pomocí fázových závesů se provede jeho vynásobení až na cipu mikroprocesoru. Snahou je samozřejmě také omezení proudové impulzní spotřeby, zvýšení odolnosti proti proudové injekci, zvýšení šumové imunity atd.

Jako návrháři plošných spojů se budeme orientovat spíše aplikacně, tedy na výběr vhodných součástek z existující nabídky. Mezi obecná pravidla výběru součástek z hlediska elektromagnetické kompatibility bude patřit zejména:

- Výběr součástek s nízkými hodnotami impulzních proudů (tabulka 5.1 a obrázek 5.7) a s napájecími vývody umístěnými tak, aby umožňovaly návrh proudových smyček s co nejmenší plochou (obrázek 5.6).
- Nepoužívat zbytečně rychlé obvody (náběžné a sestupné hrany). Přehled vlastností základních logických rad je uveden v tabulce 5.1.

- Maximální využití součástek SMD – menší rozměry a tedy i příznivější parazitní vlastnosti (parazitní indukčnost přívodu se oproti součástkám se standardními přívody sníží až o 50%).
- Bezpodmínečné propojení chladic se společným vodičem (GND) u součástek s pracovním kmitočtem nad 75 MHz. Na chladic se kapacitní vazbou přenáší příslušné kmitočtové spektrum z cipu, které je v případě, že chladic není uzemněn, vyžářeno do prostoru jako elektromagnetické rušení.
- Volba vhodných blokovacích kondenzátorů, filtračních tlumivek, indukčností a ochranných prvků (bude popsáno dále).
- Výber izolacních prvků (transformátorků, optronů, DC/DC meniců...) s co nejnižšími parazitními vazebními kapacitami a indukčnostmi.

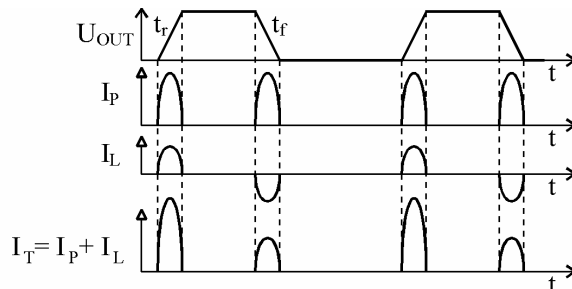
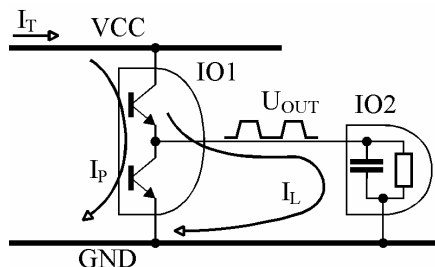


Obr.5.6: Konfigurace napájecích vodičů.

Tabulka 5.1: Přehled vlastností logických rad.

typ logiky	napetový rozkmit [V]	t_r/t_f [ns]	kritický kmitočet $1/p \cdot t_r$ [MHz]	vstupní kapacita [pF]	vstupní odpor 0/1 [Ω]	výstupní kapacita [pF]	výstupní odpor 0/1 [Ω]	šumová imunita [V]	impulzní spotřeba [mA] *)
TTL	3	10/8	40	5	10k/-**)	5	30/150	0,4	16
S	3	3/2,5	125	4	5k/100k	4	15/50	0,4	30
LS	3	10/5	65	5,5	10k/-**)	5,5	30/160	0,4	8
F, AS	3	3/2,5	125	4,5	10k/-**)	4,5	15/40	0,4	15
CMOS 5V	5	70/70	4,5	5	-**)	5	300/300	1,2	1
CMOS 12V	12	25/35	12	5	-**)	5	300/300	3,0	1
HCMOS	5	3,5/3,5	90	4	10k/-**)	4	160/160	0,7	15

*) impulzní vnitřní spotřeba 1 hradla při překlápení logické úrovně (I_P z obrázku 5.7) **) vstupní odpor je větší než 100kΩ



Obr.5.7: Impulzní spotřeba číslicových obvodů.

6. Návrhová pravidla

Nejdříve shrneme některé obecné požadavky na návrh plošných spoju, které vyplynuly z předchozích kapitol tohoto skriptu. Mezi základní požadavky či pravidla tedy patří:

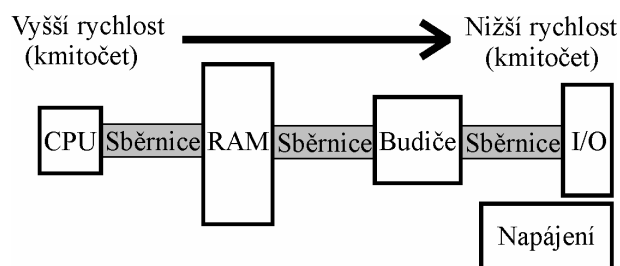
- Správná obvodová funkce.
- Vyrobitelnost a snadné osazování.
- Spolehlivost a snadná opravitelnost.
- Estetický design.
- Nízká cena.
- Shoda s platnou legislativou, tedy se zákony, předpisy a normami z oboru EMC i bezpečnosti (=izolační vzdálenosti, proudové zatížení...).

V dalších kapitolách si postupně popíšeme některá nejdůležitější konkrétní návrhová pravidla, spadající do oblasti správné obvodové funkce a EMC.

6.1. Rozmístění součástek

Vhodné rozmístění součástek je základním předpokladem pro správnou funkci zařízení. Jednotlivá pravidla pro umístění blokovacích kondenzátorů, ochranných součástek, přizpůsobovacích obvodů atd. budou obsahem samostatných kapitol. Mezi základní principy rozmístění součástek patří především [9]:

- Rozmístění součástek směrem od vyšší k nižší šířce pásma (obrázek 6.1).
- Vzájemná fyzická separace jednotlivých funkčních bloků (analogový, číslicový, oscilátor, I/O obvody, napájení atd.).
- Minimalizace vzdáleností za účelem minimalizace proudových smyček.



Obr.6.1: Rozmístění součástek.

Základní podmínkou správného rozmístění součástek a návrhu plošného spoje je především znalost obvodové funkce a pracovního režimu každé součástky v zapojení.

6.2. Razení vrstev plošného spoje

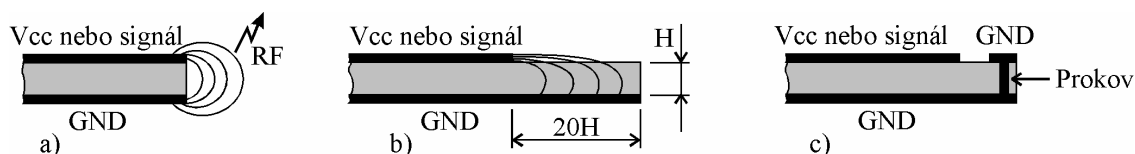
Mezi první otázky, které si musíme položit při návrhu plošného spoje, patří počet vrstev plošného spoje. **Pocet vrstev** je určen především hustotou součástek, počtem uzlu, systémem sběrnic, šumovou imunitou a systémem napájení, nutností vzájemné separace signálových spoju, impedancí... **Význam vrstev**, neboli přiřazení konkrétních signálových spoju a napájení do jednotlivých vrstev vyplývá z obecných vlastností těchto vrstev. Při návrhu vícevrstvých desek plošných spoju se používají tři druhy vrstev: Vnější signálové vrstvy (microstrip), vnitřní signálové vrstvy sousedící s vodivými plochami (stripline) a vodivé plochy určené pro nízkoimpedanční rozvod napájení (plane). Vrstvy typu „microstrip“ (obrázek 4.3 c) mají nižší parazitní kapacitu a tím i nižší přenosové zpoždění než vrstvy typu „stripline“ (obrázek 4.4 a). Díky stínění plochami medi mají spoje typu „stripline“ vyšší odolnost vůči rušení a samozřejmě nezpůsobují vyzařování. Pro razení vrstev plošného spoje platí následující pravidlo [9]:

Každá signálová vrstva musí sousedit s vodivou plochou, nejlépe se společným vodivcem.

Tabulka 6.1: Příklad správného razení vrstev pro vícevrstvé desky plošných spoju [9].

Vrstvy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	komentář
2 vrstvy	S1 G	S2 P									pouze pro návrh nenáročných a pomalých aplikací
4 vrstvy (2 spojové)	S1	G	P	S2							nízká impedance napájení kritické spoje pouze do S1
6 vrstev (4 spojové)	S1	G	S2	S3	P	S4					vysoká impedance napájení kritické spoje pouze do S1
6 vrstev (4 spojové)	S1	S2	G	P	S3	S4					nízká impedance napájení kritické spoje pouze do S2
6 vrstev (3 spojové)	S1	G	S2	P	G	S3					kritické spoje do S1, S2 i S3 S2 má vyšší přenosové zpoždění
8 vrstev (6 spojových)	S1	S2	G	S3	S4	P	S5	S6			vysoká impedance napájení kritické spoje pouze do S2 a S3
8 vrstev (4 spojové)	S1	G	S2	G	P	S3	G	S4			doporučeno pro EMC
10 vrstev (6 spojových)	S1	G	S2	S3	G	P	S4	S5	G	S6	doporučeno pro EMC S4 je citlivá na napájecí šum
S = signálová vrstva P = napájení G = společný vodič (zem)											

Tabulku 6.1 není možné považovat za dogma. Každý návrh je svým způsobem specifický a podle náročnosti obvodového zapojení, systému napájení a druhu signálu je nutné vymyslet správné razení vrstev pro každý konkrétní případ zvlášť. Jiné razení vrstev může mít deska, na které jsou pouze číslicové obvody s jedním napájením, a jiné deska, na které je kromě číslicové části také řízení třífázových motoru, analogová jednotka se symetrickým napájením a spínané zdroje.



Obr.6.2: Pravidlo 20H [9].

Velmi důležitým pravidlem je takzvané **pravidlo 20H**, které říká, že na okrajích plošného spoje musí vodivá plocha GND přesahovat napájecí plochu nebo signálové spoje o dvacetinásobek jejich vzájemné vzdálenosti (obrázek 6.2 b). Důvodem je potlačení vyzařování do boku plošného spoje (až 70%). U dvoustranného plošného spoje, jehož tloušťka je 1,5 mm by ovšem tento přesah představoval 3 cm, což je příliš mnoho a tak se používá úprava podle obrázku 6.2 c), kde celý plošný spoj se obemkne zhruba 1 mm širokým prstencem, pravidelně propojovaným pomocí prokovu do vrstvy GND.

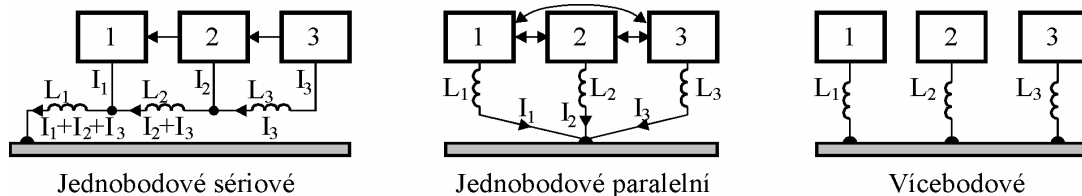
6.3. Zemnění

Nekde na prelomu fází rozmístování součástek a návrhu spoju je nutné zvolit správnou metodu zemnění. Rozlišujeme dva druhy zemnění – **jednobodové** a **vícebodové**, přičemž u jednobodového ještě rozlišujeme **sériové** a **paralelní** zapojení (obrázek 6.3). Pod bloky označenými číslicemi 1, 2 a 3 si můžeme představit jednotlivé součástky, integrované obvody nebo ucelené funkční bloky. Na základě zkušeností z přednášek připomínám, že veškeré indukčnosti na obrázku představují parazitní indukčnost vodičů a **nejsou to tedy samostatné součástky!!!** Je nutné si uvědomit, že například spoj ve 4. třídě přesnosti (šířka 0,3 mm) a o tloušťce 45 μm má parazitní indukčnost zhruba 10 nH/cm.

6.3.1. Jednobodové zemnění

Jednobodové zemnění je vhodné především pro propojování obvodu se součástkami, jejichž kmitočtové spektrum nepřesahuje 1 MHz a neprojevuje se tak příliš významně parazitní indukčnost vodičů. Je tedy vhodné pro audio aplikace, napájecí zdroje pracující se síťovým

kmitočtem, jednosměrné aplikace atd. Pro výběr mezi sériovým a paralelním zapojením musíme dobře znát princip funkce celého obvodu včetně toku jednotlivých významných proudů obvodem. Obecně lze říci, že **paralelní zapojení** se zpravidla používá pro obvody, jejichž proudy I_1 , I_2 a I_3 mají srovnatelné úrovně a všechny bloky jsou vzájemně propojeny signály stejných úrovní. **Sériové zapojení** je vhodné spíše pro zapojení, jejichž signálová cesta vede postupně cestou 3 → 2 → 1, přičemž úroveň signálu je vzestupná (například 3=předzesilovač, 2=korekce, 1=koncový stupeň) a též proudy $I_1 > I_2 > I_3$.

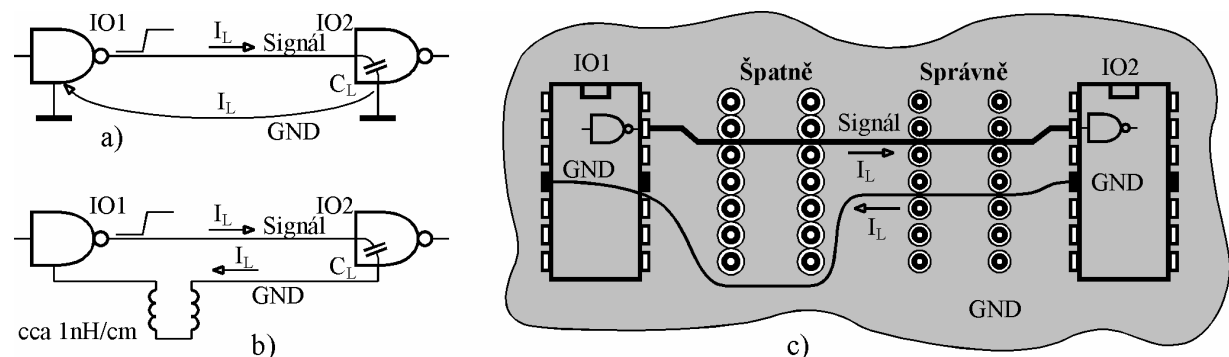


Obr.6.3: Způsoby zemnění.

6.3.2. Vícebodové zemnění

Vícebodové zemnění je vhodné pro vysokofrekvenční a tedy i číslicové obvody. Princip spočívá v tom, že každá součástka je co nejkratším přívodem propojena na nízkoimpedanční vodivou plochu – například rozlévanou med v samostatné vrstvě plošného spoje (GND).

Vícebodové zemnění někdy bývá posíleno kostřením kšasi přístroje podle **pravidla ?/20**, které říká, že zařízení s hodinovým kmitočtem nad 50 MHz by měla mít vodivou plochu GND plošného spoje pravidelně ve vzdálenostech ?/20 vodive spojovanou s kovovým šasi přístroje (vlnová délka $\lambda = 3 \cdot 10^8 / f$) [9]. Prakticky se takové posílení provádí přišroubováním plošného spoje ke kovové desce. Tato technika se používá například v osobních počítačích u základních desek typu ATX.

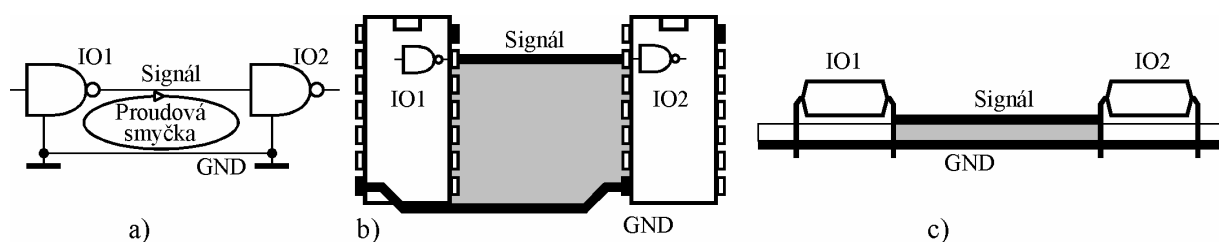


Obr.6.4: Syndrom švýcarského sýru.

Jak bylo receno, vícebodové zemnění na plošném spoji předpokládá existenci **souvislé vodivé plochy** GND alespoň v jedné samostatné vrstvě plošného spoje. Zdraznuji že **souvislé**. Při návrhu plošných spoju často dochází k chybě, která se v literatuře (například [9] a [12]) nazývá **syndrom švýcarského sýru**. Lapidárně receno – vodivá plocha GND je jak rešeto. To je způsobeno pájecími ploškami a prokovy, které procházejí celou deskou, tedy i vrstvou GND. Od nich musí GND ustoupit o určitou izolací vzdálenost. Uvažujme typickou situaci na obrázku 6.4. Mejsme dva integrované obvody, z nichž IO1 preklápí z log.0 na log.1. Díky vstupní kapacitě C_L obvodu IO2 při změně úrovně protéká obvodem impulzní nabíjecí proud I_L . Proudová smyčka se uzavírá přes GND zpět k obvodu IO1 (obrázek 6.4 a). Při realizaci na plošném spoji (obrázek 6.4 c) byly mezi IO1 a IO2 umístěny dva další obvody s průchozími otvory, z nichž jeden má příliš velké pájecí plošky (na obrázku označen „Špatně“). Ve vrstvě GND u tohoto obvodu neprochází mezi pájecími ploškami žádná med a vratná cesta proudu I_L

musí tuto oblast obejít. Tato „objížďka“ představuje podle [9] navýšení parazitní indukčnosti zhruba o 1 nH/cm. Na *obrázku 6.4 b)* je znázorněn tomu odpovídající náhradní obvod. Obdobná situace může nastat při příliš těsném umístění prokovu. Musíme tedy vždy pamatovat na to, aby mezi pájecími ploškami a prokovy bylo dostatek místa na rozlité medené plochy. A už vůbec nemluvíme o tom, že se do vodivé vrstvy GND nesmí umísťovat signálové spoje, které by souvislou vodivou plochu rozdělily na několik částí.

Použití vodivé plochy pro společný vodič (GND) přináší pro návrháře velmi významný efekt, a tím je **minimalizace proudových smyček**. Na *obrázku 6.5 b)* je znázorněna plocha smyčky pro případ, že GND je vedena pouze jako spoj a na *obrázku 6.5 c)* je vidět drastické snížení plochy smyčky při použití vodivé plochy (obrázky jsou pouze schematické, protože plochy smyček nezahrnují umístění cipu v integrovaných obvodech).



Obr.6.5: Vliv vodivé plochy na velikost proudové smyčky.

Pomocí vztahu (4.22) a (4.25) je možné prokázat **vliv vodivé plochy na snížení parazitní indukčnosti signálových spojů**. Porovnáme-li velikosti indukčností spoje o délce $l=10$ cm při šířce $w=0,3$ mm a tloušťce $t=45$ μm který není podložený vodivou plochou (vztah 4.22), a stejného vodiče, který se nachází $h=1,5$ mm nad vodivou plochou (vztah 4.25), dostaneme pro samostatný vodič indukčnost 137 nH a pro vodič nad vodivou plochou 73 nH.

Vodivá plocha snižuje parazitní indukčnost spoje o 50 %!!!

6.4. Blokování napájení

Blokování napájení pomocí kondenzátoru patří spolu se zemněním k nejdůležitějším pravidlům, kterým je třeba venovat pozornost u všech desek plošných spojů. Nutnost použití blokovacích kondenzátorů vyplývá z faktu, že „každý jiný napájecí zdroj se nachází elektricky příliš daleko od spotřebice“.

Představíme-li si například, že:

- **impulzní spotřeba** běžného hradla HCMOS je podle tabulky 5.1 15 mA po dobu 3,5 ns,
- **zpoždění pruchodu signálu** na plošném spoji (a tedy i napájecího proudu) podle vztahu (4.40) a dalších nemůže být nižší než 0,1 ns/cm,
- standardní **stabilizátor napětí** (například 7805) má reakční dobu na skokovou změnu spotřeby v řádu jednotek μs ,

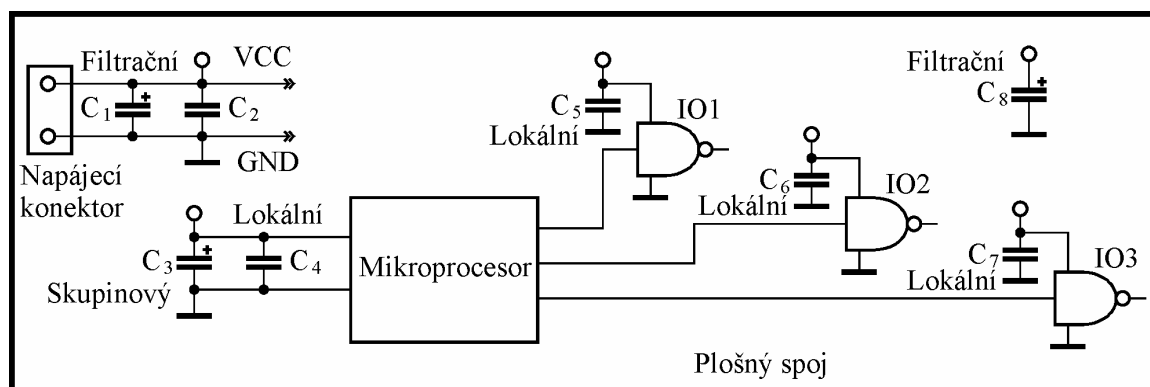
nezbývá nám nic jiného, než takovému hradlu poskytnout napájení z velmi blízkého a pohotového zdroje, kterým nemůže být nic jiného, než **blokovací kondenzátor**.

Navíc napájení po elektricky dlouhých vodičích vytváří na jejich parazitních indukčnostech nežádoucí úbytky napětí, způsobuje nadměrné vyzařování elektromagnetické energie díky velkým plochám smyček a tím vším drasticky snižuje odolnost zařízení. Velmi často dokonce zařízení bez blokovacích kondenzátorů není schopné správné funkce. To se projevuje nepřípustným zvlněním napájecího napětí, přílišnými úbytky napětí na společném vodiči (toto napětí se scítá s užitečným signálem!), hazardními stavy číslicových obvodů, nadměrným šumem a sklonem ke kmitání u analogových obvodů, zpětným vyzařováním do napájecích vodičů...

Co do funkce rozlišujeme tři druhy blokovacích kondenzátorů:

1. **Filtrací** (bypassing) – slouží jako širokopásmový filtr pro napájení celé desky nebo její části, eliminuje vliv indukčnosti přívodu od napájecího zdroje, kontaktních přechodových odporů napájecích konektoru atd.
2. **Lokální** (decoupling) – slouží jako lokální zdroj energie pro součástky a redukuje impulzní proudy, které by jinak protékaly celou deskou (například impulzní proud I_P z obrázku 5.7).
3. **Skupinový** (bulk) – slouží jako zdroj energie pro současně nabíjení několika kapacitních zátěží (například impulzní proud I_L z obrázku 5.7).

Na modelové desce, napájené ze vzdáleného adaptéru a obsahující mikroprocesor s podpurnými logickými obvody, budeme tedy mít konfiguraci všech tří druhů blokovacích kondenzátorů (obrázek 6.6). Upozorňuji, že hodnoty kapacit, uvedené v dalším popisu jsou pouze orientační.



Obr.6.6: Příklad blokování.

Ad 1: Vstupní konektor musí být opatřen **filtracním kondenzátorem**. Zpravidla se používá elektrolytický kondenzátor, ke kterému se připojuje paralelně keramický kondenzátor (C_1, C_2). Elektrolytický kondenzátor má vysokou kapacitu, ale špatné vysokofrekvenční vlastnosti, takže se s keramickým kondenzátorem vhodně doplňují. Tyto kondenzátory musí být umístěny na cestě mezi napájecím konektorem a ostatními obvody. Další filtrační kondenzátor se může umístit na nejvzdálenějším místě od napájecích svorek (C_8). Zamezí se tím toku impulzních proudů přes celou desku. Kapacity kondenzátorů se pohybují v rádech C_1 a $C_8 \sim 10..1000 \mu F$, přičemž $C_1 > C_8$, keramický kondenzátor $C_2 \sim 0,01..0,1 \mu F$.

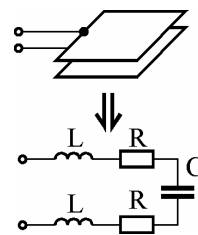
Ad 2: Každý integrovaný obvod nebo obecně každé dílčí zapojení, které se vyznačuje impulzní spotřebou (tranzistor + relátko, klopný obvod, zesilovací stupeň...) musí mít svůj **lokální kondenzátor** (C_4 až C_7). Na tyto kondenzátory jsou kladeny náročné požadavky co do vysokofrekvenčních vlastností. Je nutné je umístit co nejblíže k materské součástce či obvodu a zároveň při návrhu spoju dodržet minimální plochu proudové smyčky mezi tímto kondenzátorem a napájecími svorkami obvodu. Hodnoty jejich kapacity se pohybují v řádu $100 pF .. 0,1 \mu F$.

Upozornění: Použití vývodového kondenzátoru $100 nF$ (M1) pro blokování číslicových obvodu může být **HRUBÁ NÁVRHÁRSKÁ CHYBA** (bude popsáno dále).

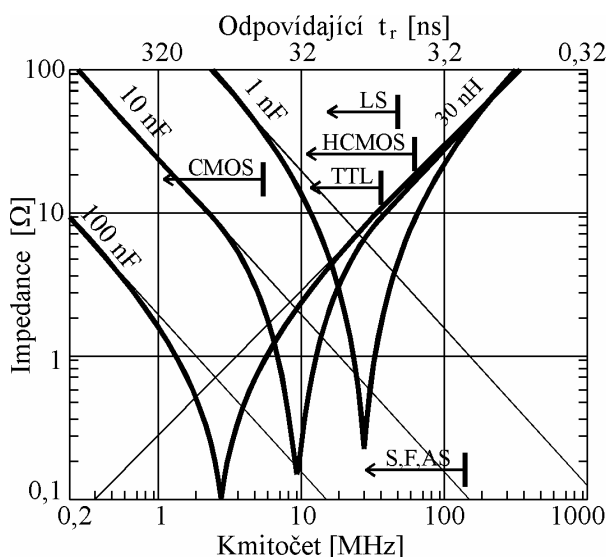
Ad 3: Mikroprocesor navíc bude mít jeden **skupinový kondenzátor** (C_3), neboť ze svých výstupu řídí najednou několik dalších hradel. Zpravidla se pro tyto účely používají elektrolytické tantalové kondenzátory s kapacitou v řádu $1..10 \mu F$. Pro umístění skupinového kondenzátoru platí stejná pravidla jako pro lokální kondenzátor.

6.4.1. Reálný kondenzátor

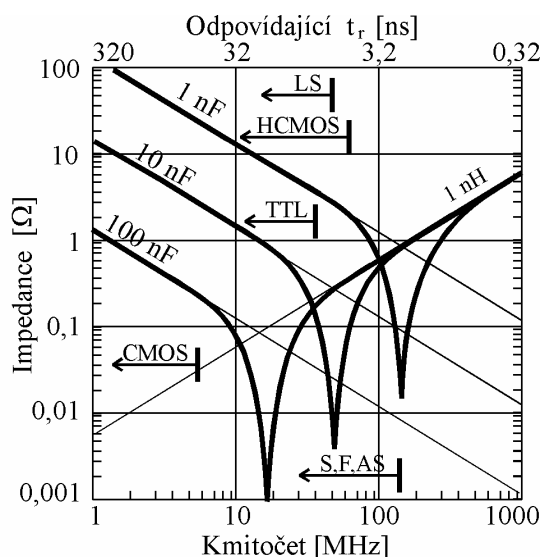
Náhradní obvod reálného kondenzátoru se neskládá pouze z kapacity, nýbrž má navíc svoji parazitní indukčnost a odpor (prívodu). Znamená to tedy, že se jedná o LCR obvod, který bude mít **vlastní rezonanční kmitocet** (self resonance) $f_r = 1/\sqrt{LC}$. Pro kmitočty pod vlastní rezonancí bude v impedanci kondenzátoru převládat kapacitní složka a pro kmitočty nad vlastní rezonancí potom induktivní složka. Při výberu vhodných blokovacích kondenzátoru tedy musíme sledovat právě katalogový údaj vlastní rezonance a používat vždy kondenzátory, jejichž vlastní rezonance je vyšší než nejvyšší kmitocet na plošném spoji, přičemž rozhodující není délka trvání impulsu či jeho perioda, nýbrž jejich násobky a dále kmitočty, odpovídající náběžným ($1/pt_r$) a sestupným hranám ($1/pt_f$).



Obr.6.7: Reálný kondenzátor.



Keramické kondenzátory s vývody 0,25"



Keramické kondenzátory SMD 0805

Obr.6.8: Vlastní rezonanční kmitocet a oblast použití jako lokální kondenzátor [10].

Na obrázku 6.8 je znázorněna kmitočtová závislost impedance (minimum=vlastní rezonanční kmitocet) pro typické lokální blokovací kondenzátory v provedení s vývody a SMD. Z obrázku je vidět, že vývodový keramický kondenzátor 100 nF má rezonanční kmitocet tak nízký, že jej nelze použít ani k blokování nejpomalejšího typu číslicového obvodu (CMOS). Uvedené grafy ovšem neuvažují parazitní indukčnost plošných spoju mezi příslušnou součástkou a jejím kondenzátorem, která rezonanční kmitocet ještě dále sníží.

6.4.2. Plošný spoj jako blokovací kondenzátor

Jestliže budeme potřebovat zároveň vysokou hodnotu kapacity i rezonančního kmitočtu, můžeme spojit paralelně několik kondenzátoru. Jako blokovací kondenzátor můžeme použít též vícevrstvý plošný spoj, budou-li v jeho vnitřních vrstvách vedle sebe umístěny vodivé plochy napájení a společného vodice (GND). Kapacita takového kondenzátoru se dá vypočítat podle vztahu (4.6) a pohybuje se v řádu jednotek nF na 1 dm². Taková velikost kapacity nebývá dostatečná, a proto se používá jako doplněk ke kondenzátorům za účelem snížení impedance díky svému velmi vysokému rezonančnímu kmitočtu, který se podle [10] pro materiál FR4 pohybuje v rozmezí 200–400 MHz. Pozor na dodržení pravidla 20-H (obrázek 6.2)!!!

Použití plošného spoje jako „rozprostraného“ lokálního blokovacího kondenzátoru řeší najednou tyto problémy návrhu:

- Minimalizace plochy proudové smyčky napájení a ostatních spoju.
- Vysoký rezonanční kmitočet blokovacích kondenzátoru.
- Nízká parazitní indukčnost přívodu napájení mezi integrovaným obvodem a jeho lokálním kondenzátorem.

6.4.3. Návrh lokálního blokovacího kondenzátoru.

Jak již bylo uvedeno, lokální kondenzátor je určen k pokrytí impulzní spotřeby obvodu. Jeho kapacitu je možné vypočítat z jednoduchého vztahu:

$$C = \frac{I}{\frac{\Delta U}{\Delta t}} \quad [F] \quad (6.1)$$

kde I představuje impulzní proudovou spotřebu obvodu I_P (obrázek 5.7 a tabulka 5.1),
 ΔU je změna napětí, kterou připustíme po dobu proudového impulsu I_P (zpravidla maximálně 20% šumové imunity obvodu),
 Δt je doba trvání proudového impulsu (odpovídá náběžné nebo sestupné hrane t_r a t_f).

Tabulka 6.1: Kapacita lokálního kondenzátoru na jedno hradlo vybraných logických rad.

typ logiky	impulzní spotřeba [mA]	doba preklápení [ns]	šumová imunita [V]	kapacita na 1 hradlo [nF]
TTL	16	8	0,4	1,6
S	30	2,5	0,4	0,9
LS	8	5	0,4	0,5
F, AS	15	2,5	0,4	0,5
CMOS 5V	1	70	1,2	0,3
CMOS 12V	1	25	3,0	0,1
HCMOS	15	3,5	0,7	0,4

Renomovaní výrobci v katalogových nebo aplikacních listech svých součástek uvádějí doporučený způsob blokování napájení (včetně velikostí kapacit kondenzátoru).

6.4.4. Návrh skupinového blokovacího kondenzátoru

Skupinový blokovací kondenzátor je, podobně jako lokální kondenzátor určen k pokrytí impulzní spotřeby. Tentokrát se ovšem jedná o proudové impulzy, které vznikají při současném prebívání několika vstupních kapacit. Proto se tyto kondenzátory navrhují pouze k těm součástkám, které řídí mnoho jiných obvodů (například k mikroprocesorům). Hodnotu jejich kapacity je možné určit opět ze vztahu (6.1) s tím rozdílem, že za I musíme dosadit proud, potřebný pro nabití vstupních kapacit (I_L z obrázku 5.7). Tento proud můžeme orientačně zjistit ze vztahu:

$$I_L = C_L \frac{\Delta U_{CL}}{\Delta t} \quad [A] \quad (6.2)$$

kde C_L je celková zátěžovací kapacita, která se sestává jednak ze vstupních kapacit řízených obvodů a jednak z parazitní kapacity plošného spoje,
 ΔU_{CL} je napetový rozkmit na kapacitní zátěži C_L (zpravidla se za ΔU_{CL} dosazuje napájecí napětí),
 Δt je doba preklápení (náběžná nebo sestupná hrana t_r a t_f).

6.4.5. Návrh filtračního kondenzátoru

Filtrační kondenzátor slouží jako zdroj energie, eliminující vliv impedance přívodu od napájecího zdroje k plošnému spoji (indukčnost, přechodový odpor kontaktu...). Tím omezuje impulzní proudy, které by jinak tekly napájecími přívody a způsobovaly by neakceptovatelné úbytky napětí a dále nepřipustné vyzařování. Presné určení velikosti kapacity filtračního kondenzátoru je dosti obtížné a zpravidla je nutné se spolehnout na zkušenosti návrháře.

1. Základní problém je **určení velikosti proudového odběru** ? I_{CC} . Zpravidla se postupuje tak, že se sečtou všechny proudy typu I_p a I_L , tedy odhadne se vlastní impulzní spotřeba všech obvodu na plošném spoji a přičte se k nim proud, tekoucí do obvodu mimo navrhovaný plošný spoj.
2. Dále je nutné určit **přípustné zvlnění (šum) napájení** ? U_{CC} , které u číslicových obvodu představuje část šumové imunity (například 20%), u analogových obvodu souvisí s přípustným šumem na vstupu resp. výstupu...
3. Vypočteme maximální přípustnou velikost **impedance napájecího systému** jako poměr akceptovatelného zvlnění napájení a celkového odběru proudu:

$$Z_{PWR} = \frac{\Delta U_{CC}}{\Delta I_{CC}} \quad [\Omega] \quad (6.3)$$

4. Provedeme-li zjednodušující úvahu, že tato impedance se skládá pouze z parazitní indukčnosti přívodu napájení L_{PSW} a **kapacity filtračního kondenzátoru** C_{PWR} , můžeme napsat:

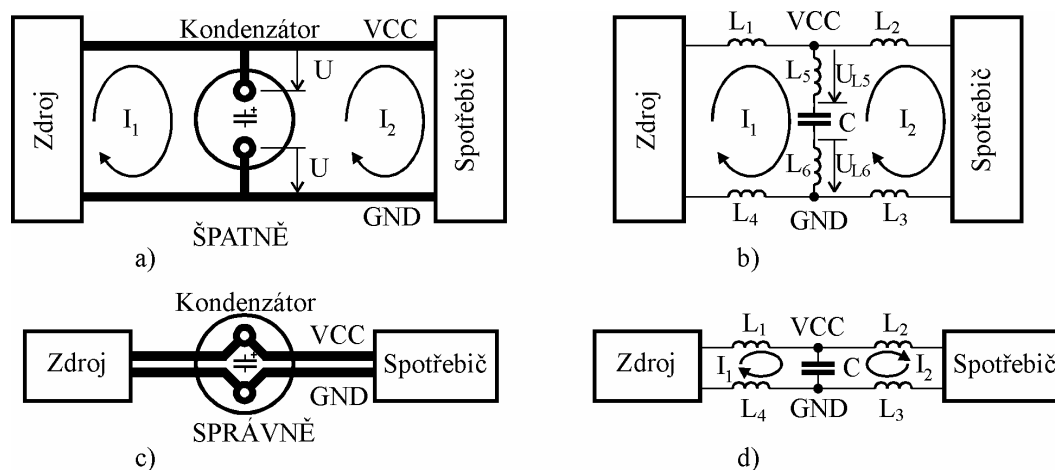
$$Z_{PWR} = \sqrt{\frac{L_{PSW}}{C_{PWR}}} \quad \text{tedy} \quad C_{PWR} = \frac{L_{PSW}}{Z_{PWR}^2} \quad [F] \quad (6.4)$$

Pro výpočet indukčnosti přívodu napájení mezi zdrojem a plošným spojem L_{PSW} můžeme využít například vztahy (4.17) až (4.29). Ve většině běžných případů se tato indukčnost pohybuje v řádu 10 nH/cm.

Výše uvedená konstrukce výpočtu slouží pouze pro určení řádu hodnoty kapacity. Takto vypočtenou hodnotu kapacity C_{PWR} vynásobíme koeficientem „zkušenosti návrháře“, který zpravidla nebývá menší než 10.

U citlivých a přesných zařízení je nutné velikost filtrační kapacity, případně všech typu kapacit, potvrdit zkušebními měřeními zvlnění napájení a overením správné funkce zařízení.

6.4.6. Umístění blokovacích kondenzátorů na plošném spoji



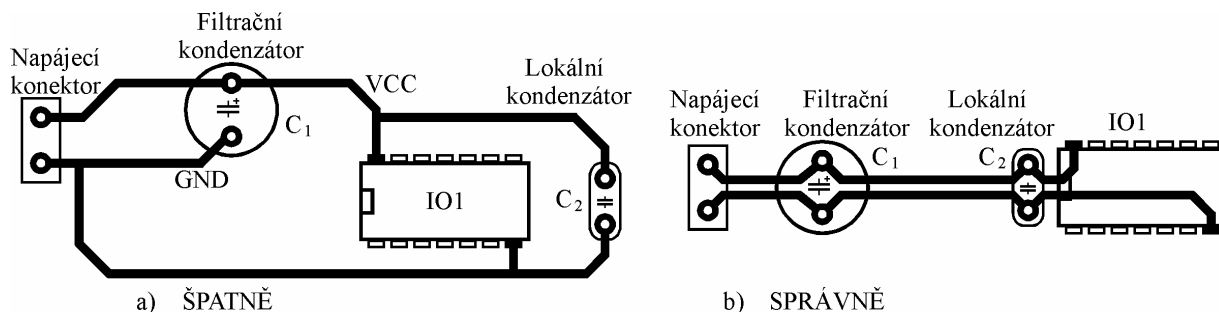
Obr.6.9: Typické problémy umístění blokovacích kondenzátorů.

Pro všechny typy blokovacích kondenzátorů platí srovnatelná pravidla pro jejich správné umístění a s tím související vedení spoju (obrázek 6.9 a 6.10).

- Kondenzátor musí být umístěn vždy na cestě mezi zdrojem a spotřebicem.
- Veškeré spoje musí být navrženy tak, aby plocha proudových smyček byla co nejmenší.
- Minimalizace impedancí spoju (především parazitních indukčností L_1 až L_4) obrázek 6.9 c) a d) = co nejkratší spoje, použití vodivých ploch.

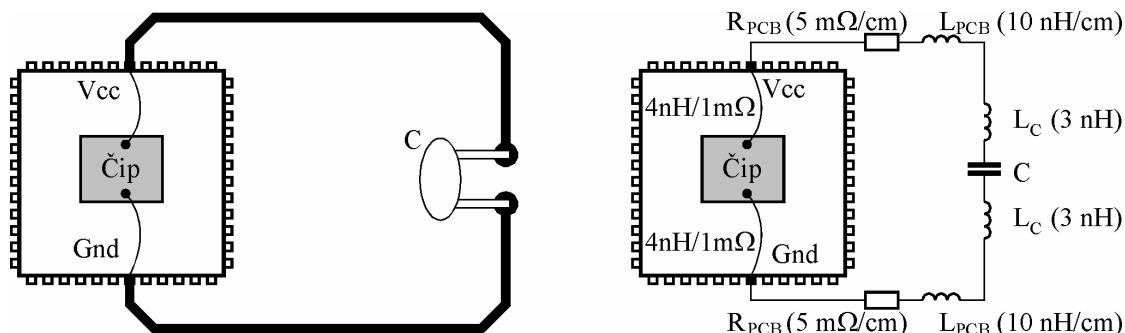
- Proudové smyčky zdroj – kondenzátor (I_1) a kondenzátor – spotřebic (I_2) by mely mít minimální společnou spojovou dráhu. Chybně navržené vedení spoju na *obrázku 6.9 a)* způsobí rušivé úbytky napětí na parazitních indukčnostech L_5 a L_6 .

Na *obrázku 6.10 a)* jsou vidět nejfrekventovanější chyby při návrhu blokování. Především je zde chybně umístěný lokální kondenzátor C_2 , všechny plochy proudových smyček jsou extrémně velké a spoj GND má chybně vedený spoj mezi C_1 a $IO1$.



Obr.6.10: Nejčastější chyby při návrhu blokování.

Vysvětlíme si ještě na příkladu vliv parazitních indukostí a odporů v situaci chybně navržené kombinace lokálního kondenzátoru a integrovaného obvodu (*obrázek 6.11*). Blokovací kondenzátor C umístíme zhruba 5 cm od integrovaného obvodu, čímž vznikne celkem cca 15 cm dlouhý spoj. Takové konfiguraci bude odpovídat náhradní schéma s celkovou parazitní indukostí spoju 150 nH a odporem 75 mΩ. K tomu je nutné dále připočítat parazitní vlastnosti kontaktních přívodu na čip ($2 \times 4\text{ nH}/1\text{ m}\Omega$) a parazitní indukčnost vývodu kondenzátoru ($2 \times 3\text{ nH}$). Vypočteme, jaký bude úbytek napětí na parazitním odporu a indukčnosti. Představme si, že onen integrovaný obvod je mikroprocesor HC 11, který má impulzní spotřebu 0,1A/10ns.



Obr.6.11: Vliv parazitního odporu a indukčnosti při blokování napájení.

Úbytek na parazitním odporu:

$$U_R = R \cdot I = 77 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 = 7,7 \quad [\text{mV}] \quad (6.5)$$

Úbytek na parazitní indukčnosti:

$$U_L = L \cdot \frac{dI}{dt} = 164 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{0,1}{10 \cdot 10^{-9}} = 1,64 \quad [\text{V}] \quad !!! \quad (6.6)$$

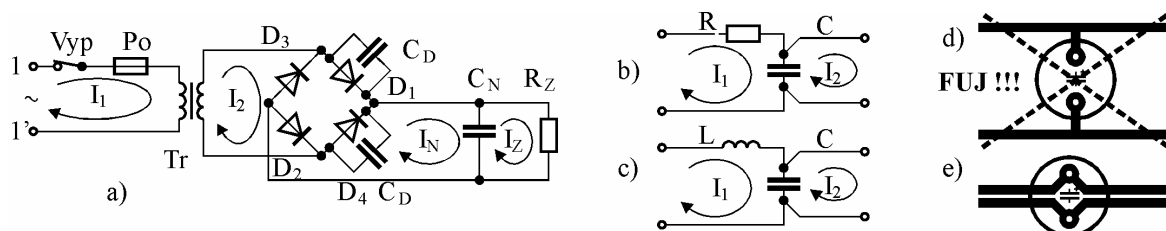
Z výpočtu je vidět, že vliv parazitního odporu je zanedbatelný, ale vliv parazitní indukčnosti plošného spoje způsobí špatnou funkci zapojení, neboť úbytek U_L nekolikanásobně přesahuje povolenou toleranci napájecího napětí ($\pm 250\text{ mV}$) i šumovou imunitu (0,9V). Uvedenou situaci je nutné řešit podlitím spoju vodivou plochou (=snížení indukčnosti na $\frac{1}{2}$) a posunutím kondenzátoru bezprostředně k HC11 (nejlépe SMD z druhé strany desky přímo pod HC11).

6.5. Napájecí zdroje

Napájecí zdroje jsou vstupní bránou pro rušení, šířené napájecím vedením. Zároveň mohou způsobovat zpětný průnik rušení z napájeného zařízení do napájecího vedení. Tyto problémy se mohou řešit například filtrací, oddělením pomocí stíněných transformátorů nebo DC/DC konvertoru atd. To je velmi rozsáhlá problematika, hodná samostatné publikace. V následující části si proto všimneme především návrhu spoju usměrňovače, filtru a stabilizovaných zdrojů. Pochopíme-li smysl těchto základních pravidel, budeme schopni je aplikovat na další zapojení.

Princip funkce usměrňovače s filtrem je všeobecně známý, takže si všimneme pouze některých nejdůležitějších momentů návrhu. Na *obrázku 6.12 a)* je nakresleno jeho základní schéma. Z hlediska správného návrhu spoju je důležité dodržet následující pravidla:

- Plochy smyček jednotlivých proudů I_1 , I_2 , I_N , a I_C musí být co nejmenší.
- Sítové svorky 1 a 1', vypínač, pojistka a svorky primárního vinutí transformátoru by měly být fyzicky lokalizovány v jedné části přístroje blízko sebe. Není vhodná varianta, kdy svorky, pojistka a transformátorek jsou v zadní části přístroje a vypínač na předním panelu.
- Pozor na izolační vzdálenosti všech spoju primárního obvodu a též vzdáleností mezi prvky primárního a sekundárního obvodu.
- Layout spoju kondenzátoru C_N musí být navržen podle *obrázku 6.12 e)*. Mejte na paměti, že proud I_N je impulzní povahy a jeho amplituda nekolikanásobně převyšuje hodnotu stejnosměrného I_Z . Stejná pravidla platí i pro kondenzátory RC a LC filtru z *obrázku 6.12 b)* a *c)*.
- Kondenzátory C_D , přemostující diody D_1 a D_4 , se používají pouze v případě, že zdroj má velmi malý odběr (velký R_Z). V tom případě je totiž úhel otevření diod velmi malý a tomu odpovídající proudové impulzy I_N by mohly způsobovat nežádoucí rušení. Kondenzátor C_D snižuje velikost impulzu I_N a prodlouží dobu jeho trvání ($C_D \ll C_N$).



Obr.6.12: Usměrnovač, filtry a layout přívodu spoju ke kondenzátoru.

6.5.1. Analogové stabilizátory

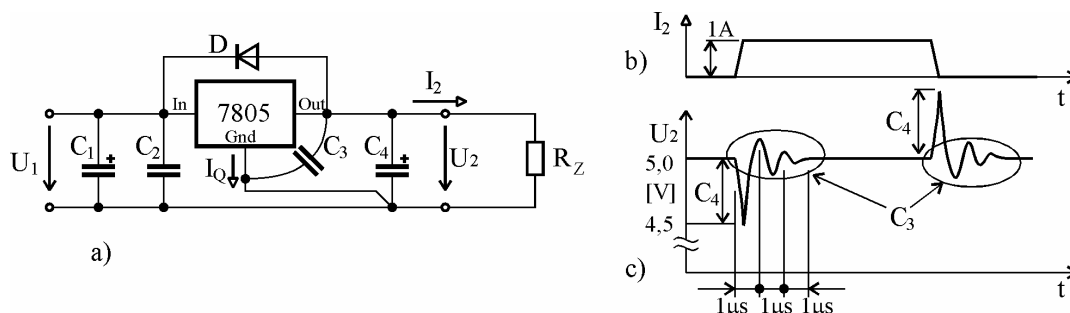
Typickým představitelem analogového stabilizátoru je obvod 7805 – třísvorkový stabilizátor napětí 5V/1A a L200, petisvorkový stabilizátor, který je obdobou 7805 s možností regulace napětí a proudového omezení. U všech obvodů tohoto typu platí, že se musí patřičně „ovesit“ kondenzátory. Zároveň je nutné dodržet správný layout spoju.

Na *obrázku 6.13 a)* je uvedeno základní schéma zapojení stabilizátoru. Na dalších částech obrázku je potom vidět odezva stabilizátoru na impulzní odběr proudu, kde je znázorněn vliv jednotlivých kondenzátorů na jednotlivé složky odezvy. Kondenzátor C_1 je možno v případě krátké vzdálenosti vstupních svorek od usměrňovače s filtračním kondenzátorem C_N vypustit (do cca 20 cm). Kondenzátor C_2 eliminuje parazitní impedanci přívodu (100..330 nF). Prakticky nejdůležitější součástí je C_3 . Úkolem tohoto kondenzátoru je kmitočtová kompenzace výstupu stabilizátoru. Velikost jeho kapacity má vliv na amplitudu i kmitocet zákmitu při impulzním zatížení (*obrázek 6.13 c)*). Proto je velmi důležité umístit jej bezprostředně k vývodu stabilizátoru. Výrobci doporučují jeho kapacitu zpravidla 100 nF. Kondenzátor C_4 zásobuje zatežovací obvod energií vždy v okamžiku, kdy zpětná vazba

stabilizátoru teprve začíná reagovat na změnu výstupního napětí, způsobenou změnou odberu proudu I_2 . Jeho hodnota se dá určit ze vztahu (6.1), kde za I dosadíme velikost odberu, za ΔU velikost zvlnění, které připustíme, a za Δt dobu odezvy stabilizátoru na změnu odberu (obrázek 6.13 c). Pro impulzní odber 1 A při požadovaném zvlnění 10 mV a při $\Delta t = 3 \mu\text{s}$ bude $C_4 = I \cdot \Delta t / \Delta U = 330 \mu\text{F}$.

Svorka GND stabilizátoru má současně dvě funkce. Jednak jí protéká klidový proud I_Q (=napájecí proud stabilizátoru) v řádu jednotek mA, a zároveň je to měřicí svorka výstupního napětí (jejího záporného pólu). To znamená, že naší snahou je zapojit ji co nejblíže zátěži (obrázek 6.13 a).

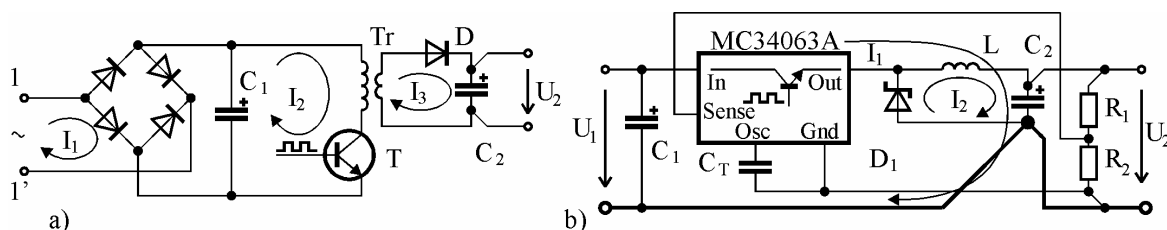
Dioda D chrání stabilizátor pro případ, že při zkratu na vstupu (U_1) bude $U_2 > U_1$, což je pro stabilizátor nepřijatelný režim. Z hlediska návrhu plošných spojů ovšem nejsou pro zapojení této součástky kladeny žádné závažné požadavky.



Obr.6.13: Zapojení stabilizátoru a vliv kondenzátoru na stabilizaci napětí při impulzní zátěži.

6.5.2. Spínané zdroje

S rozvojem spínacích součástek se rozšiřují možnosti využití spínaných zdrojů. Při jejich realizaci je ovšem nutné venovat maximální pozornost právě návrhu plošných spojů. Na obrázku 6.14 jsou uvedeny dva nejrozšířenější principy spínaných zdrojů s transformátorem a indukčností. Pracovní kmitočet se pohybuje zhruba okolo 100 kHz a jednotlivými proudovými smyčkami tecou značné proudy. Při chybném návrhu spoju může docházet k nepřijatelnému vyzařování elektromagnetického rušení a k nadměrnému zvlnění výstupního napětí.



Obr.6.14: Pravidla pro návrh spínaných zdrojů.

Při návrhu rozmístění součástek a vedení spoju **spínaného zdroje s transformátorem** (obrázek 6.14 a) je nutné dodržovat především tyto zásady:

- Minimalizace plochy všech proudových smyček (I_1 , I_2 , I_3) správným rozmístěním součástek i vedením spoju. Na vyzařování má největší podíl proudová smyčka I_2 .
- Výstupní napětí U_2 má být vyvedeno z bodu, které se nacházejí bezprostředně u vývodu kondenzátoru C_2 . Eliminují se tak rušivé úbytky napětí, vznikající na parazitních indukčnostech spoju. Jelikož i kondenzátory mají svou parazitní indukčnost a odpor, používá se zpravidla paralelní zapojení většího počtu kondenzátorů.
- Při návrhu je důležité dodržet vzájemné izolací vzdálenosti všech součástek a spoju mezi primární a sekundární částí obvodu.

Pri návrhu rozmístení součástek a vedení spoju **spínaného zdroje s indukcností** (obrázek 6.14 b) je nutné dodržovat především tyto zásady:

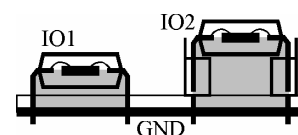
- Minimalizace plochy proudové smyčky I_2 správným rozmístěním součástek i vedením spoju. Při sepnutí tranzistoru v integrovaném obvodu začne protékat obvodem $L-C_2$ proud I_1 . Po vypnutí tranzistoru prevezme tento proud dioda D_1 (smyčka I_2) v původní výši. To znamená, že v okamžiku vypnutí tranzistoru dochází k proudovému skoku I_2 z nulové hodnoty na maximální.
- Výstupní napětí U_2 má být opět vyvedeno z bodu, které se nacházejí bezprostředně u vývodu kondenzátoru C_2 . I zde se často používá paralelní zapojení většího počtu kondenzátorů.
- Společný vodič Gnd integrovaného obvodu včetně všech podpurných obvodů (C_T), snímací svorku $Sense$ a diod R_1-R_2 je nutné zapojit co nejblíže k výstupním svorkám, respektive k zátěži. Jejich propojení je nutné provést v souladu s obr. 6.14 b).
- Jako indukčnost L musí být použita cívka, která má minimální rozptyl magnetického toku do okolí, tedy například toroid. Rozhodně není vhodné použít válcovou cívku.

V obou zapojeních se doporučuje za výstup U_2 zapojit ještě LC filtr (například $1\mu H$, $100\mu F$) s návrhem layoutu ve smyslu obrázku 6.12 c).

6.6. Císlicové obvody

Popsat bezzbytku veškerá konkrétní pravidla pro návrh plošných spoju číslicových obvodů by bylo dosti vysilující. Zčneme tedy z obecného hlediska. Aby navrhované elektronické zařízení pracovalo bezchybně, bylo odolné vůči vnějšímu rušení a samo nevyzařovalo, musíme dodržet následující požadavky:

1. Minimalizace impulzních proudů.
2. Minimalizace ploch proudových smyček.
3. Minimalizace vyšších složek kmitočtového spektra.
4. Zachování co nejvyšší šumové imunity.



Obr.6.15: Vliv patič.

6.6.1. Pravidla související s návrhem schématu

Minimalizace impulzních proudů:

- Co nejmenší počet synchronně prepínaných hradel.
- Výber vhodné logické rady z hlediska vstupních kapacit a impulzní proudové spotřeby.
- Vhodné blokování – výpočet hodnoty blokovacího kondenzátoru a výber jeho hodnoty a typu individuálně pro každou součástku na základě znalosti režimu její činnosti (=vlastní impulzní spotřeba, šumová imunita, zatížení výstupu, rezonanční kmitočet kondenzátoru).
- Ošetření nepoužitých vstupů (v souladu s doporučeními výrobců součástek).

Minimalizace ploch proudových smyček:

- Vhodná koncepce sbernic a napájení (včetně rozložení pinů na konektorech).
- Využití SMD součástek (jsou menší než součástky s průchozími vývody).
- Výber součástek s napájecími vývody proti sobě (obrázek 5.6) – možnost blokování napájení SMD kondenzátorem zespodu přímo v místě napájecích vývodů.
- Výber vhodných typu blokovacích kondenzátorů z hlediska možnosti jejich umístění u materských součástek a způsobu jejich vzájemného propojení.
- Nepoužívat patice u velmi rychlých součástek (obrázek 6.15).

Minimalizace vyšších složek kmitočtového spektra:

- Nepoužívat zbytečně rychlé součástky a rady logických obvodů (tabulka 5.1).

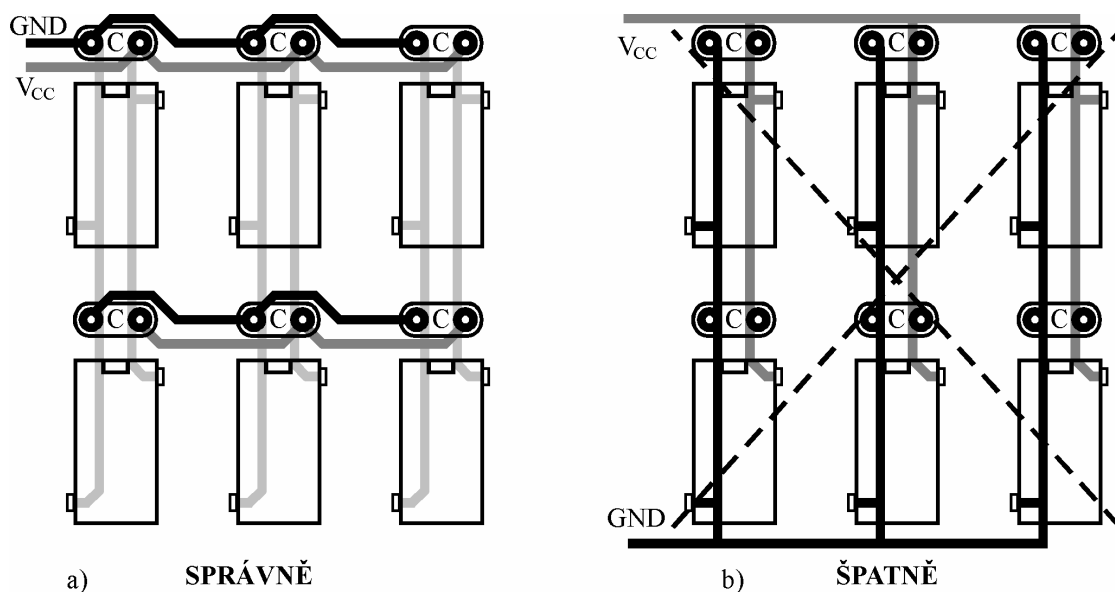
- Návrh vhodného systému prenosu dat (sériový, paralelný, rychlost prenosu...).

Zachování co nejvyšší šumové imunity:

- Impedancní přizpůsobení dlouhých spoju.
- Blokování napájení za účelem udržení co nejmenšího zvlnění napájení.
- Nepoužívat zbytečně rychlé součástky a rady logických obvodu (tabulka 5.1).
- Nezpracovávat vstupne/výstupní signály s jinými, nesouvisejícími (například hodinami), v jednom integrovaném obvodu (není-li k tomu určen).

6.6.2. Pravidla související s návrhem rozmístění součástek a vedení spoju

- Správné razení vrstev plošného spoje – pro číslicové obvody je vhodné použít vícevrstvé desky plošných spoju (tabulka 6.1). Vnitřní vodivé plochy GND a Vcc vytvářejí blokovací kondenzátor s vysokým rezonančním kmitočtem, snižují parazitní indukčnost signálových spoju a vůbec představují nízkoimpedancní rozvod napájení i společného vodice. Pozor na pravidlo 20-H a syndrom „švýcarského sýru“!
- Při použití pouze dvoustranného spoje je nutné zvolit optimální způsob zemnění a tím související rozvod napájení. Je-li to alespon trochu možné, je vhodné využít stranu součástek (při SMD montáži stranu spoju) jako vodivou plochu připojenou ke společnému vodici (GND). Nouzově je doporučen návrh rozmístění součástek a vedení napájení dle obrázku 6.16 a). V jedné vrstvě je napájení vedeno vodorovně a ve druhé svisle, čímž neutrpí propojitelnost signálových spoju. Ovšem rozhodne je nutné se vyvarovat systému napájení z obrázku 6.16 b)!!! (= velké plochy napájecích proudových smyček).



Obr.6.16: Nouzové řešení napájení číslicových obvodu při absenci vodivé plochy GND.

- Rozmístění součástek je nutné provést tak, aby signálové spoje byly co nejkratší.
- Při dlouhých paralelních signálových spojích je nutné mít na paměti nebezpečí přeslechu. Literatura [5] uvádí maximální délku paralelně vedených signálových spoju (ve třídě přesnosti 4) pro obvody rady TTL a LS 25 cm, S, F, AS 15 cm, HCMOS 13 cm, přičemž ze vztahu pro vzájemné kapacity a indukčnosti vyplývá, že tato vzdálenost může být vyšší v případě větší vzájemné vzdálenosti signálových spoju, podložení signálových spoju vodivou plochou společného vodice, případně vrazení společného vodice přímo mezi signálové spoje.

- Všechny spoje by mely být vedeny pod úhlem 45° . Při vedení pod úhlem 90° dochází k podleptání rohu, což má za následek změnu impedance která může být příčinou vzniku odrazu.

6.7. Obvody hodinových impulsu

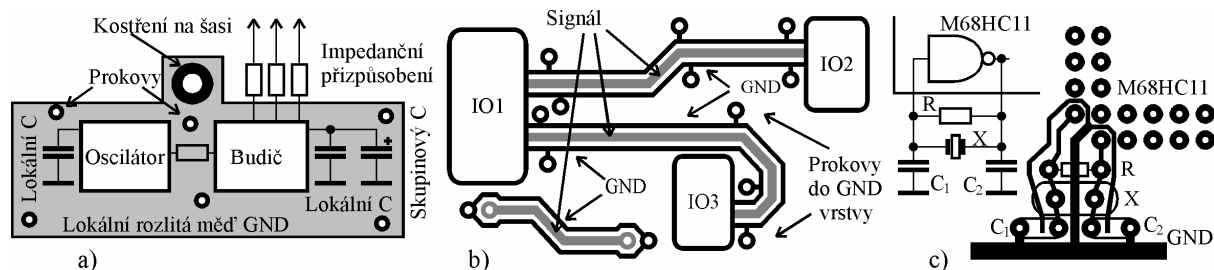
Obvody hodinových impulsu generují zpravidla průběhy napětí (resp. proudu) s nejvyšším kmitočtem i nejstrmějšími náběžnými i sestupnými hranami zcelého elektronického obvodu. Dá se tedy říci, že mohou být největším zdrojem rušení na celém plošném spoji. Proto je třeba temto obvodům venovat maximální pozornost. Nejdůležitější zásadou je minimalizace plochy proudových smyček.

- Součástky musí být rozmístěny tak, aby spoje mezi nimi byly co nejkratší.
- Zároveň platí pravidlo důsledné fyzické separace těchto součástek a jejich spoju od ostatních obvodu, především od vstupne/výstupních. Hrozí totiž možnost jejich vzájemné elektromagnetické vazby, a tedy nepřipustné vyzařování do kabeláže, případně naopak – rušení, které přichází po vstupne/výstupních vodičích může způsobit špatnou funkci rychlých obvodu hodin. Literatura [9] uvádí, že obvody hodin, pracující s náběžnými hranami 10 ns, by mely být vzdáleny od vstupne/výstupních obvodu 5 cm a při hrane 5 ns až 7 cm.
- Součástky mají být vkládány přímo do plošného spoje bez patič (obrázek 6.15).
- Na plošném spoji má být ze strany součástek v celé oblasti, kde se nacházejí součástky hodin, vytvořena lokální vodivá plocha GND (= minimalizace ploch proudových smyček). Tato plocha musí být připojena pomocí několika prokův ke společné napájecí zemi ve vnitřní vrstvě plošného spoje, případně pomocí šroubku kontaktována na šasi přístroje (obrázek 6.17 a).
- Lokální plochou GND nesmí vést žádné signálové spoje (neplatí pro 2–vrstvé spoje).
- Všechna kovová pouzdra součástek musí být připojena k lokální GND.
- Signálové spoje se potom vedou v nejbližší další spojové vrstvě. U 4 a 2–vrstevných desek tedy až ze strany spoju.
- Oblastí hodinových obvodu nesmí v žádné vrstvě procházet nesouvisející spoje.
- Při propojování je třeba udržovat nízkou a hlavně konstantní impedanci spoju. Toho lze docílit jednak vedením spoju pod úhlem 45° , a to pouze nad lokální vodivou plochou, připojenou ke společnému vodiči, a dále pomocí takzvaných ochranných paralelních spoju (bude popsáno dále).
- Při návrhu spoju je nutné zohlednit konečnou rychlost šíření signálu po plošném spoji, včetně vlivu kapacitní zátěže.
- Velkou pozornost je třeba venovat filtraci a blokování napájení.
- U konektoru, vedoucích signál hodin mimo desku plošného spoje, je nutné zakončit hodinový spoj příslušnou impedancí.

6.7.1. Ochranné paralelní spoje

Jedná se o spoje, kterými se obklopí kritické signálové spoje a které jsou na několika místech připojeny pomocí prokův do vrstvy GND (obrázek 6.17 b). Takové obklopení se částečně chová jako koaxiální kabel, tedy snižuje riziko přeslechu, snižuje úroveň vyzařování a při správném návrhu zabezpečí přesnou a hlavně konstantní impedanci kritického signálového spoje. Samozřejmě se předpokládá kvalitní podložení celé délky kritického spoje vodivou plochou GND v bezprostřední nejbližší vrstvě plošného spoje.

Konkrétní příklad návrhu spoju hodin pro M68HC11 je na obrázku 6.17 c). Je vidět, že díky vhodnému rozmístění součástek jsou signálové spoje vedeny co nejtesněji u sebe a nevytvářejí žádné velké plochy smyček. Navíc jsou obklopeny společným vodičem, takže budou odděleny od ostatních okolních spoju.

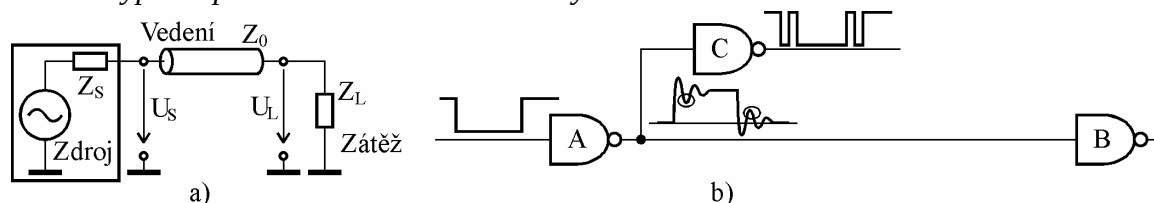


Obr.6.17: Uspřádání lokální zeme a) ochranné paralelní spoje b), příklad návrhu c).

6.7.2. Odrazy na vedení a jejich potlacení

Plošné spoje, stejně jako každé jiné elektrické vodice, mají svou impedanci a signál se jimi šíří konečnou rychlostí. Tyto vlastnosti byly rozebrány v samostatné kapitole. Při přenosu střídavého signálu s vlnovou délkou podstatně větší než je mechanická délka spoje, jsou impedance i zpoždění pruchodu signálu zanedbatelné a nemusíme se jimi zabývat. Je-li ovšem délka spoje srovnatelná s vlnovou délkou přenášeného signálu nebo dokonce delší, musíme na takové spoje nahlížet jako na vedení s rozprostřenými parametry a impedanci a rychlost šíření signálu uvažovat. Potom hovoríme o elektricky dlouhých spojích.

Obr.6.18: Typická přenosová soustava a odrazy na vedení.



Systém přenosu signálu můžeme nakreslit jako soustavu, která má zdroj signálu svýstupní impedancí Z_S , vedení Z_0 a zátěž Z_L (obrázek 6.18 a). Taková soustava přeneše ze zdroje do zátěže nejvyšší výkon tehdy, bude-li $Z_S = Z_0 = Z_L$. Zároveň v takové situaci nebude docházet k odrazům. K tomu totiž dochází v místech se změnou impedance. Z toho plynou pro návrh plošných spojů dvě základní myšlenky:

- Při návrhu schématu se u elektricky dlouhých spojů musíme snažit vhodným výběrem součástek a jejich elektronickým zapojením udržet rovnost impedancí zdroje signálu Z_S a zátěže Z_L s předpokládanou impedancí spoje Z_0 .
- Při návrhu plošného spoje dodržet požadovanou impedanci Z_0 konstantní.

Impedance plošného spoje je víceméně dána technologickými možnostmi výroby a máme možnost ji při běžných návrzích na materiálu FR4 nastavit vhodnou konfigurací rozmeru a vrstev v rozmezí 50 až 200 Ω (obrázek 4.8 a vztahy 4.31 až 4.37). To tedy znamená, že při návrhu schématu je nutné pro elektricky dlouhé spoje navrhnout impedanci přizpůsobení, a to jak na straně zdroje, tak na straně zátěže.

Nebezpečí odrazu na nepřizpůsobeném vedení je vidět z obrázku 6.18 b). Při změně z logické „0“ do „1“ se na konci nepřizpůsobeného vedení může odražený impuls odečíst od právě nastavené logické úrovně. Jsou-li navíc přijímací obvody zapojeny tak, že vysílací obvod (A) řídí zároveň jeden přijímací obvod bezprostředně (C) a druhý přes vedení (B), může odraz vzniklý na konci vedení po svém návratu na začátek vedení představovat pro přijímací obvod (C) další impuls, který je nežádoucí. Obdobně je tomu i u přechodu „1“? „0“. Z výše uvedené situace lze jednoduše určit pravidlo pro určení délky spoje, který musí být impedancně přizpůsobený:

Je-li dvojnásobek zpoždění pruchodu signálu větší, než trvání jeho náběžné nebo sestupné hrany, je nutné spoj impedancně přizpůsobit.

Pro maximální délku neprizpůsobeného spoje L_{max} tedy platí:

$$L_{max} = \frac{t_s}{2 \cdot t'_{pd}} \quad (6.7)$$

kde t_s je menší údaj z náběžné a sestupné hrany impulzu (t_r , t_f) a t'_{pd} je zpoždění pruchodu signálu vedením s kapacitní zátěží (vztah 4.45).

Příklad: Máme spoj 10 cm dlouhý, zatížený 8 hradly HCMOS. Je nutné zakončení? Spoj bude proveden dvoustranně ve třídě přesnosti 5 na materiálu FR4 o tloušťce 1,5 mm.

Řešení: Budeme předpokládat, že pro tak rychlé obvody, jakými jsou HCMOS bude zespolu plošného spoje rozlita med GND. Pro výpočty použijeme tedy vztahy, související s konfigurací plošného spoje z obrázku 4.8 e). Impedance takového spoje tedy bude při $K_{L2} \approx 1 + 1,5 \cdot h/w$ a $K_{C2} \approx 1 + h/w$ (vztah 4.35):

$$Z_0 = \frac{120 \cdot p}{\sqrt{K_{L2} \cdot K_{C2}} \cdot \sqrt{e_r}} \cdot \left(\frac{h}{w} \right) = \frac{120 \cdot p}{\sqrt{12,25 \cdot 8,5} \cdot \sqrt{4,7}} \cdot \left(\frac{1,5}{0,2} \right) = 127 \quad [\Omega]$$

Zpoždění pruchodu signálu bez kapacitní zátěže t_{pd} bude (vztah 4.44):

$$t_{pd} = 3,33 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{e_r} \cdot \sqrt{\frac{K_{C2}}{K_{L2}}} = 3,33 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{4,7} \cdot \sqrt{\frac{8,5}{12,25}} = 6 \cdot 10^{-9} \quad [s / m]$$

Zatežovací kapacita C_d/l bude pro 8 vstupu HCMOS při vstupní kapacitě jednoho hradla 4 pF (tabulka 5.1) 32 pF na 10 centimetrech našeho spoje, tedy 320 pF/m. Kapacita plošného spoje na jednotku délky bude (vztah 4.12):

$$\frac{C}{l} = e_0 \cdot e_r \cdot K_{C2} \cdot \frac{w}{h} = 8,8 \cdot 10^{-12} \cdot 4,7 \cdot 8,5 \cdot \frac{0,2}{1,5} = 46,9 \cdot 10^{-12} \quad [F / m]$$

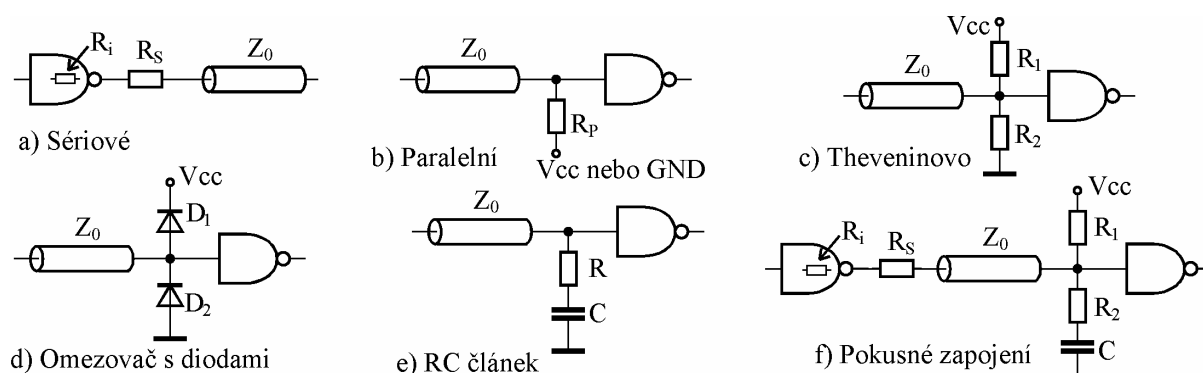
Zpoždění pruchodu signálu kapacitně zatíženého vedení t'_{pd} tedy bude (vztah 4.45):

$$t'_{pd} = t_{pd} \cdot \sqrt{1 + \frac{C_d/l}{C/l}} = 6 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{1 + \frac{320}{46,9}} = 16,8 \cdot 10^{-9} \quad [s / m]$$

Maximální délka nezakončeného spoje L_{max} při $t_r = t_f = 3,5$ ns (tabulka 5.1) potom bude:

$$L_{max} = \frac{t_s}{2 \cdot t'_{pd}} = \frac{3,5 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 16,8 \cdot 10^{-9}} = 10,4 \quad [cm]$$

Spoj tedy nebude nutné impedancně prizpusobovat.

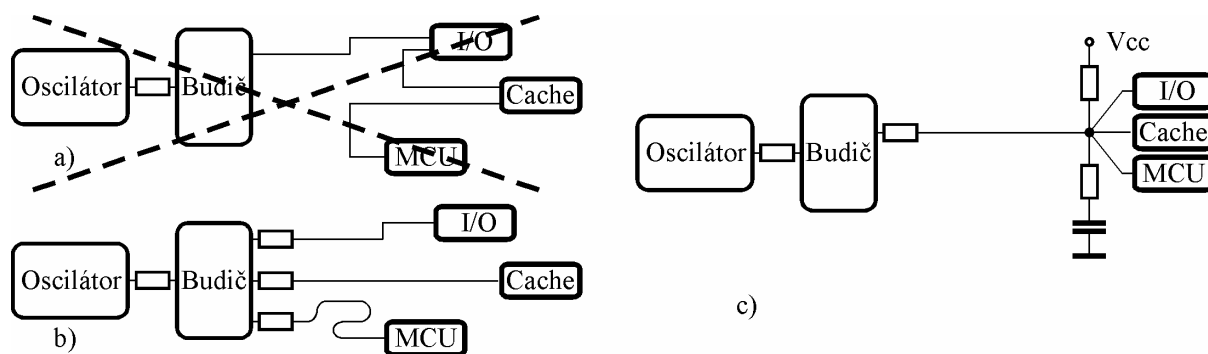


Obr.6.19: Způsoby impedancního prizpusobování.

Na obrázku 6.19 jsou uvedeny základní způsoby impedancního prizpusobování výstupu i vstupu číslicových obvodů za předpokladu, že jejich výstupní odpor je menší a naopak vstupní odpor je větší než impedance vedení Z_0 .

- **Sériové prizpusobení** (obrázek 6.19 a) se používá jako výstupní. Rezistor R_S musí být navržen tak, aby $R_S + R_i = Z_0$. Jeho hodnota odporu se typicky pohybuje v rozsahu 15 – 75 Ω , nejčastěji se používá hodnota 33 Ω .
- **Paralelní prizpusobení** (obrázek 6.19 b) se používá ke snížení vstupní impedance. Zanedbáme-li velikost vstupního odporu hradla, bude $R_P = Z_0$. Podle požadavku aplikace se tento rezistor připojuje buď na společný vodič nebo na napájení. Nevýhoda tohoto způsobu zakončení je v tom, že příliš zvyšuje stejnosměrné proudové zatížení budícího obvodu.
- **Theveninovo prizpusobení** (obrázek 6.16 c) je obdobou paralelního zapojení. Hodnoty odporu rezistoru R_1 a R_2 se volí tak, aby $R_1 || R_2 = Z_0$. Výhoda tohoto zapojení proti paralelnímu je v tom, že je možno nastavit poměr odporu podle zatížitelnosti budícího obvodu, které může být jiný při logické nule a jiný při logické jedničce.
- **RC clánek** (obrázek 6.19 e) je z hlediska zatížení budícího obvodu nejvhodnější zapojení paralelního prizpusobení. Hodnota odporu rezistoru R se volí rovna impedanci Z_0 a velikost kapacity kondenzátoru C se určí tak, aby časová konstanta $t = R \cdot C = 2 \cdot t'_{pd}$. Znamená to tedy, že pro rychlé prechodové jevy se bude RC clánek chovat jako dokonalé impedancní prizpusobení a v ustáleném stavu bude jeho impedance vysoká a nebude tedy zatežovat budící obvod.
- **Omezovac s diodami** (obrázek 6.19 d) není impedancní prizpusobení v pravém slova smyslu. Toto zapojení pouze omezí napetové překmity vyšší než je napájecí napětí (D_1) a nižší než je nulový potenciál společného vodiče (D_2).

Zvolit při návrhu schématu správný způsob prizpusobení a určit přesné hodnoty jeho součástek je zpravidla obtížné, a proto se u pokusných a vývojových zařízení používá zapojení z obrázku 6.19 f), které je průnikem předchozích zapojení, a jednotlivé součástky se osadí podle potřeby až při ožívování obvodu. Na obrázku 6.20 je znázorněn způsob vedení spoju hodin mezi jednotlivými funkčními bloky. Jsou-li jednotlivé bloky rozptýleny po plošném spoji, je nutné volit variantu b) a snažit se dodržet stejnou délku spoju k jednotlivým blokům. V případě těsné blízkosti bloku je možno použít variantu c). Rozhodne je třeba se vyvarovat varianty a), která mimo jiné díky konečné rychlosti šíření signálu představuje nestejně časování jednotlivých bloků. Předpokládá se, že spoje budou po celé své délce podloženy vodivou plochou GND, případně dále obklopeny ochrannými paralelními spoji.

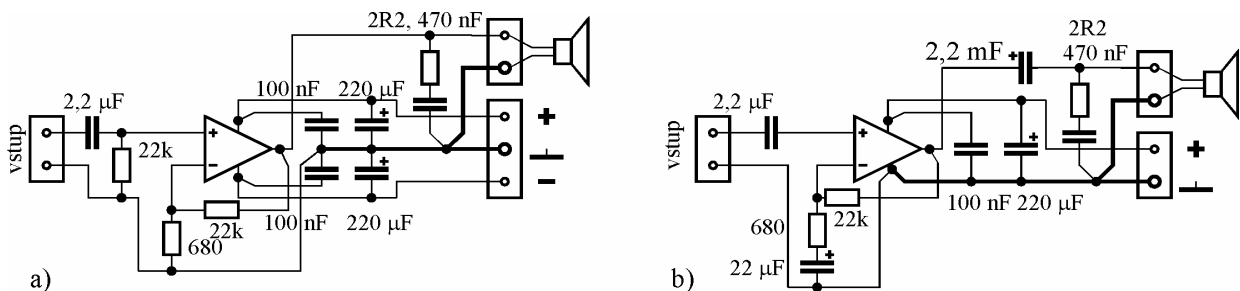


Obr.6.20: Prizpusobování a princip vedení spoju hodin.

6.8. Analogové obvody

Problematika návrhu plošných spoju analogových obvodu je velmi rozsáhlá. Velkou pozornost je třeba venovat již při návrhu schématu volbě vhodného napájení, a to jak z hlediska stability napájecího napětí (casové, teplotní...), tak z hlediska zvlnění a rušení z napájecí sítě. V samotném analogovém obvodu je potom třeba správně blokovat napájení, případně jej dále filtrovat mezi jednotlivými funkčními bloky.

Pri návrhu rozmístění součástek a jejich propojování je třeba venovat velkou pozornost otázce preslechu. Ty mohou vznikat nejen kapacitní a induktivní vazbou, ale i galvanickou vazbou pri chybném návrhu spoju napájení a hlavne společného vodice (zeme). Proto právě zemnění je u obvodu tohoto typu velmi choulostivá záležitost. Na *obrázku 6.21* jsou uvedeny dva nejcastější příklady výkonových zesilovacu se symetrickým a nesymetrickým napájením. Schémata jsou na první pohled neprehledná a neusporádaná, ale to je tím, že je na nich znázornen způsob zemnění a připojení napájení včetně správného zapojení blokovacích kondenzátoru. Tuctnou carou je znázornena výkonová zem a je velmi důležité najít správné místo, kde kní bude připojena nízkovýkonová (vstupní) zem. Melo by to být takové místo, kde se nemuže stát, že se úbytek napetí na výkonovém zemním spoji secte se vstupním signálem a projeví se tak jako rušení (=galvanická vazba). Upozornuji, že i když záporná zpětná vazba zesilovace vychází z výkonového výstupu zesilovace, musí být zemněna do vstupní části zeme. V případě, že bude vstupní část napájena z dodatecne filtrovaného napájení, je nutné provést layout spoju dle pravidel z *obrázku 6.12 b), c), e)*. Velmi důležité je též vhodne navrhnout rozmístění součástek tak, aby se v žádném případě nenacházely vstupní části obvodu vedle výkonových (preslechy). Znamená to tedy, že je dobré pri návrhu rozmístění součástek na plošném spoji a umístění konektoru na hotovém zařízení dodržet geometrii odpovídající schématu – vstupní citlivá část na jedné strane a výkonový výstup a napájení na strane protejší.



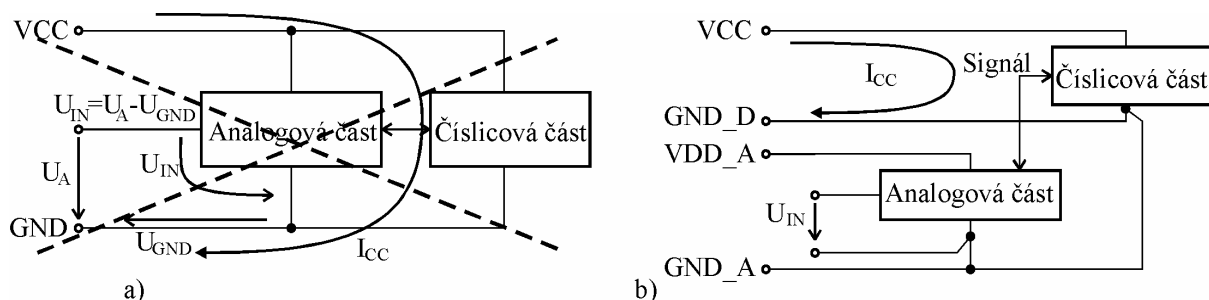
Obr.6.21: Propojování zesilovacu a) se symetrickým a b) s nesymetrickým napájením.

6.9. A/D převodníky

A/D převodníky, jak vyplývá z jejich názvu, převádějí analogový signál na číslicový. To tedy znamená, že na jedné desce plošného spoje se nachází jak citlivá analogová část, tak i silne rušící číslicová část. Proto je nutné venovat pozornost jejich vzájemnému propojení. Na *obrázku 6.22 a)* je vyznačen jeden z velkých problémů koexistence analogového a číslicového obvodu na jedné desce. Tou je napájení a zemnění. Je videt, že pri nevhodném propojení se bude úbytek napetí U_{GND} , vzniklý prutokem zpravidla impulzního napájecího proudu I_{CC} odecítat od vstupního napetí U_A , a tím způsobovat nezanedbatelné rušení. Bude-li v analogové části například 12-ti bitový převodník, muže taková chyba v zapojení predstavovat snížení presnosti prevodu o nekolik bitu. Na *obrázku 6.22 b)* je navržen správný způsob propojení [13]. Jakýkoliv úbytek napetí na číslicové zemi GND_D již neovlivnuje analogový vstupní signál, neboť proud I_{CC} již neprochází analogovou vstupní smyčkou.

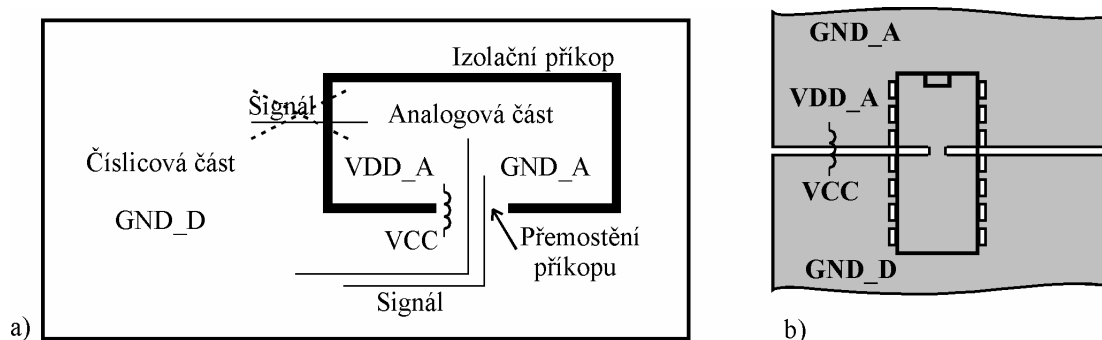
Pozornost musíme venovat i rozmístění součástek na plošném spoji. Základní princip realizace analogové a digitální části na jedné desce je znázornen na *obrázku 6.23 a)*. Predpokládám, že jedna vrstva plošného spoje je vyhrazena pouze společnému vodici (zemi) jako vodivé ploše. Všechny analogové součástky musí být lokalizovány do jedné oblasti a elektricky separovány od číslicové části pomocí izolacního příkopu. V místě izolacního příkopu nesmí být v žádné vrstve plošného spoje žádný vodiv. Pouze v jednom místě je možno (nutno) propojit analogovou (GND_A) a číslicovou (GND_D) zem. Tomuto místu se říká přemostění izolacního příkopu. Jedná se vlastne o praktickou realizaci zapojení z *obrázku 6.22 b)*.

Do analogové oblasti smejí vstupovat pouze spoje, nutné pro funkci analogového obvodu, tedy vstupní a výstupní signály, napájení, a to právě v místě přemostění. Nikde jinde. Vedení spoju mimo přemostění by znamenalo vznik nežádoucí proudové smyčky od zdroje signálu okolo příkopu přes přemostění.



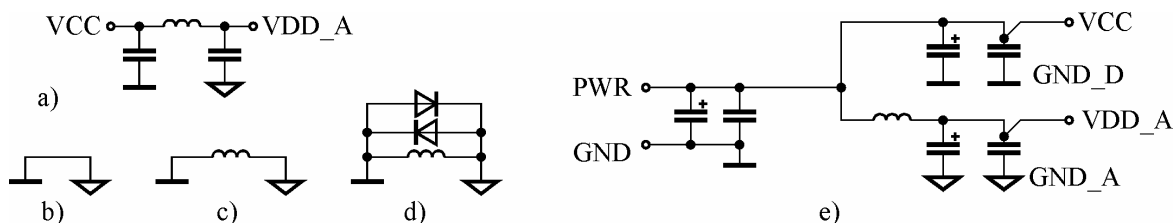
Obr.6.22: Propojování analogové a číslicové části obvodu.

Na obrázku 6.23 b) je uveden příklad propojení analogové a číslicové zeme, je-li analogová i číslicová část tvořena pouze jedním integrovaným obvodem. Integrované A/D převodníky mají totiž vývody analogové a číslicové části uspořádané tak, aby je bylo možné jednoduše elektricky separovat. V takovém případě je vhodné dbát doporučení výrobce integrovaného obvodu, který obvykle v aplikacních listech uvádí správný způsob zemnění.



Obr.6.23: Rozmístění součástek A/D převodníku a způsob zemnění na plošném spoji.

Z předchozích obrázku je patrné, že je velmi důležitá též otázka napájení převodníku a provedení propojení společného vodice (zeme). Optimálním řešením je samozřejmě použití nezávislých napájecích zdrojů pro analogovou a číslicovou část. V případě společného napájení je nutné provést alespoň jeho filtraci – zamezení šíření rušení z číslicové části do analogové.



Obr.6.24: Příklady propojení společného vodice (zeme) a napájení u A/D převodníku.

Na obrázku 6.24 jsou vyobrazeny některé možnosti filtrace a propojení. Zapojení a) znázorňuje nejpoužívanější princip filtrace napájení. Někdy (například u 8-bitových převodníků) se tlumivka nahrazuje rezistorem. Části b), c) a d) znázorňují způsoby propojení číslicové a analogové zeme. Příklad b) se používá tehdy, mají-li být obě zeme galvanicky propojeny. Není-li potřeba galvanického propojení zemí, používá se mezi analogovou a

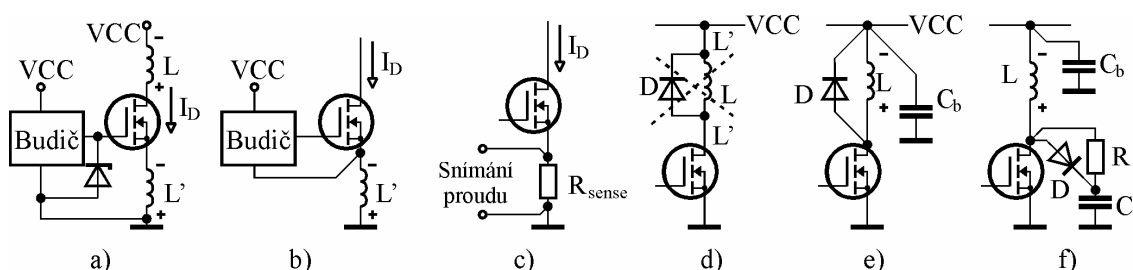
digitální zemí filtrační tlumivka c). V případě, že rozdíl mezi potenciály analogové a číslicové zeme nesmí překročit určitou mez, přemostí se tato tlumivka například antiparalelním zapojením dvou diod d). Případ e) potom znázorňuje příklad doporučeného zapojení filtrace napájení. Za zmínku stojí, že výstupní napětí VDD_A i VCC je nutné odebírat z místa, které se nachází co nejblíže svorkám kondenzátoru. Opet platí pravidlo, že konkrétní zapojení a hodnoty součástek je vhodné zjistit z katalogových listů použitých součástek.

6.10. Výkonové spínací obvody

Výkonové spínací obvody se od analogových (při stejných proudových hustotách) liší tím, že na funkci obvodu mají velký vliv parazitní indukčnosti jak použitých součástek, tak i vodičů na plošném spoji. Parazitní indukčnosti součástek můžeme ošetrřit ochrannými prvky (diody, RCD ochrana atd.), ale parazitní indukčnosti spoju můžeme omezit pouze správným návrhem desky. A to není vůbec jednoduché. Musíme si uvědomit, že již při spínání proudu 10 až 100 A a vypínacích dobách tranzistoru MOSFET 0,1..1 μ s se jedná o takové di/dt , které způsobí úbytek 1 V na parazitní indukčnosti 10 nH, což představuje při špatném návrhu pouhý 1 cm a při dobrém návrhu 10 cm spoje! Proto je základní snahou při vedení spoju využít všech technik, směřujících ke snížení parazitních indukčností plošných spoju (široké spoje, vodivé plochy, minimální plochy smyček...).

Na obrázku 6.25 a) a b) jsou nakresleny dva způsoby propojení budice a výkonového tranzistoru. L' představuje parazitní indukčnost plošného spoje. Při vypínání tranzistoru dochází ke strmému poklesu proudu a tedy velkému nárůstu di/dt . To vyvolá překmit napětí na parazitní indukčnosti L' . Toto napětí se sečte s (byť v tom okamžiku nulovým) napětím budice. Bude-li toto napětí vyšší než prahové (2 V), dojde ke krátkodobému pootevření tranzistoru. A nyní otázka: „Je to žádoucí?“ Nedivme se, ale **nekdý ano!** Jedná se totiž o způsob ochrany tranzistoru před překmitem, způsobeným zatežovací indukčností L [14]. Tranzistor při onom pootevření odčerpá prebytečnou energii z induktivní zátěže L , která by se jinak projevila jako napetový překmit. Zapojení může pracovat pouze za přítomnosti ochranné Zenerovy diody (15 V). Ve většině případů ovšem budeme používat variantu obrázku 6.25 b) a společný vodič budice zapojovat co nejblíže tranzistoru. Některé výkonové součástky mají dokonce tento bod vyvedený na samostatnou svorku. Ochranu proti napetovému překmitu budeme potom řešit jiným způsobem, například pomocí diody nebo RCD obvodem.

Ochranné obvody je nutné také správně propojit. Chceme-li chránit tranzistor, nesmíme dopustit, aby docházelo k napetovým překmitům ani na parazitních indukčnostech plošného spoje L' (obrázek 6.25 d). Správné zapojení je tedy v části e) a f). Předpokládám, že není nutné připomínat snahu o dosažení co nejmenších ploch proudových smyček $L-D$ v části e) a dále $L-D-C$ a $C-R$ –tranzistor v zapojení f).



Obr.6.25: Buzení MOSFETU, snímání proudu a zapojení ochran.

Důležité je také vhodné umístění a zapojení blokovacího kondenzátoru C_b . Právě při vypínání může dojít k překmitu napětí na parazitní indukčnosti přívodu VCC, který způsobí rušení v další části obvodu. Kondenzátor C_b musí tento překmit pohltit. Hodnota jeho kapacity musí být taková, aby byl kondenzátor schopen pohltit energii parazitní indukčnosti spříjatelným nárůstem napětí. Bude-li indukčnost 20 nH, proud 1 A a povolený nárůst napětí 0,1 V, vyjde hodnota kapacity $C_b = L \cdot I^2 / U^2 = 2 \mu F$. Použijeme vyšší hodnotu, například 22 μF , nejlépe

v provedení tantalový elektrolyt, nebo paralelní kombinaci keramického kondenzátoru 100 nF a hliníkového elektrolytického kondenzátoru 22 μ F. Toto je také způsob blokování většího množství relé. Je-li na plošném spoji umístěno najednou například 8 relétek, používá se k jejich blokování jeden společný elektrolytický kondenzátor (například 220 μ F) a pro každé relé zvlášť (nebo pro dve dohromady) keramický kondenzátor vhodné hodnoty kapacity (například 100nF).

6.11. Vstupne/výstupní obvody

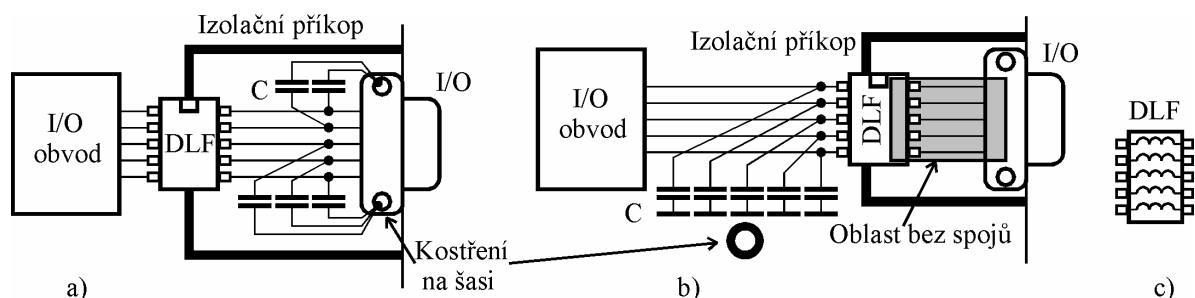
Za vstupne/výstupní obvody (I/O obvody) budeme pro účely tohoto skriptu považovat všechny obvody, zabezpečující styk základní desky plošného spoje s okolím, tedy například porty, napájení, klávesnice, celní panely, cidla atd. I/O jsou bránou pro rušení, a to obema směry – dovnitř i ven. Jednak se mohou chovat jako anténa pro vyzařování rušení, které vzniká na plošném spoji a jednak mohou přijmout vnější rušení a toto zavést na plošný spoj. Hlavním úkolem při jejich návrhu tedy bude zabránit emisi rušení z desky a odfiltrovat vnější rušení. Mezi základní návrhová pravidla pro I/O obvody tedy budou patřit především fyzická a elektrická separace I/O obvodu od ostatních obvodů na desce plošného spoje, filtrace, zemnění, stínění, minimalizace délky spoje a velikostí ploch proudových smyček, ochrana před ESD (elektrostatickými výboji), jištění proti zkratu a přetížení...

6.11.1. Izolace a separace vstupne/výstupních obvodů

Fyzická a elektrická separace vede k vysoké hodnotě vazební impedance vůči ostatním obvodům na plošném spoji, a tím i k nízké úrovni přenosu rušení. Pod fyzickou separací si představme lokalizaci součástek I/O obvodu do jedné oblasti a jejich oddělení od ostatních částí obvodu příslušnou vzdáleností a izolačním příkopem na plošném spoji. Elektrická separace může znamenat například filtraci nebo galvanické oddělení I/O od ostatních částí obvodu.

6.11.1.1. Filtrace vstupu a výstupu na plošném spoji

Na *obrázku 6.26* je znázorněna technika filtrace vstupu a výstupu. V části *a)* jsou kondenzátory C připojeny bezprostředně u I/O konektoru a představují tak spolu s tlumivkami DLF (Data Line Filter) výborný filtr, potlačující vyzařování vysokofrekvenčního rušení z plošného spoje. Hodnota kapacity kondenzátoru se pohybuje v řádu 100pF až 1nF. Nevýhoda tohoto zapojení spočívá v tom, že je nutné tyto kondenzátory pro případ elektrostatických výbojů (ESD) dimenzovat na vysoké napětí – minimálně 1.500 V, ale podle podmínek okolního prostředí se toto napětí může zvýšit na 6.000 až 8.000 V!



Obr.6.26: I/O filtrace.

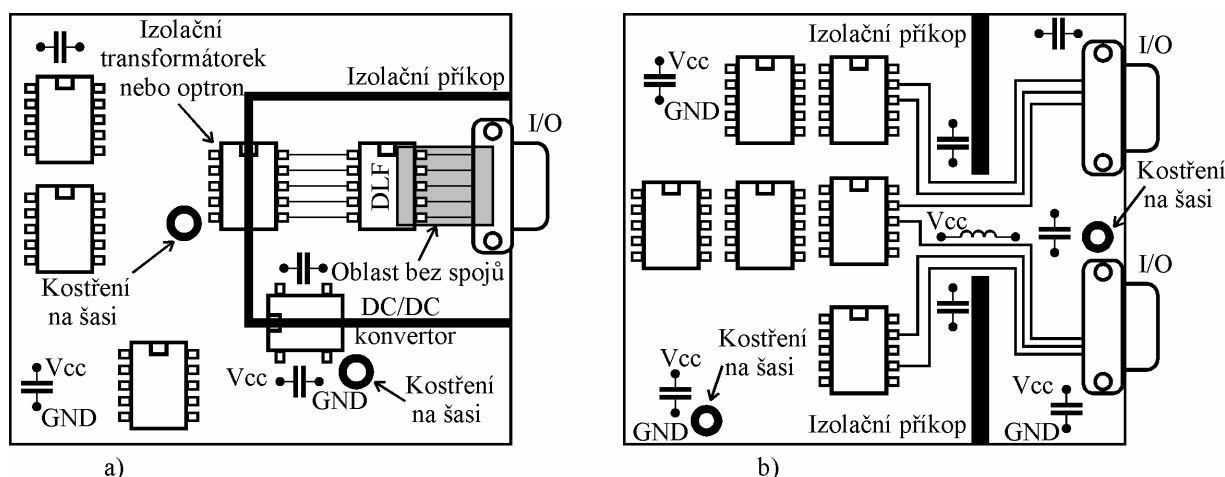
Tuto nevýhodu odstraní varianta *b)*. Bezprostředně u I/O konektoru se nachází soustava tlumivek DLF, která přemostí izolací příkop a bezprostředně následují filtrační kondenzátory. Společný vodič kondenzátorů by měl být připojen přímo do vodivé plochy GND, která by zároveň měla být v bezprostřední blízkosti ukotvena na šasi přístroje.

Jelikož vnější rušení a ESD je filtrováno až LC filtrem, je nutné v místě spoju mezi I/O konektorem a DLF zajistit co největší vazební impedanci vůči jiným spojům plošného spoje, což se nejlépe zajistí tak, že v dané oblasti nebudou existovat v žádné vrstvě žádné spoje. V obou variantách je použita technika izolacího příkopu, která znamená, že v daném místě neexistuje v žádné vrstvě plošného spoje žádný vodič ani vodivá plocha.

Hodnoty kapacit a indukostí je možné vypočítat ze známých vztahů a závisí na kmitočtovém spektru, které mají být pomocí těchto LC filtrů potlačeny.

6.11.1.2. Galvanické oddelení a přemostění

Galvanické oddelení vstupu a výstupu pomocí transformátoru nebo optonu od ostatních částí elektronického obvodu představuje nejúčinnější ochranu navrhovaného zařízení. Technické provedení na plošném spoji je znázorněno na obrázku 6.27 a). I/O konektor je spolu s filtrem umístěn v oblasti, která je od ostatní části oddělená izolacího příkopem. Propojení signálu je provedeno pomocí transformátoru nebo optonu. Je-li zapotřebí do izolované části přivést napájecí napětí, je vhodné použít DC/DC konvertor. Tímto způsobem je zaručena velmi nízká parazitní kapacita mezi I/O částí a zbytkem obvodu. Přesto je vhodné v místě optonu a DC/DC konvertoru umístit kontaktní místo pro propojení na kostru přístroje. Rušení, které tak projde díky nenulové vazební kapacitě těchto součástek, bude svedeno na kostru přístroje.



Obr.6.27: a) galvanické oddelení, b) přemostění.

Přemostění se používá tam, kde z libovolných důvodů není možné použít galvanické oddelení signálu nebo napájení. Jedná se vlastně o propojení I/O zeme a zeme zbytku systému (GND) přemostěním izolacího příkopu ve vhodném místě. Pouze nad tímto místem potom mohou procházet signálové spoje a napájení. Napájení je navíc vhodné oddělit tlumivkou. Pod pojmem izolacího příkop se opět rozumí absence vodiče ve všech vrstvách plošného spoje, tedy i ve vrstvě GND a Vcc. Tímto zapojením se samozřejmě nevylučuje použití filtrace signálových spojů v oblasti u I/O konektoru.

6.11.2.Ochrana před ESD

Elektrostatický výboj (ESD = ElectroStatic Discharge) může být generován elektricky nabitými předměty (papír, plastové fólie, nábytek, člověk...). Trvá rádově 200 ps až 10 ns a chová se jako zdroj proudu 1 až 30 A. Ochrana před elektrostatickým výbojem spočívá v ochraně všech I/O svorek a ochraně plošného spoje před dotykem. Je nutné si uvědomit, že elektrostatický výboj je velmi rychlý prechodový děj. Nebude-li proudový impuls výboje odveden nízkou impedancí do uzemnění, projeví se nám jako vysokonapetová vlna, která se bude šířit po plošném spoji, a v lepším případě dojde k výpadku funkce zařízení.

6.11.2.1. Ochrana I/O svorek

Cílem ochrany I/O svorek před ESD je jakýmkoliv korektním způsobem proudový impulz odvést pryč z plošného spoje do uzemnění. Vzhledem k velkému di/dt je nutné toto učinit na co nejkratší vzdálenosti. Z toho vyplývají jednoznačné požadavky na rozmístění ochranných součástek a způsob vedení spoju.

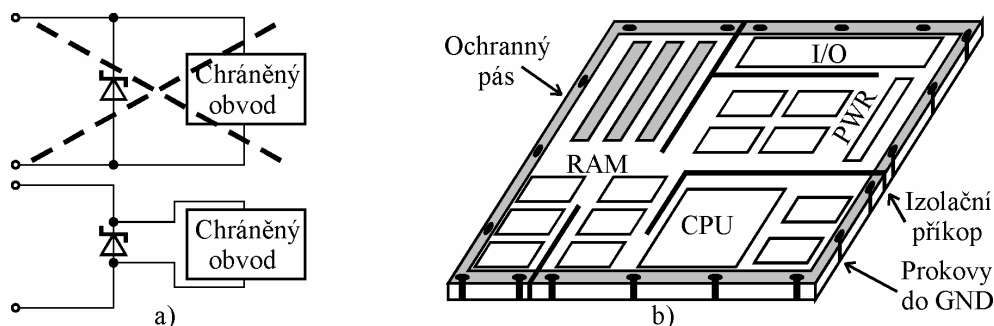
Jednou z možností je použití filtru z *obrázku 6.26*, přičemž je velmi důležité dodržet co nejkratší vzdálenosti mezi I/O konektorem, tlumivkou a elektrodou kondenzátoru. Stejně tak je důležité zkrátit na minimum cestu od záporné elektrody kondenzátoru ke společnému vodiči a jeho připojení ke kostře přístroje.

Velmi často se pro ochranu před ESD užívají různé druhy součástek, většinou nazývaných společným názvem „Voltage Suppressors“. Mezi ne patří například varistory, Zenerovy diody, ESD diody (=obdobu Zenerových diod, určených speciálně pro účely ochrany před ESD)... Pro návrh vedení spoju těchto součástek platí jedno společné pravidlo, v tomto skriptu již mnohokrát uvedené (*obrázek 6.28 a*). Jsou-li na plošném spoji obzvláště citlivé součástky, je vhodné libovolnou ochranu kombinovat s metodou izolačního příkopu. I/O konektory a ochrany jsou umístěny v separátní oblasti a veškeré další součástky až za přemostěním příkopu (*obrázek 6.27 b*). Elektrostatický výboj je odveden na kostru přístroje a nestací se rozšířit do elektronického systému za přemostěním.

6.11.2.2. Ochrana plošného spoje před dotykem

Ochranu plošného spoje před dotykem zajišťuje takzvaný ochranný pás (guard band) [9]. Jedná se o 1 až 3 mm široký vodivý pás okolo celé desky plošného spoje ze strany součástek i ze strany spoju, který je zhruba každých 15 mm propojen pomocí prokovu do vrstvy vodivé plochy GND (*obrázek 6.28 b*). Tato ochrana je vlastně založena na pravděpodobnosti, že se obsluha nebo servisní technik při manipulaci s deskou bude dotýkat spíše okraju než objektu uvnitř desky.

Důležité je ochranný pás přerušit v místě izolačního příkopu a na obou koncích připojit prokovem do GND. Jinak bychom úplně zrušili význam příkopu. Technika ochranného pásu navíc potlačuje bocní vyzařování desky plošného spoje (*obrázek 6.2 c*).



Obr.6.28: Vedení spoju ochranné součástky a), ochranný pás b).

Použité zkratky a symboly

BOT	– označení vrstvy plošného spoje – strana spoju
CPU	– (Central Processor Unit) procesor
EMC	– (Electromagnetic Compatibility) elektromagnetická kompatibilita
ESD	– (Electrostatic Discharge) elektrostatický výboj
FR4	– označení nosného materiálu plošných spoju
G, GND	– označení vrstvy plošného spoje – společný vodič (zem) – označení záporné svorky napájení (společný vodič nebo zem)
HAL	– (Hot Air Levelling) žárové nanesení SnPb pájky
I/O	– vstupne/výstupní obvody (svorky)
P, PWR	– označení vrstvy plošného spoje – napájení
SMD	– (Surface Mounted Devices) součástky pro povrchovou montáž
SMT	– (Surfaces Mounted Technology) technologie povrchové montáže
TOP	– označení vrstvy plošného spoje – strana součástek
VCC	– kladná svorka napájení (zpravidla 5V u číslicových obvodu)
c	– rychlost světla ($3 \cdot 10^8$ m/s)
C	– kapacita [F] nebo [F/m]
C_m	– vzájemná kapacita [F] nebo [F/m]
D, d	– vzdálenost [m]
E	– intenzita elektrického pole [V/m]
f	– kmitočet [Hz]
h	– výška, zde zpravidla tloušťka nosného materiálu plošného spoje [m]
H	– intenzita magnetického pole [A/m]
I	– proud [A]
l	– délka [m]
L	– indukčnost [H] nebo [H/m]
L_m	– vzájemná indukčnost [H] nebo [H/m]
R	– odpor [Ω]
r	– polomer [m]
S	– plocha, průřez [m ²]
t	– tloušťka plošného vodice [m] – čas [s]
t_r, t_f	– doba trvání náběžné a sestupné hrany lichobežníkového impulzu [s]
t_{pd}	– zpoždění průchodu signálu [s/m]
U	– napětí [V]
v	– rychlost [m/s]
w	– šířka plošného vodice [m] nebo [mil]
X_{talk}	– přeslech [dB]
Z, Z_0	– impedance [Ω]
d	– hloubka vniknutí [m] (skin efekt)
ϵ_0	– permitivita vakua ($8,8 \cdot 10^{-12}$ F/m)
ϵ_r	– relativní permitivita [–]
λ	– vlnová délka [m]
μ_0	– permeabilita vakua ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m)
μ_r	– relativní permeabilita [–]
ρ	– merný elektrický odpor ($\rho_{Cu} = 17,8 \cdot 10^{-9}$ Ω.m)

Literatura

- [1] Záhlava, V.: OrCAD pro Windows, praktický průvodce návrháře, Grada Publishing, Praha 1999
- [2] Szendiuch, I.: Mikroelektronické montážní technologie, Nakladatelství VUT, Brno 1997
- [3] SNE 2151 Společná norma pro elektrotechniku – Obrazce pájecích plošek pro povrchovou montáž, konfigurace a konstrukční pravidla, Společné normalizační středisko při Tesla Telekomunikace, Praha 1992
- [4] Mawer A.: Plastic Ball Grid Array, AN1231 – aplikací list, Motorola, 1996
- [5] Durcansky, G.: EMV – gerechtes Gerätedesign: Grundlagen der Gestaltung störungsarmer Elektronik, Franzis-Verlag, München 1992
- [6] Walker, Ch. S. : Capacitance, Inductance, and Crosstalk Analysis, Artech House, Boston 1990
- [7] Tornau, F.: Elektrické rušivé vlivy v zařízeních pro automatizaci a zpracování dat, SNTL, Praha 1978
- [8] Johnson, H. W.: High-Speed Digital Design, A Handbook of Black Magic, Prentice Hall, 1993
- [9] Montrose, M.I.: Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance, IEEE Press, New York 1996
- [10] Montrose, M.I.: EMC and the Printed Circuit Board, IEEE Press, New York, 1998
- [11] Vaculíková, P., Vaculík, E. a kolektiv: Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů. Grada Publishing, Praha 1998
- [12] Mardiguian, M.: Controlling Radiated Emissions by Design, Van Nostrand Reinhold, New York 1992
- [13] Motorola INC., 1989. Designing for Electromagnetic Compatibility (EMC) with HCMOS Microcontrollers (AN1050)
- [14] Stengl, J.P., Tyhanyi, J.: Výkonové tranzistory MOSFET, BEN – technická literatura, Praha 1999