

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ



NAVRHOVÁNÍ A TECHNOLOGIE DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

Ing. David Vala

Ing. Kristýna Friedrischková

Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D.

Ing. Bohumil Horák, ml.

Ing. Ondřej Balák

Ostrava 2013



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

Název: NAVRHOVÁNÍ A TECHNOLOGIE DESKY PLOŠNÉHO SPOJE
Autoři: Ing. David Vala, Ing. Kristýna Friedrichková, Doc. Ing. Bohumil Horák,
Ph.D., Ing. Bohumil Horák, ml., Ing. Ondřej Balák
Vydání: první, 2013
Počet stran: 224
Náklad: 5
Jazyková korektura: nebyla provedena.



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.



Název: Modernizace výukových materiálů a didaktických metod
Číslo: CZ.1.07/2.2.00/15.0463
Realizace: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

© Ing. David Vala, Ing. Kristýna Friedrichková, Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D., Ing. Bohumil Horák, ml., Ing. Ondřej Balák

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3062-9



MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD
CZ.1.07/2.2.00/15.0463

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ**



NAVRHOVÁNÍ A TECHNOLOGIE DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

TECHNOLOGIE PROPOJENÍ SOUČÁSTEK V SYSTÉMU PLOŠNÉHO SPOJE

Ing. David Vala
Ing. Kristýna Friedrischková
Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D.
Ing. Bohumil Horák, ml.
Ing. Ondřej Balák

Ostrava 2013

© Ing. David Vala, Ing. Kristýna Friedrischková, Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D., Ing.
Bohumil Horák, ml., Ing. Ondřej Balák

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3062-9



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

1	TECHNOLOGIE PROPOJENÍ SOUČÁSTEK V SYSTÉMU PLOŠNÉHO SPOJE	4
1.1	Úvod	5
1.1.1	Požadavky na materiály pro plošné spoje	5
1.2	Mechanické vlastnosti.....	6
1.2.1	Materiály pro desky plošných spojů	7
1.2.2	Mechanické vlastnosti	7
1.2.3	Tloušťka měděné fólie.....	8
1.2.4	Elektrické vlastnosti	8
1.2.5	Elektroizolační vlastnosti (šířka vodiče a izolační mezery)	9
1.2.6	Parazitní kapacita a indukčnosti.....	10
1.3	Základní vlastnosti materiálů desek plošných spojů	10
1.3.1	Elektrické vlastnosti	11
1.4	Základní materiály desek plošných spojů.....	15
1.4.1	Materiály na organické bázi	15
1.4.2	Neohebné základní materiály	16
1.5	Základní materiály pro flexibilní (ohebné) plošné spoje.....	20
1.5.1	Ohebné plošné spoje	20
1.6	Typy neohebných desek plošných spojů	23
1.6.1	Neohebné desky plošných spojů z hlediska jejich konstrukce.....	23
1.6.2	Desky plošných spojů jednovrstvé, dvouvrstvé a vícevrstvé	24
1.6.3	Desky plošných spojů s nosnou deskou.....	24
1.7	Výroba desek plošných spojů.....	30
1.7.1	Příprava výrobní dokumentace.....	30
1.7.2	Výroba plošných spojů subtraktivní metodou	30
1.7.3	Jednotlivé kroky výroby desky plošných spojů	31
1.7.4	Nepájivá maska při výrobě plošných spojů	38
1.7.5	Zapouzdření povrchu plošného spoje	39
1.7.6	Závěrečná povrchová úprava	43
1.7.7	Konečné mechanické operace.....	44
1.7.8	Elektrické testování.....	44
1.7.9	Výroba plošných spojů semiaditivní metodou	44
1.7.10	Výroba plošných spojů aditivní metodou	44



1.8	Literatura.....	46
------------	------------------------	-----------



1 TECHNOLOGIE PROPOJENÍ SOUČÁSTEK V SYSTÉMU PLOŠNÉHO SPOJE



OBSAH KAPITOLY:

Obsahem tohoto dokumentu je uvedení do problematiky výroby plošného spoje, jejich elektrickými a mechanickými vlastnostmi. Dále se studenti seznámí se základními materiály na výrobu plošného spoje a postupem výroby plošného spoje.



MOTIVACE:

Aby student mohl úspěšně absolvovat fakultu elektrotechniky a informatiky musí mít nutně znalosti o této technologii neboť je základem technologií na který nadále bude pracovat.



CÍL:

Cílem tohoto dokumentu je seznámit v krátké formě čtenáře s problematikou technologie návrhu plošného spoje a to od výběru vhodného materiálu přes definice použitého materiálu až k samotné technologii výroby plošného spoje.



1.1 ÚVOD

V elektronice používá pro mechanické připevnění a současně pro elektrické propojení elektronických součástek. Součástky jsou propojeny vodivými cestami vytvořenými leptáním z měděných folií nalepených na izolační laminátové desce, nejčastěji typu FR4 (skelný laminát, plátovaný měděnou folií). Samotné součástky jsou na DPS připájeny za své vývody cínovou pájkou.

Klasická provedení součástek mají vývody ve formě drátů nebo kolíčků. Ty se obvykle prostrčí otvory v DPS a na opačné straně, než byla součástka vložena do DPS se připájely k spojům, vytvořených vrstvou mědi. V současnosti se při sériové výrobě používá velmi často technologie povrchové montáže (surface-mount technology, SMT). Součástky pro povrchovou montáž (surface-mount device, SMD) mají na svém povrchu kontaktní plošky, za které se připájí na stejnou stranu DPS, na které jsou osazeny. To umožní i osazení desek součástkami z obou stran.

Desky plošných spojů v dnešní době umožňují výrobu levných a přitom dostatečně robustních elektronických zařízení.

Protože současné součástky mají desítky i stovky vývodů, nebylo by možné je dobře propojit na jednoduché desce plošných spojů. Proto byly vyvinuty oboustranné DPS, které mají vodivý obrazec z obou stran a následně vícevrstvé DPS.

Vícevrstvé DPS vznikají slepením několika tenkých oboustranných DPS. U dvou- nebo vícevrstevných DPS se musí prokovovat průchody mezi vrstvami. DPS se běžně opatřují nepáživou maskou. To je poloprůhledná izolační vrstva typicky zelené barvy. Nechává odkryté jen pájecí plošky, zbytek vodivých cest zakrývá a zlepšuje tak izolační vlastnosti desky, současně brání poškození vodivých cest. Pro orientaci při kontrole, opravách nebo nastavování se na nepáživou masku často tiskne servisní potisk. Vyznačuje umístění součástek a jejich označení dle elektrického schématu.

Protože ruční návrh plošných spojů by byl u složitějších obvodů extrémně časově náročný, přičemž by snadno mohlo docházet k chybám dále prodražujícím vývoj, používají se pro návrh systémy CAE, usnadňující vývoj. Vývojář nejprve vytvoří schéma zapojení, ze kterého se vygeneruje seznam spojů (netlist). Jiný program (autorouter) může na základě tohoto netlistu vytvořit předlohu pro výrobu DPS.

1.1.1 POŽADAVKY NA MATERIÁLY PRO PLOŠNÉ SPOJE

Materiály určené pro plošné spoje musí vyhovovat požadavkům na jejich elektrické a mechanické vlastnosti.

Důležitými elektrickými vlastnostmi jsou:

- elektrická rezistivita,
- elektrická pevnost,
- relativní permitivita ϵ_r ,
- ztrátový činitel $\tan \delta$.

V závislosti na konkrétní aplikaci je možné sledovat i další parametry (např. odlišné požadavky budou na desky s plošnými spoji používané pro nf a vf obvody).



1.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Tepelná odolnost – deska plošného spoje je v průběhu pájení součástek po dobu několika sekund vystavena teplotám vyšším než 200°C, např. 250°C až 280°C. Desky jsou rovněž ohřívány při provozu, což má vliv na stárnutí materiálu.

Průhyb desky;

Ztráta pevnosti laminátu;

Teplotní roztažnost materiálu v podélném směru;

Poznámka: Při pájení součástek dochází k ohřevu desky i součástek. To se projevuje zejména při pájení součástek SMD. Při ohřevu a následném chladnutí není u SMD součástek pnutí, které vzniká v důsledku různé tepelné roztažnosti desky a součástek redukováno pružností vývodů jako je tomu při pájení klasických součástek. Při nevhodně zvoleném materiálu může být vzniklé pnutí tak velké, že dojde k prasknutí součástky, případně k odtržení spoje od povrchu desky.

Relativní změna rozměru materiálu je dána vztahem:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = TCE \cdot \Delta v \quad (1)$$

, kde

Δl je změna rozměru při změně teploty,

L_0 je rozměr materiálu při počáteční teplotě v_0 ,

TCE je koeficient teplotní roztažnosti - je udáván v ppm/°C ($\text{ppm} = 10^{-6}$), $TCE = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot \frac{1}{\Delta v}$, (2)

(TCE – Temperature Coefficient of Expansion) – důležitý je koeficient teplotní roztažnosti pro podélné osy, tam, kde jsou používány prokovené otvory, je nutné počítat i s roztažností příčnou,

Δv je konečné a počáteční teploty.

Následující tabulka uvádí délkové roztažnosti používaných materiálů ve směru os x a y.

Pouzdra a podložky	TCE _{xy} [ppm/°C]
Plastová pouzdra	20 až 23
Keramická pouzdra	5,4 až 6,7
Laminát FR-4	12 až 24
Laminát FR-4 vícevrstvý	14 až 24
FR-4 s kovovým jádrem (INVAR plátovaný mědí)	8,6 až 14
Keramické vícevrstvé desky	6,0 až 8,3
Laminát Epoxy – Kevlar	6,0 až 7,0

Tab. 1 Délkové roztažnosti materiálů v osách x a y.

Aby nevznikalo mechanické pnutí, měl by mít materiál použitý k výrobě desky přibližně stejnou teplotní roztažnost jako pájené součástky.

Z tohoto hlediska je vhodné použití materiálu FR-4, na který mohou být bezpečně osazovány miniaturní pasivní čipové i MELF součástky s keramickým nosičem až do velikosti 10 mm, dále integrované obvody v plastových pouzdrech typu SO, PLCC, FLAT-PACK apod.



1.2.1 MATERIÁLY PRO DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

Volba materiálu desky plošných spojů je důležitá pro výslednou spolehlivost celého výrobku. Výrobek, a tím i deska plošných spojů je vždy vystavena určitým okolním vlivům. Tyto externí vlivy je třeba předpokládat a podle nich volit základní materiál desky plošných spojů. Rovněž je třeba volit materiál podle požadavků elektrického obvodu umístěného na desce, např. v obvodu.

Optimálním materiálem pro desky plošných spojů je vrstvený izolant - laminát. Výztuži jsou dány mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku, v tahu a v ohybu), tvarové (rozměrové) vlastnosti v daném teplotním rozsahu a odolnost proti chemicky agresivnímu prostředí. Vyztužujícím materiálem bývá papír nebo vlákno (tkané nebo sekané). Druhou složkou laminátu je pojivo. Úlohou pojiva je přenášet mechanické namáhání rovnoměrně na všechny strany výztuže, chránit ji před mechanickým poškozením a před účinky chemikálií. Používají se různé pryskyřice. Výhodou je možnost kombinace obou složek - výztuže a pojiva, a tím ovlivnění vlastností laminátu. Požadované vlastnosti se kontrolují zkušebními metodami pro desky plošných spojů, které jsou obsaženy v ČSN EN 61189-3 a ČSN EN 61189-3:1998.

Doporučené tloušťky výsledné desky plošných spojů (jednovrstvé a dvouvrstvé) jsou: 0,2 - 0,5 - 0,7 - 0,8 - 1,0 - 1,2 - 1,5 - 1,6 - 2,0 - 2,4 - 3,2 - 6,4 mm.

MĚDĚNÁ FÓLIE DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

Základní materiál je pokryt měděnou fólií elektrolyticky vyráběnou o čistotě 99,5%. Fólie se vyznačuje dobrou adhezí k povrchu laminátu, která je podmíněna drsností povrchu a vysokou pružností.

Na měděnou fólii jsou kladeny požadavky, kterým musí odpovídat její vlastnosti. K základním vlastnostem fólie plošných spojů patří:

- mechanické:
 - pevnost v loupání měděné fólie,
 - tloušťka fólie,
- elektrické:
 - proudová zatížitelnost plošných měděných spojů,
 - elektroizolační vlastnosti (šířka vodiče a mezery),
 - parazitní kapacita a indukčnosti.

1.2.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

PEVNOST A LOUPÁNÍ MĚDĚNÉ FÓLIE

Měděná fólie musí mít dostatečnou adhezí, aby nedocházelo při technologické operaci (pájení) k jejímu odloupení. Odolnost se měří jako síla na jednotku šířky, která se vyžaduje k odloupení plošného spoje od povrchu základního materiálu. Zkouší se při dodání, po působení rozpouštědel, galvanických roztoků, a při tepelném namáhání.

Běžné hodnoty pro různé materiály jsou následující (vodiče široké 0,8 mm a více):

- | | |
|--|-----------|
| • papír impregnovaný fenolickou pryskyřicí (FR2) | 0,8 N/mm, |
| • papír a epoxid (FR3) | 1,1 N/mm, |
| • skelný laminát a epoxid (FR4) | 1,1 N/mm |



1.2.3 TLOUŠŤKA MĚDĚNÉ FÓLIE

Tloušťky fólie se vyjadřují ve váze Cu na čtverečnou stopu, tj. oz/ft². Běžnou tloušťkou je 1 oz/ft², což je přibližně 35μm, pro SMT 0,5 oz/ft², 18 μm, Silnější fólie mají 2 oz/ft² (70 μm), ty se používají např. v automobilovém průmyslu.

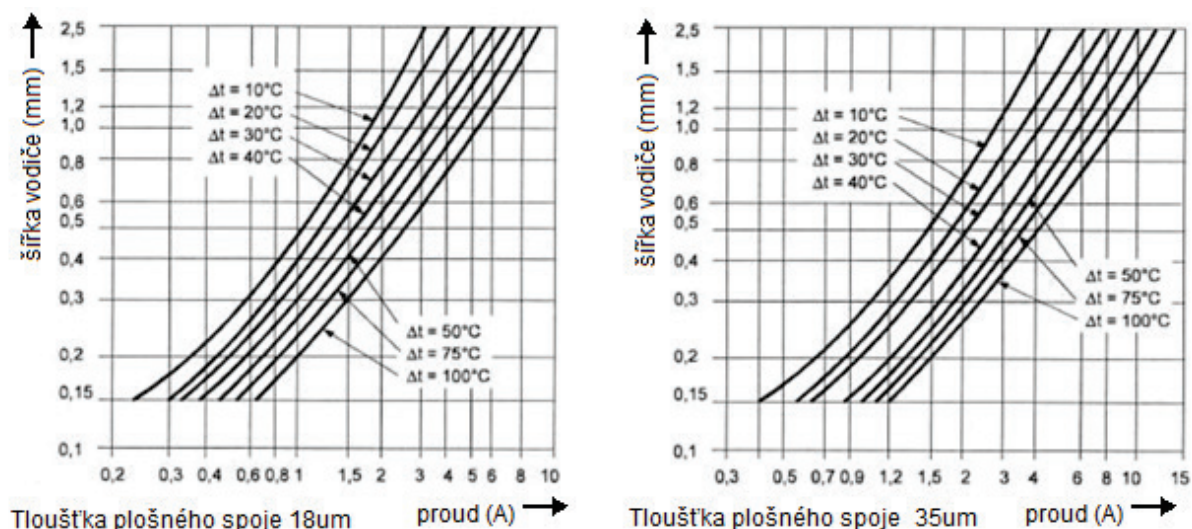
1.2.4 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI

PROUDOVÁ ZATÍŽITELNOST

Tato vlastnost je důležitá pro konstrukci obrazce plošných spojů. Plošné spoje mají vyšší proudovou zatížitelnost než drátové spoje. Důvodem je podstatně vyšší ochlazovací plocha plošného spoje. Na proudové zatížení má rovněž vliv tloušťka Cu fólie a základní materiál (odvod tepla). Tabulka orientačně ukazuje závislost mezního proudu, při kterém se spoj přetaví, a dovoleného trvalého proudu na šířce plošného spoje.

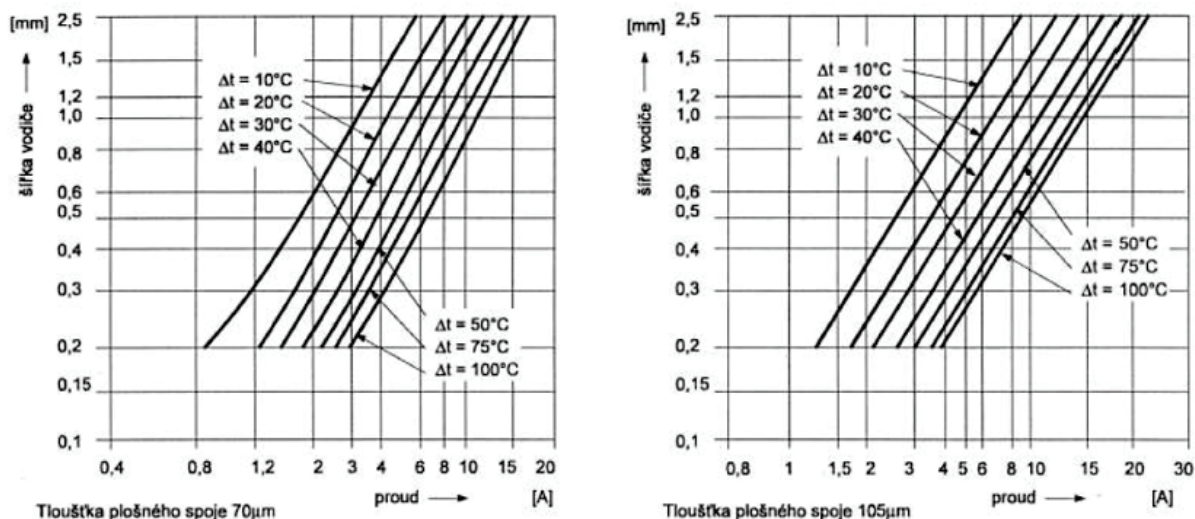
Šířka plošného spoje [mm]	Mezní proud [A]	Dovolený proud [A]
1,0	5	0,8
1,5	10	1,2
2,0	12	1,6
3,0	15	2,4
6,0	23	4,8

Tab. 2 Zatížitelnost plošného spoje o tloušťce 35μm.



Obr. 1 Proudová zatížitelnost pro tloušťky měděné fólie - plošného spoje 18μm a 35μm



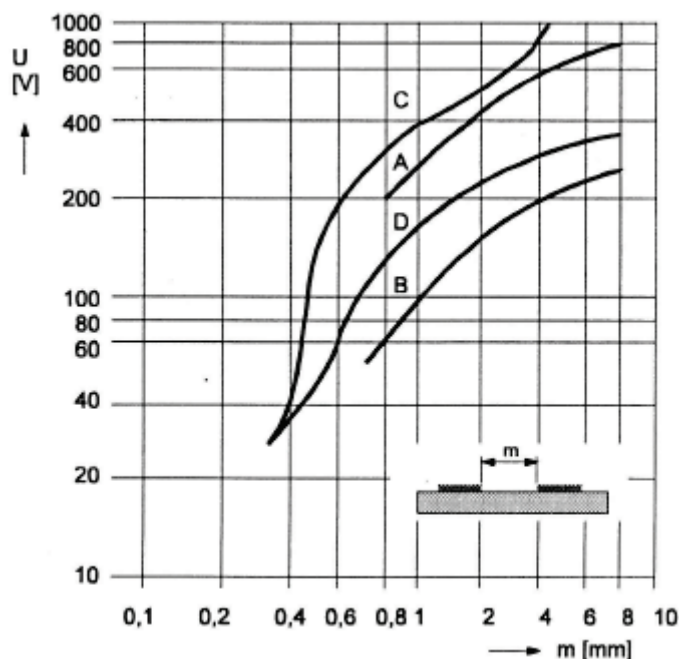


Obr. 2 Proudová zatížitelnost pro tloušťky měděné fólie – plošného spoje 70µm a 150µm.

Obecně platí, že proudová zatížitelnost plošných spojů je asi 5x vyšší než u klasických vodičů. Pro stanovení celkové teploty spojů je třeba přičíst k teplotě, o kterou se zvýší teplota spoje, rovněž teplotu, ve které bude deska plošných spojů pracovat. Teplota dlouhodobě nesmí překročit teplotu skelného přechodu (T_g viz dále) základního materiálu desky plošných spojů.

1.2.5 ELEKTROIZOLAČNÍ VLASTNOSTI (ŠÍŘKA VODIČE A IZOLAČNÍ MEZERY)

Mezery by měly být tak veliké, aby byly splněny požadavky elektrické bezpečnosti a usnadňovaly výrobu desky a její montáž. Čím je mezera užší, tím mohou vznikat problémy při leptání, nanášení nepájivé masky, vzniku můstků při pájení atd. Na druhé straně, pokud jsou mezery široké, zvětšuje se rozměr desky, a tím rozměr finálního výrobku. Konstruktor musí vědět, jaké mezery jsou únosné pro výrobu a následné zpracování desky plošných spojů. Graf ukazuje závislost napětí mezi spoj i na velikosti mezery při různých atmosférických výškách.



Obr. 3 Závislost jmenovitého napětí mezi plošnými spoji na šířce izolační mezery (tloušťka Cu fólie 35 μ m). A - spoje nelakované, do výšky 3 000m, B - spoje nelakované, do výšky 15 000m, C - spoje lakované, do výšky 3 000m, D - spoje lakované, do výšky 15 000m.

1.2.6 PARAZITNÍ KAPACITA A INDUKČNOSTI

Mezi plošnými spoji, vrstvami a stíněním se projevují parazitní kapacity a indukčnosti. Velikost je dána velikostí překrývajících ploch, vzdáleností mezi nimi a základním materiálem (relativní permitivita základního materiálu). Tato problematika je poměrně obsáhlá a specifická a přesahuje rámec této publikace. Pro informaci je uvedena kapacita dvou souběžných vodičů o šířce 0,5 mm na FR4.

Šířka mezery [mm]	Kapacita [pF/cm]
0,5	0,4
2,0	0,3
5,0	0,15

Tab. 3. Kapacita dvou souběžných vodičů o šířce 0,5 mm na FR4.

1.3 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ

Konstruktor obrazce desky plošných spojů by měl vědět, co od výsledné osazené a zapájené desky očekává, neboli jak bude umístěný elektrický obvod pracovat při různých klimatických podmínkách. Tabulka představuje typické konstrukční parametry, které je nutno při návrhu sledovat, včetně odpovídajících vlastností.



Sledované konstrukční parametry desky plošných spojů s el. obvodem	Vlastnosti desky plošných spojů								
	Teplota skelné přeměny Tg	TCE	Tepelná vodivost	Modul roztažnosti	Modul pružnosti	Dielek. konstanta	Odpor na objem	Povrchový odpor	Pohltivost vlhkosti
Teplovní a výkonové cykly	X	X	X	X					
Vibrace				X	X				
Mechanický náraz				X	X				
Teplota a vlhkost	X	X				X	X	X	X
Ztrátový výkon el. obvodu	X		X						
Velikost SMD pouzder		X		X					
Hustota el. obvodu						X	X	X	
Přenosová rychlost el. obvodu						X	X	X	

Tab. 4 Požadavky na desku plošných spojů s elektrickým obvodem. V levém sloupci jsou požadované parametry konstrukce desky plošných spojů s elektrickým obvodem a v ostatních sloupcích jsou korespondující vlastnosti vlastní desky plošných spojů.

Z předcházející tabulky je patrné, že u desek plošných spojů se sledují následující tři kategorie vlastností:

- elektrické,
- tepelné,
- mechanické.

Na úvod je uveden přehled typických vlastností desek plošných spojů. Se stále vyššími požadavky na kvalitu základního materiálu se zvyšuje počet zkoušek, které dokonale prověří požadované vlastnosti desek. Vlastnosti se ověřují přesně definovanými zkouškami. Všechny zkušební metody uvádí ČSN EN 60249-1, ČSN 61189-2.

1.3.1 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI

Deska plošných spojů musí mít takové elektrické vlastnosti, aby elektrický obvod, který je na ní umístěn, pracoval přesně tak, jak jej navrhl konstruktér. Výrobci sledují a udávají následující skupinu vlastností.

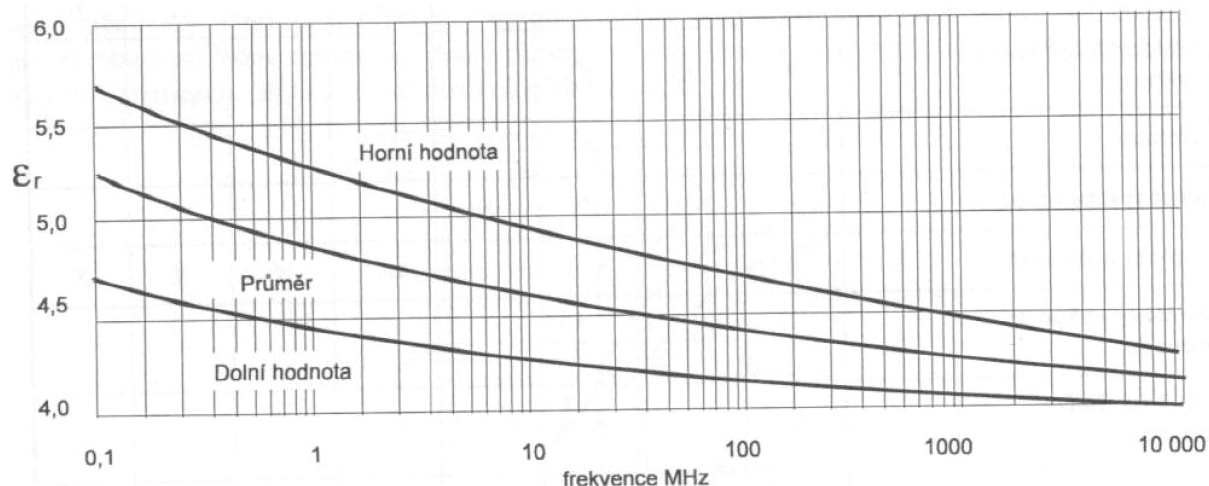


Vnitřní a povrchová rezistivita

Určuje práh vodivosti a zkratu.

RELATIVNÍ PERMITIVITA

Vyjadřuje míru polarizace základního materiálu. Závisí na frekvenci, teplotě, obsahu vlhkosti a složení základního materiálu a ovlivňuje kapacitní vazby obvodů. Relativní permitivita je jeden z prvků, který je běžně sledován konstruktérem při výběru materiálu pro desku plošných spojů. Graf vyjadřuje závislost relativní permitivity na frekvenci pro laminát (skloepoxid v hmotnostním poměru 40:60). Relativní permitivita se snižuje při vzrůstání podílu skelné složky.



Obr. 4 Závislost relativní permitivity na frekvenci (pro skloepoxidový laminát). Výrobci obvykle udávají dielektrické vlastnosti při 1 MHz.

Platí, že kvalitnější základní materiály mají nižší permitivitu.

Ztrátový činitel

Ztrátový činitel je míra dielektrických ztrát. Závisí na frekvenci a teplotě, ovlivňuje útlum signálů a ztráty vedením.

Průrazné napětí

Charakterizuje schopnost materiálu zachovávat elektroizolační stav, tj. bezpečnou vzdálenost mezi jednotlivými vodivými vrstvami desek plošných spojů.

Povrchový izolační odpor

Charakterizuje kvalitu izolace. Obvyklá hodnota je 10^9 až $10^{10} \Omega$.

Tepelné vlastnosti

Přizpůsobení činitele tepelné roztažnosti (TCE) desky plošných spojů.

Vzhledem k tomu, že keramický materiál má TCE asi 5-7 ppm/°C a běžné desky plošných spojů (epoxid-sklo) od 15 do 20 ppm/°C, jsou pájené spoje při tepelných cyklech vystaveny značnému tepelnému namáhání (při pájení vlnou i přetavením). Tato skutečnost vedla k rozsáhlému hledání různých materiálů pro základní materiál anebo metod, jak zabránit základnímu materiálu v jeho normální roztažnosti. Příklady jsou uvedeny dále.



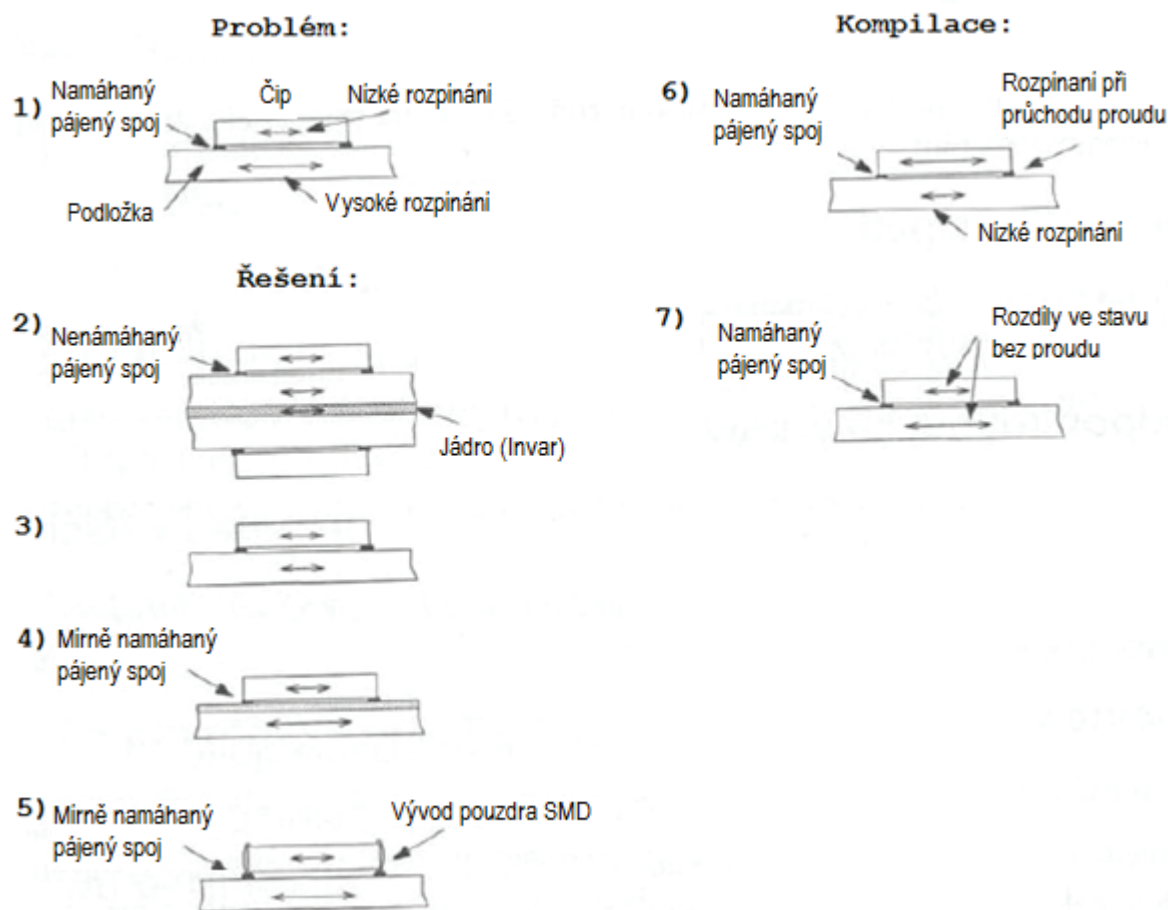
Protože problém tepelné roztažnosti je pro konstrukci desky plošných spojů li závažný, je popsán podrobněji. Rozdílný činitel TCE se projevuje především u bezvývodových pouzder SMD, proto požadavky na spolehlivost vyžadují, aby desky plošných spojů s bezvývodovými keramickými pouzdry SMD byly podrobeny teplotním cyklům v peci. Pokud se roztažnost pouzdra rovná roztažnosti desky plošných spojů, je zatížení pájených spojů minimální.

Problém je znázorněn na následujícím obrázku v části (I), jako nepřizpůsobení TCE při použití běžných materiálů. Deska se rozpíná více než pouzdro, čímž se namáhají pájené spoje. V části (2) se roztažnost desky s vysokým TCE vyrovnává jádrem z materiálu s nízkým TCE, jako je např. Invar (slitina železa a 35,6% niklu). Podobná koncepce je v části (3). Zde je vyrovnávacím materiálem Kevlar (nebo křemenné vlákno). V části (4) pružná nebo poddajná horní vrstva laminátu do značné míry zachycuje zatížení pájených spojů.

Vývodová pouzdra (5) poskytují nejlepší ochranu součástkám i pájeným spojům při ohybu desky. Vývody součástek do jisté míry pruží a tím podstatně snižují riziko poškození spoje.

Komplikace mohou rovněž vznikat nestejným zahříváním při střídání stavů pod proudem a bez proudu (6). Během stavu pod proudem se nosiče čipu zahřívají a roztahují rychleji než podložka. Pájené spoje jsou tak silně namáhány, a to i tehdy, jsou-li činitele TCE nosiče a podložky přizpůsobeny. Při trvalém provozu bude pouzdro ohříváno čipem integrovaného obvodu také vždy teplejší než deska. Laminát s přizpůsobeným TCE, jehož TCE je mírně vyšší než TCE nosiče čipu, nebude v těchto podmínkách namáhat pájené spoje vůbec. Avšak při ochlazování (7) bylo zkouškami prokázáno, že keramické pouzdro SMD chladne rychleji než deska plošných spojů. To opět vyvolává námahu pájeného spoje ve směru opačném, než při zahřívání. Tato opakovaná namáhání pájených spojů smykem jsou předmětem pozornosti hlavně u zařízení, kde se střídají stavy zapnuto-vypnuto. Řešením je kombinace vhodných materiálů.





Obr. 5 Nepřizpůsobení činitelů TCE.

Teplota skelného přechodu T_g (Glass Transition Temperature)

Charakterizuje teplotu, při které dochází k výrazným změnám TCE a deska plošných spojů přechází z elastického stavu do plastického stavu.

Tepelná odolnost při pájení

Deska plošných spojů musí být zpracována určitým druhem pájení (ručním, vlnou nebo přetavením) a odolat delaminaci.

Trvalá tepelná odolnost

Uvádí se po 100 - 500 hodinách provozu desky plošných spojů, Určuje oblast použití desek.

Tepelná vodivost

Množství tepelné energie tekoucí mezi plochami ve směru x je přímo úměrné teplotnímu gradientu ve směru x , ploše S a koeficientu tepelné vodivosti l .

Hořlavost

Určuje schopnost materiálu nepodporovat zapálení nebo oheň způsobený náhodným přehřátím elektronickou součástkou (samozhášivost).



MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Mez pevnosti v ohybu

Charakterizuje mechanickou pevnost desek plošných spojů K, poškození zapájené desky plošných spojů SMD může dojít při jejím ohnutí. Problém je možné řešit tím, že deska plošných spojů bude vyrobena inherentně neohebná. Mnoho moderních konstrukcí záležitost řeší připojením desky plošných spojů ke kovové desce nebo kovovému jádru. Tento způsob dává dostatečně pevnou strukturu, zajišťující minimální ohyb během následné manipulace. Velké desky plošných spojů bez takové kovové podpěry by se měly po pájení ukládat do speciálních boxů a upevňovacích přípravků, aby nedocházelo ke zborcení a zabránilo se ohybu desek při manipulaci, testování apod.

Rovinnost, prohnutí, zkroucení

Stav desek při dodání a po zpracování. Určuje snadnost zpracování materiálu, použitelnost při montáži součástek. Tyto vlastnosti mají význam hlavně při osazování SMD.

Rozměrová stabilita

Zjišťují se změny rozměru, ke kterým došlo během výrobních operací. Sleduje se tepelná roztažnost v obou směrech a v tloušťce materiálu, smrštění po ochlazení a po odleptání Cu fólie, zachování rozměrů po pokovení atd.

Nasákavost vodou

Ovlivňuje způsob použití materiálu a určuje použití desek plošných spojů z hlediska klimatického, elektrického a tepelného namáhání. Měří se hmotnost vody absorbované deskou plošných spojů ponořené do vody.

1.4 ZÁKLADNÍ MATERIÁLY DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ

Rozsah typů desek plošných spojů sahá od jednoduchých jednovrstvých desek plošných spojů až po velmi složité struktury s jádrem. Základní materiály desek plošných spojů obecně spadají do jedné ze dvou základních kategorií, a to:

- organický základní materiál,
- neorganický základní materiál.

Dále je možné materiály dělit na neohebné a ohebné. Neohebné desky plošných spojů lze dělit z hlediska jejich konstrukce na:

- jednovrstvé, dvouvrstvé a vícevrstvé,
- s nosnou deskou,
- s omezovacím jádrem.

1.4.1 MATERIÁLY NA ORGANICKÉ BÁZI

Tyto materiály používané jako neohebné desky plošných spojů se skládají z organické pryskyřice (termosety) a výztuže (příp. bez výztuže). Pro ohebné desky plošných spojů se jako pojivo používají termoplasty.

Výztuž určuje mechanické vlastnosti materiálů a používá se:

- skleněné vlákno (tkanina, rohož),



Vlákno se vyrábí z elektrotechnického skla. Používá se AI-Si-B bezalkalické hlinitoboritikřemičité sklo s relativní permitivitou 5,8 - 6,3. Označuje se jako E-sklo. Tkanina je z tkaného skelného hedvábí získaného ze skleněného vlákna. Rozděluje se na dvě skupiny: standardní v tloušťce 0,1 - 0,2 mm a velmi jemná v tloušťce 0,02 - 0,1 mm. (Standardní má plošnou hustotu 100 - 240 gm^{-2} a jemná 20 - 100 gm^{-2}) Příkladem je tuzemský materiál UMATEX 222 typ FR4 tl. 1,5 mm složený z 8 vrstev skleněné tkaniny.

- tvrzený papír,

Papír pro tyto účely se vyrábí ze sulfátové buničiny. Mezi sledované parametry patří struktura, navlhavost, pórovitost, hustota, povrch, tloušťka a rovnoměrnost tloušťky. Papír se vyrábí v tloušťkách od 5 μm do 150 μm . Laminuje se pryskyřicí za působení tlaku, času, teploty a vhodné úrovně vakua.

- křemenné vlákno,
- uhlíkové vlákno,
- aramidové vlákno.

Pojivo je na polymerní bázi. Používají se reaktoplastové pryskyřice a termoplasty.

Reaktoplastové pryskyřice:

- fenolformaldehydové pryskyřice,
- epoxidové pryskyřice,
- polyesterové pryskyřice,
- polyimidové pryskyřice,
- bismaleinimidové pryskyřice (BT),
- kyanátestery (CE).

Termoplasty:

- polyeterimid,
- polytetrafluoretylen (PTFE),
- polyimidové pryskyřice,
- polyétersulfon,
- lineární polyester - polyetylentereftalát (PET),
- lineární polyester - polyetylnaftalát (PEN).

1.4.2 NEOHEBNÉ ZÁKLADNÍ MATERIÁLY

Neohebné základní materiály jsou nejběžnější při používání SMD. Ne vždy jsou vhodné pro bezvývodové SMD, kvůli tepelné roztažnosti mezi pouzdem a deskou plošných spojů. Jejich použití může být také omezeno kvůli rovinnosti, tuhosti a požadavkům na tepelnou vodivost. Ale i dnes například lisovaný fenolický papír (př. FR-2), který nemá ideální vlastnosti pro SMT, má využití v komerčních zařízeních jako jsou televize, rozhlasové přijímače atd., právě díky své velmi nízké ceně.

Základní materiál pro desky plošných spojů se ve většině případů značí podle normy NEMA (americké sdružení výrobců - National Electrical Manufacturers Association). Typické označení je FR (Flame Resist). Například FR-2 jsou nejjednodušší desky z fenolického papíru. Desky na bázi epoxidové pryskyřice s papírovou výztuží se označují FR-3, se skleněným vláknem FR-4 nebo FR-S.

Tabulka představuje značení a složení běžných typů desek plošných spojů.



Označení	Pojivo	Výztuž
NEMA		
X	Fenolformaldehydová pryskyřice, 35%	Papír
Xp	Fenolformaldehydová pryskyřice	Papír
XPC	Fenolformaldehydová pryskyřice	Papír
XX	Fenolformaldehydová pryskyřice, 45%	Papír
XXP	Fenolformaldehydová pryskyřice	Papír
XXX	Fenolformaldehydová pryskyřice, 58%	Papír
XXXP	Fenolformaldehydová pryskyřice	Papír
XXXPC	Fenolformaldehydová pryskyřice	Papír
C	Fenolformaldehydová pryskyřice	Bavlna
CE	Fenolformaldehydová pryskyřice	Bavlna
L	Fenolformaldehydová pryskyřice	Bavlna
LE	Fenolformaldehydová pryskyřice	Bavlna
G-3	Fenolformaldehydová pryskyřice	Skelná tkanina
G-5	Melaminové pryskyřice	Skelná tkanina
G-7	Silikonový materiál	Skelná tkanina
G-9	Melaminové pryskyřice	Skelná tkanina
G-10	Epoxidová pryskyřice	Skelná tkanina
G-11	Epoxidová pryskyřice	Skelná tkanina
FR-1	Fenolformaldehydová pryskyřice	Papír
FR-2	Fenolformaldehydová pryskyřice	Papír
FR-3	Epoxidová pryskyřice	Papír
FR-4	Epoxidová pryskyřice	Skelná tkanina
FR-5	Epoxidová pryskyřice	Skelná tkanina
FR-6	Polyesterová pryskyřice	Skelná rohož
CEM-1	Epoxidová pryskyřice	Jádro-papír + skelná tkanina
CEM-3	Epoxidová pryskyřice	Jádro-skelná rohož + skelná tkanina
GPO-2	Polyesterová pryskyřice	Jádro-skelná rohož + skelná tkanina
GPO-3	Polyesterová pryskyřice	Jádro-skelná rohož + skelná tkanina
GPY	Polyimidové pryskyřice	Skelná tkanina

Tab. 5 Označení a základní složení základních materiálů dle NEMA. Označení FR je pro nehořlavé provedení.



V ČR vyrábí plátované organické materiály ALIACHEM Pardubice - Semtín. Cu fólie mají tloušťku 17,35,70 µm. Vyrábí se pod obchodním názvem UMACLAD 2P (FR-2) a UMATEX 222 (FR-4).

Následuje přehled základních materiálů, které se běžně používají.

MATERIÁLY NA BÁZI FENOLICKÝCH PRYSKYŘIC

Papír napuštěný fenolfonnaldehydovou pryskyřicí a lisovaný za tepla se stále používá ve velmi jednoduchých aplikacích (asi 35% světové produkce). U těchto aplikací se předpokládá kratší doba životnosti a velmi nízká cena. Materiál má relativně dobré elektrické vlastnosti kromě odolnosti vůči elektrickému oblouku. Mezi nevýhody patří větší navlhavost.

EPOXID - SKLENĚNÉ VLÁKNO

Epoxid vyztužený skleněným vláknem se široce používá u konvenčních desek plošných spojů s pokovenými otvory a plošnými spoji. Nepřízpůsobení tepelné roztažnosti s bezvývodovými keramickými SMD omezuje použití tam, kde je počet vývodů vysoký, kde se vyžadují tepelné nebo výkonové cykly s velkými rozdíly teplot nebo velkým počtem cyklů, nebo kde se vyžaduje kombinace velkého počtu vývodů a tepelných cyklů. Typickým materiálem této kategorie je FR-4.

POLYIMID - SKLENĚNÉ VLÁKNO

Desky plošných spojů z polyimidu, vyztuženého skleněným vláknem, mají lepší tepelnou odolnost než skloepoxid (200°C) a nižší součinitel tepelné roztažnosti. Zde je třeba omezit se na použití vývodových SMD a bezvývodové SMD používat pouze s nižším počtem přípojných kontaktů. Jestliže se vyžaduje tepelný náraz nebo tepelné cykly ve velkém rozsahu teplot v kombinaci s prodlouženou životností.

EPOXID - ARAMIDOVÉ VLÁKNO

Desky plošných spojů z epoxidu zesíleného aramidovým vláknem mají TCE, který se těsně blíží TCE keramické pouzdra SMD, takže desky plošných spojů tohoto typu jsou vhodné pro keramické SMD s velkým počtem vývodů a tam, kde se vyskytují teplotní cykly s velkými extrémními teplotami. Vlivem namáhání, které vzniká mezi vlákny a pryskyřicí během teplotních cyklů, se na povrchu desky mohou tvořit mikroskopické trhliny. U určitých pryskyřičných systémů je možno vznik těchto trhlin snížit na minimum. Hygroskopičnost je vyšší než u skloepoxidových materiálů, což může vést k potížím při zpracování. Problém hygroskopičnosti v terénních podmínkách se řeší utěsněním prostoru s deskou plošných spojů nebo opatřením ochranného povlaku desky plošných spojů.

POLYIMID - ARAMIDOVÉ VLÁKNO

Vyšší odolnost vůči teple dovoluje bezproblémové opravy kontaktními horkými nástroji i větší počet tepelných cyklů s větším rozsahem mezních hodnot. Nízká roztažnost vose Z zlepšuje spolehlivost průchozích otvorů v desce plošných spojů. Stejně jako li předchozího materiálu i zde existuje problém s pohlcováním vody a tvořením mikrotrhlin. Díky nízkému TCE je tento materiál ideální pro pouzdra s vysokým počtem vývodů a tam, kde se předpokládají extrémní podmínky ve spojení s požadavkem dlouhé životnosti.



POLYIMID - KŘEMENNÉ VLÁKNO

Polyimidová pryskyřice vyztužená taveným křemenem má také TCE, jenž se těsně blíží TCE keramických součástek. Změnou objemového poměru vlákna a pryskyřice je možno TCE upravit podle specifických požadavků uživatele. Má-li se však dosáhnout TCE 6-8 ppm/°C, je nutno udržovat množství pryskyřice asi pod 40%. Mírné zrněny obsahu pryskyřice mohou ovlivnit celkový TCE desky plošných spojů. Další nevýhodou materiálů vyztužených křemenem je to, že tavený křemen má silný brusný účinek na vrtáky při vrtání a zkracuje jejich životnost.

SKELNÁ TKANINA - ARAMIDOVÉ VLÁKNO (KOMPOZIT)

Pryskyřičný systém vyztužený skleněným vláknem je možno kombinovat s pryskyřičným systémem vyztuženým aramidovým vláknem a vytvořit tak kompozici s nízkou roztažností. Objemový podíl aramidového vlákna je možno upravovat tak, aby byl rozsah hodnot TCE přizpůsobený TCE keramické součástky. Takovou kompozici může mít materiál vyztužený aramidovým vláknem na vnitřních nebo na vnějších vrstvách. Je-li aramidový materiál pouze na vnitřních vrstvách, znamená to také předpoklad vzniku trhlin v pryskyřici (viz. epoxid s aramidovým vláknem). Tato koncepce vylučuje trhliny na povrchu, jež by zřejmě vedly k problémům se spolehlivostí v případě praskání vodičů, přičemž současně zlepšuje obrobitelnost a vrtání desek základního materiálu, obsahujícího aramidové vlákno. Přizpůsobitelný TCE jej předurčuje pro všechny bezvývodové aplikace. Tento materiál je přijatelný pro náročné průmyslové zpracování.

SKELNÉ VLÁKNO - TEFLON

Díky nízké dielektrické konstantě se tento materiál hojně používá ve vf aplikacích. Protože má vysoký součinitel roztažnosti, doporučuje se pouze pro malé SMD. Jedno a oboustranné konstrukce jsou běžné, zatímco vícevrstvé konstrukce jsou vzácné.

STRUKTURY S PRUŽNÝM DIELEKTRIKEM

Nejvýznamnější přínosy této kombinace jsou: pružnost základního materiálu zmenšuje namáhání pájených spojů při tepelných cyklech, je možno snížit hmotnost desky plošných spojů na minimum. Tyto struktury nejsou běžně rozšířeny.

ČIP NA DESCE PLOŠNÝCH SPOJŮ

Stále více se uplatňuje technologie COB. Výběr vhodné desky plošných spojů pro tuto techniku závisí převážně na cenových relacích v souvislosti s konečným výrobkem a typem použité technologie COB. Pro většinu levných aplikací, kde se nepoužívá termokompresní připojení drátu, budou postačovat běžné materiály desek plošných spojů.

Jestliže se používá termokompresní připojení drátu, je třeba vzít v úvahu vysoké teploty, které s tímto postupem souvisí. Je-li na prvním místě požadavek nízké ceny, často se při použití běžných materiálů na desce toleruje místní zuhelnatění drátového spoje a delaminace. Je-li to však nepřijatelné, je nutno použít jiný vhodný materiál (např. polyimid - sklo). Pro speciální aplikace COB je třeba použít ohebné vodiče, vodivý polymer a lisované termoplasty.

V tabulce jsou parametry běžných výrobků, které se používají pro desky plošných spojů.



Vlastnosti	XXXPC	FR-2	FR-3	FR-4	FR-5	FR-6	G-11	GPO	CEM-1	CEM-3
Druh pojiva	Fenol	Fenol	Epox	Epox	Epox	PES	Epox	PES	Epox	Epox
Odolnost proti pájení (s)	5	5	5	20	20	20	20	20	20	20
Povrchový odpor, min.(Ω)	10^9	10^9	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}
Vnitřní odpor, min. (Ω)	10^8	10^8	10^9	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}
Permitivita (1 MHz)	4,8	4,8	4,8	5,4	5,4	4,3	5,4	4,3	4,9	5,0
Ztrátový činitel (1 MHz)	4,0 $\cdot 10^{-2}$	4,0 $\cdot 10^{-2}$	4,0 $\cdot 10^{-2}$	3,5 $\cdot 10^{-2}$	3,5 $\cdot 10^{-2}$	3,0 $\cdot 10^{-2}$	3,5 $\cdot 10^{-2}$	3,0 $\cdot 10^{-2}$	3,8 $\cdot 10^{-2}$	3,6 $\cdot 10^{-22}$

Tab. 6 Vlastnosti materiálů dle NEMA.

V ČR vyrábí plátované organické materiály ALIACHEM Pardubice - Semtín. Cu fólie mají tloušťku 17,35,70 μm . Vyrábí se pod obchodním názvem UMACLAD 2P (FR-2) a UMATEX 222 (FR-4).

1.5 ZÁKLADNÍ MATERIÁLY PRO FLEXIBILNÍ (OHEBNÉ) PLOŠNÉ SPOJE

1.5.1 OHEBNÉ PLOŠNÉ SPOJE

Technické termoplastické pryskyřice pro náročné aplikace jsou alternativou materiálů na organické bázi pro obecné účely a povrchovou montáž. Typickými termoplasty, používanými v aplikacích pro povrchovou montáž, jsou: polyetylentereftalát (PET), polyetylnaftalát (PEN) a polyimid (PI). Desky z termoplastů vstřikovaných do forem velmi dobře vyhovují velkosériovým aplikacím, kdy je možno vyrábět i tří rozměrné tvarované desky plošných spojů s plně aditivními nebo poloaditivními plošnými vodiči. Materiály na bázi termoplastů se používají pro ohebné plošné spoje. Ohebné plošné spoje jsou specifikovány v ČSN EN 123400: 1996, ČSN EN 123400-800: 1996, ČSN EN 123500:1996, ČSN EN 123600:1997, ČSN EN 123700:1997, ČSN EN 123800:1997, ČSN EN 60249-2-I3+A I: 1996, ČSN EN 60249-2-8+A I: 1996.

Ohebné plošné spoje (FPW = Flexible Printed Wiring) jsou používány k pohyblivému propojování dvou pevných částí většinou s pomocí konektorů, Mohou však být použity jako nosné části pro polovodičové čipy TAB a pro montáž součástek SMD. Pro základní materiál ohebných plošných spojů se používají následující dva typy materiálů:

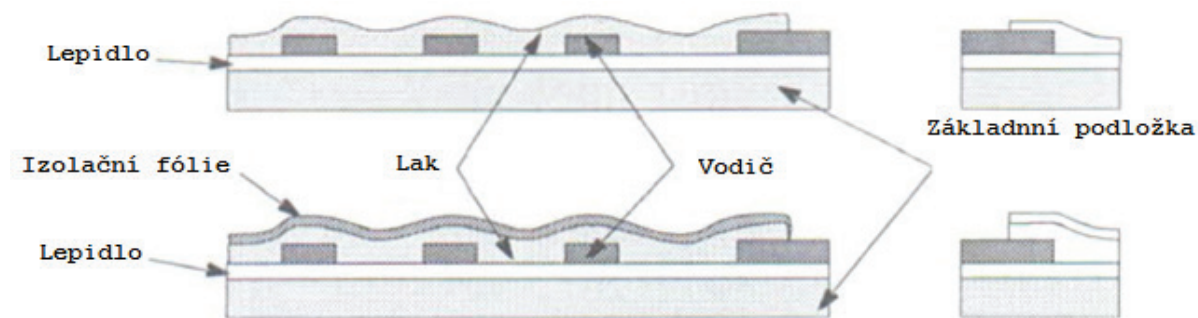
- polyimid PI (nazývaný Kapton), který snáší bez obtíží teploty až kolem 400°C (stálá pracovní teplota 135 °C), takže je bez obtíží pájitelný,
- polyester (nazývaný Mylar), jenž je podstatně levnější než polyimid, ale jeho použití je omezeno do 85°C, takže jeho pájitelnost je velmi ztížena.

Měděná fólie se získává buď elektrolytickým nanášením, nebo válcováním a je přilepena na základní podložku. Její tloušťka se pohybuje v rozsahu od 15 do 75 μm . Pro běžné aplikace se standardně používá fólie o tloušťce 35 μm , Izolační vrstvy, kterými se plošné spoje chrání, se používají ve dvojím provedení:



1. jako krycí fólie (je na podložku s plošnými spoji lepena), která může být polyimidová nebo polyesterová (tloušťka 25 až 50 μm),
2. jako lak - tloušťka je 15 μm .

Pro montáž součástek SMD je třeba provést konečnou úpravu povrchu kontaktních ploch určených k připojení součástek. Standardní metodou je elektrolytické pokovení (Sn/Pb nebo Au/Ni), jež je možné použít u obou typů materiálů, polyamidu i polyesteru. Vysoká tepelná odolnost podložky z polyamidu umožňuje jednodušší a dostupnější způsoby pokovení, a to ponorem do pájecí lázně nebo aplikací pájecí pasty s následným přetavením.



Obr. 6 Ohebný plošný spoj s izolačním lakem a folii

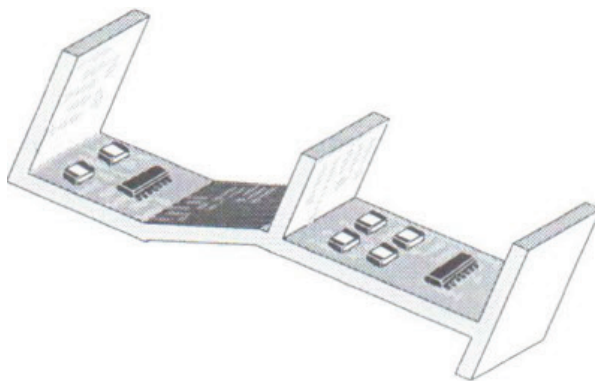
V řadě konstrukcí je třeba ohebné plošné spoje částečně nebo zcela vyztužit, např. tam, kde má být upevněn konektor nebo součástka. K tomu se používá laminování (např. epoxidové sklolamináty) nebo materiály vlastního substrátu (polyimid nebo polyester) o větší tloušťce (až několik mm), které jsou přilepeny ke spodní straně substrátu. Lepidlo má tloušťku asi 50 μm .

Provedení ohebných plošných spojů nabízí několik různých konstrukčních uspořádání, jež je možné rozdělit do následujících skupin:

- jednostranné (jedna vodivá vrstva),
- oboustranné (vodivé vrstvy na obou stranách),
- vyztužené (v určitých místech zpevněné oblasti za účelem připojení konektoru nebo jiné součástky),
- vícevrstvé (více vodivých vrstev na jedné straně substrátu),
- ohebně pevné (jsou vyrobeny jako jeden celek, na němž jsou některé části pevné a jiné ohebné).

TVAROVANÉ DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ Z TERMOPLASTICKÉ PRYSKYŘICE

Tvarované propojovací desky **MID** (Moulded Interconnect Devices) nebo **MWB** (Moulded Wiring Board) mohou tvořit přímo základ pro montáž součástek nebo na ně lze montovat dílčí integrované funkční bloky. Základním materiálem pro tvarové desky plošných spojů jsou termoplasty, jako např. polyétersulfon, polysulfon a polyéterimid. Desky z termoplastů vstříkovaných do forem velmi dobře vyhovují velkosériovým aplikacím. Používají se s plně aditivními nebo poloaditivními plošnými vodiči. Materiály na bázi termoplastů plátovaných mědí se dodávají také pro planární subtraktivní aplikace. Použití aditivní technologie přispívá k dobrým možnostem řešení požadavků na chlazení a elektromagnetickou kompatibilitu.



Obr. 7 Příklad MID

Tvarované propojovací desky se uplatňují tam, kde není příliš vysoká hustota součástek, ale přitom jsou použity velké a robustní komponenty (konektory, transformátory, mechanické díly apod.). Někdy mohou tvořit i součást konstrukčního celku. Mezi výhody patří jejich příznivá cena a možnost recyklace po vyřazení z provozu. Typickým příkladem je využití různých součástí v automobilovém průmyslu.

MATERIÁLY NA NEORGANICKÉ BÁZI

Pro tyto materiály se častěji používá výraz anorganické podložky nebo substráty. Materiály na neorganické bázi se zpravidla používají ve spojení s technologií tlustých nebo tenkých vrstev a jsou ideální pro vývodové nebo bezvývodové nosiče čipů. Výhodou je, že tenkovrstvé nebo tlustovrstvé rezistory je možno připojovat přímo na podložku a zapuštěné kondenzátorové vrstvy, což vede k vyšší hustotě osazení a spolehlivosti. Opravitelnost takové podložky je však omezená.

Anorganické podložky mají oproti organickým materiálům tyto výhody:

- velmi dobrá tepelná odolnost,
- malá hodnota TCE,
- dobrá chemická odolnost,
- mechanická hermetičnost.

Jsou zde však i nevýhody:

- vyšší hmotnost,
- vyšší cena,
- křehkost,
- rozměrové limitace,
- toxicita některých typů (BeO keramika).

V praxi se používají především následující materiály:

KORUNDOVÝ SUBSTRÁT

Základem je polykrystalický oxid hlinitý s malým množstvím kovových oxidů pro dosažení fyzikálních vlastností. Použití se může zdát ideálním pro bezvývodové keramické SMD díky jejich poměrně vysoké tepelné vodivosti a eliminaci nepříznivého TCE, protože se zde používají podobné materiály. Hlavní nevýhodou však je omezená velikost desky plošných spojů (přibližně 22 600 mm²).



BERYLIOVÝ SUBSTRÁT

Základem je polykrystalický oxid berylnatý s malým množstvím kovových oxidů pro dosažení fyzikálních vlastností. Tepelná vodivost je vyšší než u korundové keramiky (asi 7x). Používání se omezuje z důvodů toxicity a ceny.

POUŽITÍ KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ

Keramické materiály se běžně používají ve dvou aplikacích: keramické hybridní obvody a keramické podložky pro elektronické obvody.

Keramické hybridní obvody se osazují konvenčními čipy integrovaných obvodů technikou čipu a drátu (COB) a jsou umístěny uvnitř hermeticky utěsněného hybridního pouzdra. Hybridní podložky jsou zpravidla 0,6 až 1,0 mm tlusté o ploše 30 až 1000 mm². Keramickým materiálem může být korundový nebo beryliový substrát. Propojovací obvodové obrazce jsou vytvořeny pomocí tenkých vrstev, vícenásobných tlustých vrstev nebo technikou vypalování. Keramické podložky se osazují přímo pájenými SMD a používají se jako nezávislé celky mimo hermetické pouzdro. Keramické desky jsou zpravidla 1,0 až 1,5 mm tlusté o ploše 1000 až 22000 mm². Jsou obvykle z korundového substrátu, propojovací obrazec je vytvořen technikou vícenásobné tlusté vrstvy nebo technikou vypalování. Keramické desky jsou spolehlivým materiálem pro velmi hustou montáž bezvývodových nosičů čipů.

Tyto materiály zajišťují přizpůsobení TCE keramickým bezvývodovým nosičům čipů poskytují rovnou a tuhoun montážní plochu a zabezpečují přenos tepla. Hlavními požadavky ve prospěch použití keramických obvodových desek jsou hermetičnost a mechanická celistvost. Tlustovrstvé obvody na keramických deskách vyžadují ochranu před absorpcí vody.

Na povrchu desky bývá skleněná vrstva, která tvoří ochranný povlak. Keramické desky, jejichž plocha je větší než 10000 mm², vyžadují mechanickou oporu. Obvykle se spojují s panelem pro montáž konektorů a šasi. Aby byla zajištěna slučitelnost TCE, doporučuje se pečlivý výběr materiálů.

Srovnání jednotlivých druhů keramiky:

Vlastnosti	Korundová keramika	Beryliová keramika
TCE xy (ppmK ⁻¹)	7,5 - 8	8,5
Tepelná vodivost (Js ⁻¹ m ⁻¹ K ⁻¹)	34 - 38	250
Permitivita (1 MHz)	9 - 10	6,5
Ztrátový činitel (1 MHz)	0,08	0,04

Tab. 7 Vybrané parametry keramických substrátů.

1.6 TYPY NEOHEBNÝCH DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ

1.6.1 NEOHEBNÉ DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ Z HLEDISKA JEJICH KONSTRUKCE

Neohebné desky plošných spojů lze dělit na: jednovrstvé, dvouvrstvé, vícevrstvé, s nosnou deskou a s omezovacím jádrem.



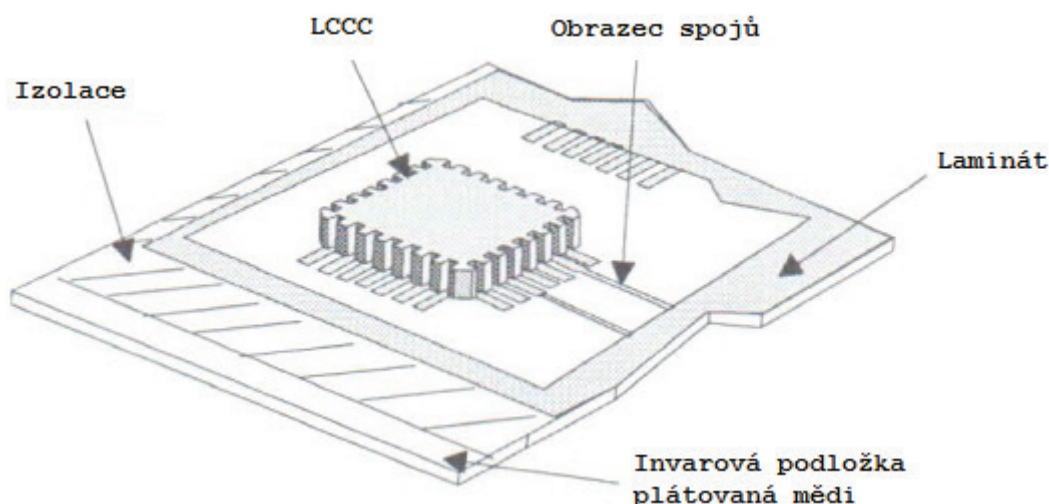
1.6.2 DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ JEDNOVRSTVÉ, DVOUVRSTVÉ A VÍCEVRSTVÉ

1.6.3 DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ S NOSNOU DESKOU

S běžnými deskami plošných spojů je možno použít nosné kovové nebo nekovové desky, takže vznikne deska plošných spojů se zlepšenými vlastnostmi. V závislosti na požadovaných výsledcích může být nosná deska elektricky funkční nebo ne a současně může sloužit jako výztuž, chladič nebo omezovač TCE.

Deska plošných spojů spojená s nosnou deskou (kovovou nebo nekovovou)

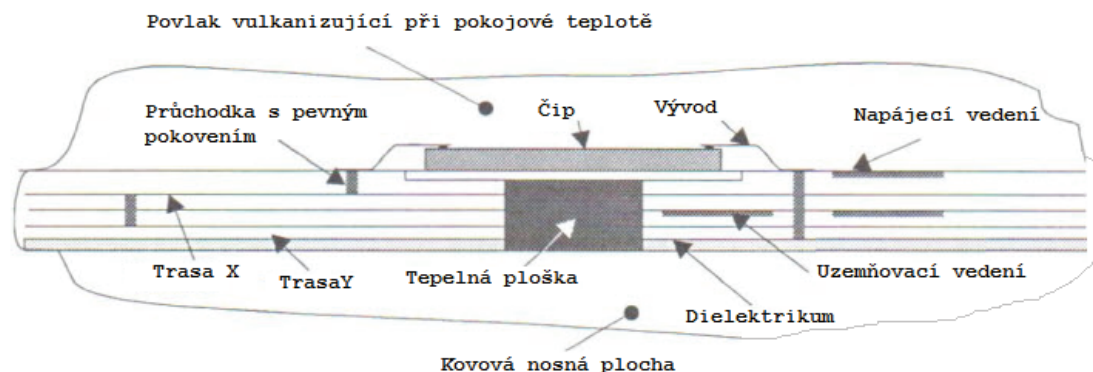
Běžná tenká deska plošných spojů, vyrobená a spojená prostřednictvím pevného lepidla nebo izolace s nosnou rovinou např. kovem (viz obrázek) nebo kompozicí pryskyřice-uhlíkové vlákno, může vytvořit strukturu s řízenou tepelnou roztažností v osách X a Y, lepší tuhostí, lepší tepelnou vodivostí atd., což závisí na vlastnostech nosné desky. Deska plošných spojů však musí být dostatečně tenká, aby se sestava nedeformovala, nebo musí být připojena k oběma stranám nosné desky. Součástky mohou být montovány pouze po jedné straně desky plošných spojů. Nosný prvek zpravidla nebývá k desce plošných spojů elektricky připojen.



Obr. 8 Deska plošných spojů připojená k nosné desce

POSTUPNĚ ZPRACOVÁVANÉ STRUKTURY S KOVOVOU NOSNOU ROVINOU

Postupně zpracovávané desky plošných spojů jsou vícevrstvé s vysokou integrací plošných spojů a dodávají se s organickým dielektrikem specifické tloušťky, velmi tenkými vodiči a pokovenými otvory k propojení jednotlivých vrstev s tepelnými ploškami pro přenos tepla. Vše je připojeno k nosnému kovovému chladiči s nízkým TCE.



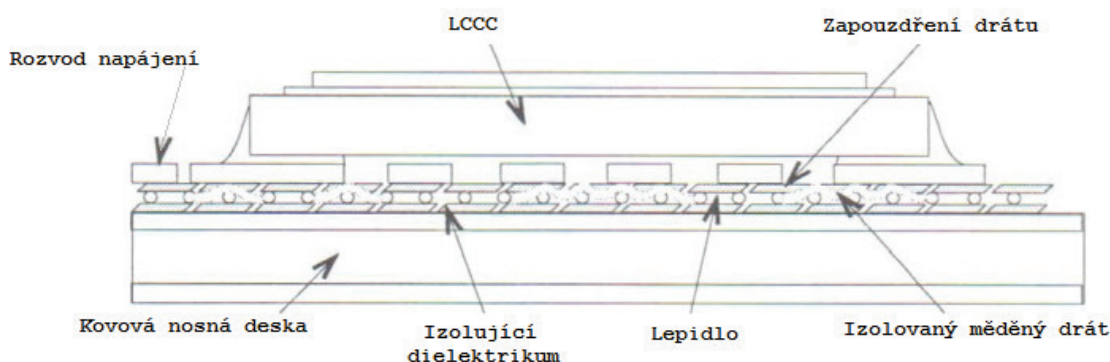
Obr. 9 Postupně zpracovávaná struktura s nosnou rovinou



Hlavní předností tohoto systému je to, že průchozí otvory mohou být jen 0,20 mm velké a šířka vodičů se může pohybovat v rozsahu od 0,12 do 0,20 mm, což umožňuje vysokou hustotu propojení. Většině aplikací je tedy možno vyhovět dvěma signálovými vrstvami a přídatnými vrstvami pro napájení a uzemnění.

STRUKTURY S DISKRÉTNÍM DRÁTEM A KOVOVOU NOSNOU PLOCHOU

Tyto struktury obvykle obsahují kovovou nosnou rovinu s nízkou roztažností, která současně nabízí dobrý rozptyl tepla. Vlastní propojení je provedeno pomocí diskretních izolovaných měděných drátů o průměru 0,06 mm, které jsou přesně položeny číslicově řízenými stroji v rastru 0,03 mm. Toto geometrické uspořádání umožňuje vytvořit nízkoprofilový propojovací obrazec s vynikajícími elektrickými vlastnostmi (vysoká přenosová rychlost) a montážní hustotou.



Obr. 10 Struktura s diskretním drátem a kovovou nosnou plochou s nízkou roztažností.

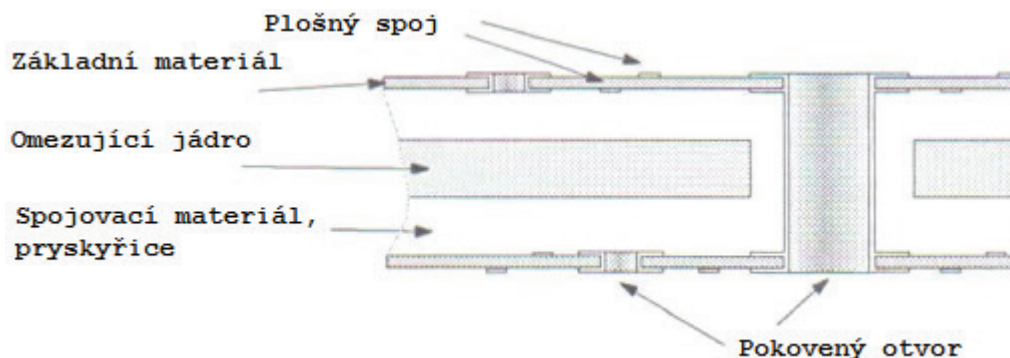
Vodiče jsou zalaty pružnou pryskyřicí, která absorbuje lokální zatížení a tlumí vibrace. Elektrické propojení je provedeno prostřednictvím měděných otvorů o průměru 0,25 mm. Takto malou průchodku je možno umístit do pájecí plošky pro připojení součástky, čímž se eliminuje požadavek větvení obvodu při použití součástek s odstupem středů vývodů 0,6 mm. Tímto způsobem je možno dosahovat velmi vysokých montážních hustot. Velkou výhodou je, že návrh plošného spoje je levnější a případné změny se mohou uplatnit těsně před výrobou tohoto typu.

DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ S OMEZENÝM JÁDREM

V těchto strukturách se používá jedna nebo několik nosných kovových či nekovových desek. Stejně jako u nosné roviny desky plošných spojů v závislosti na požadovaných výsledcích může nosná rovina sloužit jako výztuž, chladič a omezovač TCE.

1.6.3.1 DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ S OMEZUJÍCÍM JÁDREM BEZ ELEKTRICKÉ FUNKCE

Desku plošných spojů spojenou s omezujícím jádrem je možno použít pro aplikace s velkou hustotou součástek a s malou deformací. Jádro může fungovat jako chladič bez elektrické funkce. Kvůli optimální hustotě je možno dosáhnout vícevrstvé konstrukce pomocí předvrtaného jádra s nízkým TCE umístěného uprostřed, jak je zřejmé z obrázku. Otvory v jádru jsou před laminováním vyplněny pryskyřicí a deska plošných spojů je dokončena běžnými výrobními postupy.

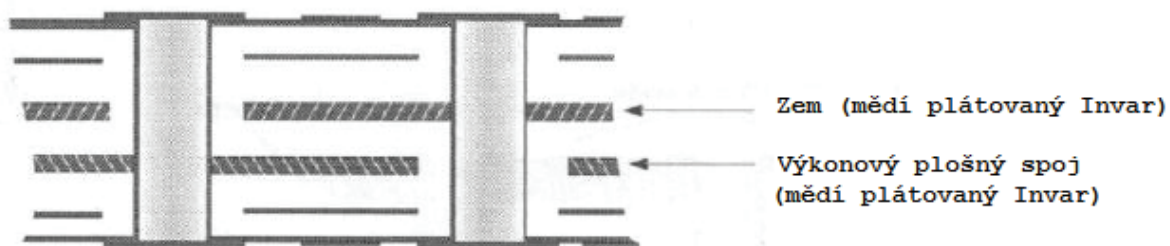


Obr. 11 Deska plošných spojů s nosnou rovinou (elektricky nefunkčním omezujícím jádrem).

Pro speciální aplikace, kde se vyžaduje inherentní tuhost v extrémních podmínkách, je možno v těchto strukturách jako jádro použít molybden. Molybden a mědí plátovaný Invar jsou konvenčními postupy obtížně obrobitelné materiály. Je-li na prvním místě požadavek tepelné vodivosti na jednotku váhy, je možno použít grafit.

Desky plošných spojů s elektricky funkčním omezujícím jádrem

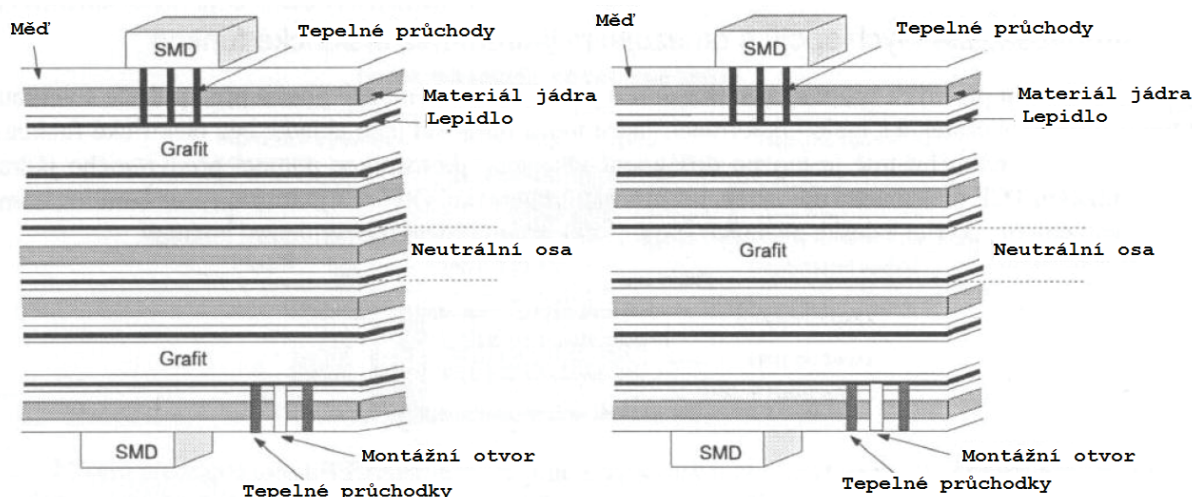
Konvenční vícevrstvé desky mohou být zhotoveny s tenkým (0,1 až 0,25 mm) mědí plátovaným Invarem nebo molybdenem, jako elektricky funkčním uzemňovacím a výkonovým vedením. Po předvrtání se tyto roviny umístí v symetrickém uspořádání, a pak se laminují jako součást vícevrstvé desky plošných spojů (viz následující obrázek). Celkový TCE takové struktury je možno upravit změnou kompozice a tloušťky jednotlivých rovin.



Obr. 12 Vícevrstvá deska plošných spojů s výkonovými a uzemňovacími rovinami z mědi plátovaného Invaru (elektricky funkční omezovací jádro).

DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ PŘIPOJENÉ K OMEZUJÍCÍMU LAMINÁTU

Konvenční deska plošných spojů vyrobená s využitím vnitřní plochy z pryskyřice a omezujícího vlákna může tvořit strukturu s modifikovanou tepelnou roztažností vose X a Y, zvýšenou tuhostí, zlepšenou tepelnou vodivostí atd., v závislosti na vlastnostech nosné plochy a jejím umístění uvnitř struktury. Tato omezující vlákna mohou být z grafitu, Kevlaru, křemenu apod. Kvůli vysokému modulu těchto materiálů musí být konstrukce s nimi vždy vyvážená, aby nedocházelo k ohýbání nebo kroucení.

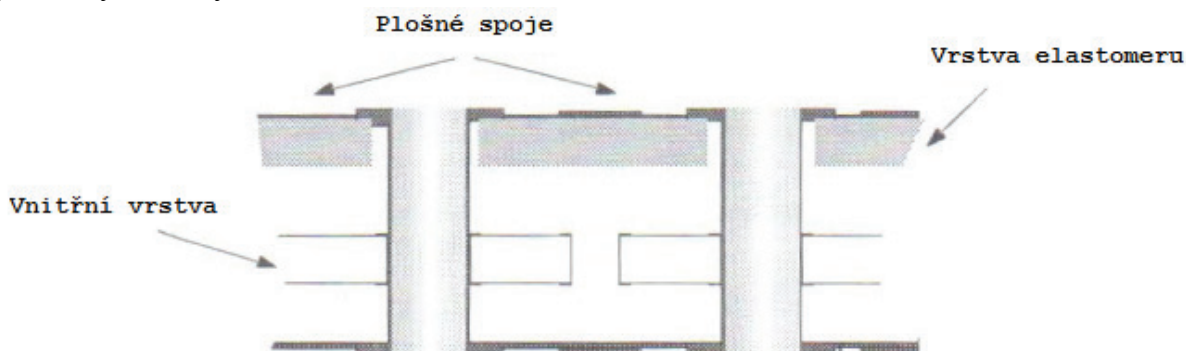


Obr. 13 Omezující lamináty mimo neutrální osu a omezující lamináty v neutrální ose.

STRUKTURY S PRUŽNOU VRSTVOU

Desky plošných spojů s pružnou vrstvou byly vyvinuty speciálně pro povrchově montované nosiče čipů. Tyto materiály se vyznačují pružností díky nové elastomerové vrstvě, která snižuje riziko poruchy pájeného spoje vlivem různé tepelné roztažnosti struktury a velkých povrchově montovaných pouzder. Hustota propojení se dále podstatně zvyšuje kombinací tenkých vodičů a mezer s velmi malými průchodkami nebo pokovenými sloupky.

Nevýhodou těchto struktur je to, že se zpravidla nehodí pro velké rozměry, hlavně kvůli ohebnosti povrchového materiálu. Oddělovací vrstva mezi signálovými úrovněmi je malá, např. 0,5 mm, což zvyšuje kapacitní zátěž pro přenos signálu. U otvorů by také mohly vznikat problémy kvůli vysoké roztažnosti vose Z.



Obr. 14 Deska plošného spoje s pružnou vrstvou

V následující tabulce jsou porovnány jednotlivé druhy a konstrukce desek plošných spojů.

Typ	Hlavní přednosti	Hlavní nevýhody	Poznámky
Organické materiály			
Epoxid - skleněné vlákno	Rozměry, hmotnost, opravitelnost, dielektrické vlastnosti, konvenční zpracování desky.	Tepelná vodivost, součinitel TCE v osách X, Y, Z.	Kvůli vysokému TCE v rovinách X-Z je třeba použití omezení na prostředí s malými změnami teploty nebo na aplikaci s malými pouzdry.

Polyimid - skleněné vlákno	Jako u skloepoxidu plus TCE při vysoké teplotě vose Z, rozměry podložky, hmotnost, opravitelnost, dielektrické vlastnosti.	Tepelná vodivost, TCE vose X a Y , pohltivost vlhkosti.	Stejně jako u skloepoxidu.
Epoxid - aramidové vlákno	Stejně jako skloepoxid, TCE v osách X- Y, rozměry podložky, velmi nízká hmotnost, opravitelnost, dielektrické vlastnosti.	<i>Tepelná</i> vodivost, <i>TCE vose X a Y</i> , mikrotrhliny v pryskyřici, CTE vose Z, pohltivost vlhkosti.	Objemový podíl <i>vlákna lze řídit</i> tak, aby vyhověl <i>TCE X-V</i> . Volba pryskyřice rozhoduje o vzniku mikrotrhlin.
Polyimid - aramidové vlákno	Stejně jako epoxid - aramidové vlákno , TCE vose X, rozměry podložky, hmotnost, opravitelnost, dielektrické vlastnosti.	Tepelná vodivost, TCE vose X a Y, mikrotrhliny v pryskyřici, pohltivost vlhkosti.	Stejně jako u epoxid - aramidového vlákna.
Polyimid - křemen (tavený křemen)	Stejně jako polyimid - aramidové vlákno , TCE vose Z, rozměry podložky, velmi nízká hmotnost, opravitelnost, dielektrické vlastnosti.	Tepelná vodivost, TCE vose X a Y, TCE vose Z, vrtání, dostupnost, cena, nízký požadovaný obsah pryskyřice.	Objemový podíl vlákna lze řídit tak, aby vyhověl TCE X-V Opotřebení při vrtání vyšší než u skleněného vlákna.
Kompozice skelná tkanina/ aramidové vlákno	Stejně jako polyimid - aramidové vlákno, bez povrchových mikrotrhlin. TCE vose Z, rozměry podložky, hmotnost, opravitelnost, dielektrické vlastnosti.	Tepelná vodivost. TCE vose X a Y, pohltivost vody, zachycuje zpracovací roztok.	Mikrotrhliny pryskyřice jsou omezeny na vnitřní vrstvy a nemohou poškodit vnější obvody.
Skelné vlákno / tellon	Dielektrická konstanta, vysoká teplota.	Stejně jako skloepoxid , nízká teplotní stabilita, tepelná	Vhodné pro velmi rychlé logické aplikace. Stejně jako skloepoxid.



		vodivost, TCE vosách X a Y.	
Pružné dielektrikum	Nízká hmotnost , minimální starost o TCE, pružné konfigurace .	Rozměry.	Pevné pružné desky umožňující kompromis.
Termoplasty	Třírozměrná konfigurace , nízké náklady při velkých objemech.	Vysoké náklady na vstřikování - lisování .	Tyto aplikace jsou poměrně nové .
Neorganické materiály			
Korundový substrát (keramika)	TCE, tepelná vodivost , konvenční zpracování tlustých nebo tenkých vrstev , integrované rezistory .	Rozměry podložky , omezené opravy , hmotnost , cena , křehkost, dielektrická konstanta.	Nejvíce se používá v technologii hybridních obvodů.
Nosná deska rovina			
Deska plošných spojů spojená s nosnou deskou kovovou nebo nekovovou	Rozměry podložky, opravitelnost, dielektrické vlastnosti , konvenční zpracování , TCE vosách X-V , tuhost, stínění chlazení.	Hmotnost.	Tloušťku <i>I</i> TCE kovového jádra lze měnit společně s tloušťkou desky a přizpůsobit tak celkovému TCE kompozice.
Postupně zpracovávaná deska s kov. nosnou rovinou	Stejně jako v předchozím bodě.	Hmotnost.	Stejně jako v předchozím bodě.
Struktura s diskrétním drátem	Velmi rychlé propojení. Dobré tepelné a elektrické vlastnosti .	Patentovaný postup. Vyžaduje speciální zařízení .	Stejně jako deska připojená ke kovové ploše s nízkou roztažností .
Omezovací jádro			
Mědi plátovaný Invar	Stejně jako korundový substrát.	Opravitelnost, slučitelné tlustovrstvé materiály .	



Deska plošných spojů spojená s kovovým jádrem	Stejně jako deska spojená s nosnou rovinou.	Hmotnost, soukрат vnitřní vrstvy.	Stejně jako deska spojená s nosnou rovinou.
Deska plošných spojů spojená s omezujícím laminátem	Stejně jako deska spojená s kovovými jádery s nízkou roztažností, tuhost, tepelná vodivost, nízká hmotnost.	Cena.	Tloušťku grafitu a desky je možno měnit a celkový TCE přizpůsobit kompozici.
Struktury s pružnou vrstvou	Rozměry podložky, dielektrické vlastnosti, osy X-V, TCE.	TCE vose Z, tepelná vodivost.	Pružná vrstva absorbuje rozdílné TCE mezi keramickým pouzdem a podložkou.

Tab. 8 Jednotlivé druhy a konstrukce DPS.

1.7 VÝROBA DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ

1.7.1 PŘÍPRAVA VÝROBNÍ DOKUMENTACE

Návrhy motivu desek plošných spojů pro SMT vyžadují v porovnání s motivem desky plošných spojů pro klasickou technologii montáže zvýšenou náročnost na přesnost zhotovení. Proto je nevyhnutelné přípravu a návrh motivu zabezpečovat prostřednictvím automatických návrhových systémů s dostatečně přesnou kreslicí jednotkou programově vybavenou možností zobrazení i speciálních prvků SMD (např. různé typy a velikosti pájecích plošek apod.).

Z hlediska zabezpečení kvality a přesnosti podkladů je úplně samozřejmé dodržování předepsaných parametrů prostředí při zpracování filmových matric pro výrobu desek plošných spojů podle doporučení dodavatele (teplota, vlhkost, čistota vzduchu) a vhodná organizace práce a manipulace s filmy po dobu celého výrobního procesu. Je zbytečné vyrábět filmové matrice v klimatizovaných prostorách, a potom je používat v prostředí, kde se tyto podmínky nedodržují.

Pracovní matrice musí být už před použitím důkladně zkontrolovány na kvalitu zhotovení a rozměry motivu, aby se do výrobního procesu nedostaly nevyhovující podklady, protože nejnákladnější zmetek je ten, který je zjištěn až na konci výrobního procesu. Při kontrole se s úspěchem využívají optické komparační testery.

1.7.2 VÝROBA PLOŠNÝCH SPOJŮ SUBTRAKTIVNÍ METODOU

Ve světové produkci plošných spojů převládá subtraktivní výroba. Zaujímá přibližně 90% objemu výroby. Existují i další technologie výroby desek plošných spojů, jako je aditivní nebo semiaditivní technologie, případně technologie výroby drátových plošných spojů. V textu je popsána subtraktivní metoda jako typický představitel výrobní technologie.

Použití základních materiálů s plátovanou 35 µm silnou měděnou fólií pro desky plošných spojů s jemnou roztečí je problematické i při správném dodržování příslušných rozměrových



tolerancí vodičů a pájecích plošek. Při leptání obrazce zde může dojít k podleptání. Z tohoto důvodu se doporučuje používat tenčí měděné fólie o tloušťce 17,5, 10 i 5 μm . Tloušťka základního materiálu desky plošných spojů by měla korespondovat s její maximální šířkou, aby deska plošných spojů byla dostatečně tuhá a nebylo třeba ji před osazením a pájením vyztužovat. Tenčí tloušťky fólie (Sum) se připravují elektrolytickým vylučováním mědi na hliníkovou fólii, jež slouží jako dočasný nosič a ochrana proti oxidaci při manipulaci. Dodávána je například krycí hliníková fólie tloušťky 40 μm , která se po vyvrtání bez obtíží odleptá v kyselině chlorovodíkové. Z hlediska výrobního zpracování jsou tyto materiály výhodnější pro snadné mechanické odstraňování hliníkové fólie, které je možné provádět i po vrtání. Měděná fólie tloušťky 5 μm je prakticky bezporézní, má vysoký stupeň tažnosti a dobré vazební vlastnosti vůči základnímu sklolaminátu.

Výhody tenčích Cu fólií se mohou shrnout do těchto bodů:

- možnost obdobného zpracování jako u materiálů s měděnou fólií tloušťky 35 μm ,
- snížené podleptání,
- snížená doba leptání,
- možnost výroby desek s vodiči šířky až 0,15 mm,

Zvýšená cena zadaného materiálu je zanedbatelná v celkové ceně náročné desky plošných spojů s pokovenými otvory.

Výchozí materiál, mědí plátovaný skloepoxid, musí splňovat normu (např. NEMA). Velmi důležité je zachování všech nejdůležitějších mechanických vlastností, se zvláštním důrazem kladeným na neporušenost fólie. Měděná fólie o čistotě 99,5% je vyráběna elektrolyticky na nerezových bubnech. Musí mít dobrou adhezi k laminátu. Taje zaručena drsností povrchu, která vzniká anodickou oxidací.

1.7.3 JEDNOTLIVÉ KROKY VÝROBY DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

DĚLENÍ ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU

Vysoké nároky na čistotu prostorů pro zpracování desek plošných spojů mění i požadavky na dělení základního materiálu. Klasická technologie stříhání na nůžkách je doplněná následnou úpravou hran přířezů broušením nebo frézováním. Často se tato technologie nahrazuje dělením materiálů prostřednictvím diamantové pily na programově řízeném pracovním stole, které současně s kvalitou řezu zaručují i přesné rozměrové tolerance přířezu. Materiál se nařeže či nastříhá na tzv. technologický rozměr. To je rozměr desky zvětšený oproti výslednému rozměru desky přibližně o 15-20 mm, a to po obou stranách. Toto zvětšení slouží k uchycení desky do závěsů při pokovování, k vrtání technologických děr apod.

PAKETOVÁNÍ PŘÍŘEZŮ

Pro efektivní využití vrtacího zařízení je možné vrtat několik přířezů najednou. Typické množství je 3-4 přířezy, které jsou fixovány pomocí technologických kolíků. S používáním velmi malých průměrů vrtáků pro desky se SMD klesá i počet najednou vrtaných desek.

VYVRTÁNÍ OTVORŮ

Použití SMD na deskách plošných spojů (čistá nebo smíšená montáž) snižuje počet vrtaných součástkových otvorů. Při čisté SMT montáži se používají jen propojovací otvory, při smíšené montáži se používají částečné součástkové a částečně propojovací otvory. Celkový počet



otvorů je však při čisté SMT podstatně nižší než při klasické montáži. Z ekonomických důvodů se doporučuje dělat co nejmenší počet otvorů různých průměrů. Pro součástkové otvory se doporučují následující průměry 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,8 - 0,9 mm $\pm 0,05$ mm a 1,0 - 1,3 - 1,6 - 2,0 - $\pm 0,1$ mm. Pokovený otvor by měl větší o 0,2 mm (max. 0,7 mm) větší než vývod součástky.

Problémy nastávají při vrtání propojovacích otvorů, které zabezpečují přenos elektrického signálu z jedné strany desky plošných spojů na druhou. Vysoká hustota motivu a zmenšení rozměru desky plošných spojů vyžadují zmenšení jejich vrtaného průměru na hodnotu 0,6 až 0,4 mm, v extrémních případech až 0,15 mm. Použité vrtací zařízení musí pracovat s 80-100 tisíci ot/min., rychlost posunu se zmenšuje v závislosti od zmenšujícího se průměru vrtáku až na hodnotu 4 mm/s při průměru vrtáku 150 μ m. Vrtáky pro zhotovení otvoru s malými průměry je nutné vybírat podle přísných kritérií. Musí být dokonale souosé, mají zvláštně definovanou kónickou geometrii tvaru špičky. Menší porušení základní geometrie vrtáku má za následek jeho zlomení. Důležitým parametrem vrtacího zařízení je házivost vřeten (max. 2,5 μ m).

Vzhledem k malé délce šroubovice vrtáku není možné vrtat více přířezů. V závislosti na zmenšujícím se průměru vrtáku klesá i počet najednou vrtaných přířezů, při průměru 0,4 mm se doporučuje vrtání jen jednoho přířezu. Vstupním materiálem při vrtání otvorů s malým průměrem je obyčejný hliníkový plech tloušťky 0,08-0,2 mm, který současně zabezpečuje i chlazení vrtáku. Výběhový materiál musí být použitý v každém případě, aby zdvihl vrtaný svazek z pracovního stolu vrtáčky. Výběhovou rychlost je třeba taktéž snížit na hodnotu 4-20 mm/s.

Charakter vrtaného materiálu určuje i interval broušení a výměny vrtáku. Základní materiály se skleněným vláknem mají zvýšené brusné účinky na vrtáky, a proto je potřebná jejich častější výměna. Vzhledem ke křehkosti vrtáku je samozřejmě nutná velmi opatrná manipulace.

Vrtací podmínky je nutné přizpůsobit použitému základnímu materiálu tak, aby nedocházelo k velkým přírazům živice přes vrstvy mědi, zvláště u více vrstevných desek plošných spojů. V poslední době se ve světě začínají používat nové technologie zhotovování malých otvorů prostřednictvím laserové techniky.

ČIŠTĚNÍ A BROUŠENÍ

Přířez je po vrtání nutné dokonale očistit a obrousit. Tento úkon se provádí speciálním brousícím zařízením za pomoci speciálních kartáčů. Vláknata těchto kartáčů jsou polyesterová a na jejich povrchu je zafixováno brusné médium (např. SiC). Kartáče se pohybují radiálně i axiálně a celý proces se provádí pod vodní sprchou. Nečistoty ulpěné v otvorech se z povrchu fólie tímto odstraní. Součástí zařízení může být také odmašťovací sekce.

POKOVENÍ OTVORŮ A ZESÍLENÍ MĚDI

Vrstva palladia se nanáší do vyvrtaných otvorů bez použití elektrického proudu, čímž se vodivě propojí obě strany desky. Poté se nanáší měděná vrstva ve speciálních lázních, a to vyredukováním mědi na zárodečných centrech palladia. Nanesená vrstva (0,5 - 1 μ m) není mechanicky odolná, proto se ihned částečně galvanicky zesiluje. Používají se kyselé roztoky.



Problematika nanesení vrstvy mědi do otvoru je specifická pro desky plošných spojů! Pro SMT tým, že ne vždy se používají běžné skloepoxidové materiály, ale i materiály na bázi teflonu a polyimidu, a pokovují se otvory s malými průměry (0,4mm).

Pokovovací proces, zvláště čistící a aktivační operace, je tedy nutné modifikovat pro různé složení základního materiálu. Pro materiály na bázi skloepoxidu se používají při čištění otvoru od rozmazané živice (smear removal) a pro zaleptání živice (etch back) koncentrované roztoky H_2SO_4 , CrO_3 , $KMnO_4$ nebo plazma. Pro materiály na bázi PT a PI-akrylátu jsou účinné jen roztoky CrO , nebo plazma, pro teflonové materiály se používají speciální směsi organických činidel. Pokovení otvorů s malým průměrem (pod 0,5mm) je jen velmi těžko realizovatelné použitím klasických postupů a výsledky jsou neuspokojivé. Byly vyvinuty nové postupy pro horizontální pokovení, které používají nucenou cirkulaci chemických prostředků přes otvory prostřednictvím zvláštních čerpadlových systémů.

Při pokovení úzkých vodičů (0,15-0,20 mm) a malých otvorů na větších tloušťkách (2,5 mm) se doporučuje např. snižovat proudovou hustotu vylučování měděného povlaku.

Použití palladia není jediná možnost k pokovení otvorů, Další možností je použití vodivých polymerů, systému na bázi uhlíku a grafitu a aplikace vodivého inkoustu.

VYTVOŘENÍ OBRAZCE

K tomuto technologickému kroku lze využít dvě metody:

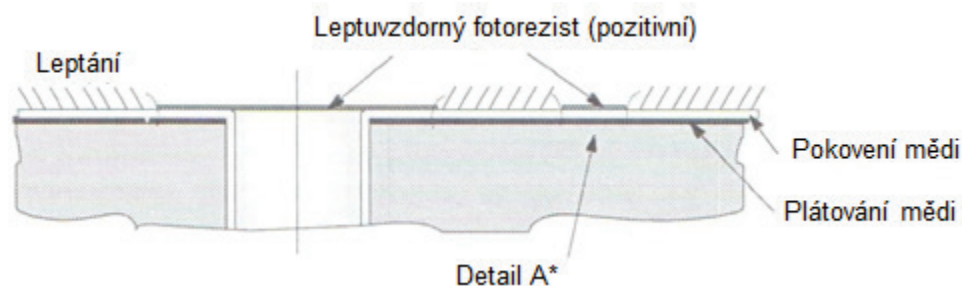
A) Metoda pokovování panelu ("Panel plating"). Plátovaný základní materiál včetně vyvrtaných otvorů je chemicky a galvanicky pokoven mědí. Po nanesení, expozici a vyvolání fotorezistu (popis těchto operací je dále) jsou plošné spoje a otvory kryty fotorezistem. Fotorezist slouží jako leptuvzdorná vrstva, kterou může být polymerní fólie (případně zlato). Tento rezist musí být schopen ochránit i spoje a průchozí otvory. Výsledné spoje jsou měděné.

Sled jednotlivých operací je následující (předcházejí operace dělení, balení a vrtání):

- 1 - pokovení celého panelu na tloušťku mědi min. 15 μm v otvorech (obvykle 35 μm),
- 2 - kartáčování,
- 3 - laminace fotorezistu (50 μm),
- 4 - vytvoření pozitivního obrazce,
- 5 - leptání,
- 6 - odstranění organického rezistu.

Následují operace, jako je nanesení nepájitivé masky, HAL a potisk.

Na obrázku je vidět pokovený otvor s pokovením Cu po celé ploše. Čárkovaná čára ukazuje oblast, která je leptána. Podrobnosti o detailu A jsou uvedeny v části o leptání plošného spoje.



Obr. 15 Výsledný pokovený průchozí otvor

Deska plošných spojů v jednotlivých krocích výroby je na následujícím obrázku:





Obr. 16 Metoda pokovování panelu – „Panel plating“

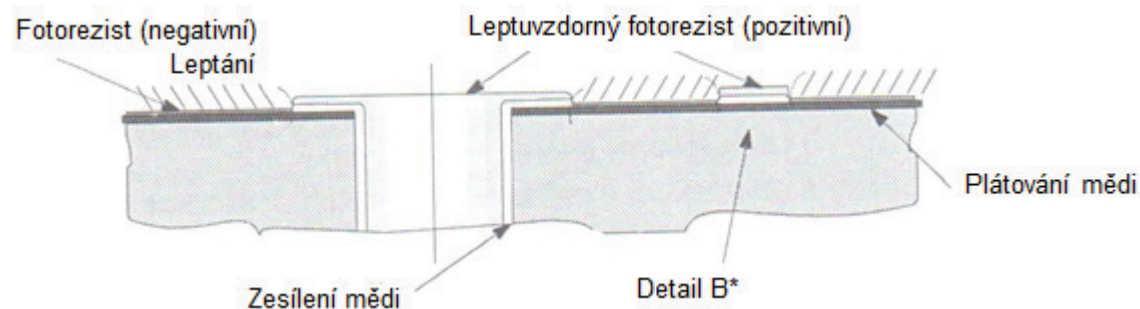
B) Metoda pokovování obrazce ("Pattern plating"). Galvanickou mědí jsou zesíleny cesty a pokovené otvory. Jako rezist proti leptání je použit cín nebo jeho slitiny, např. Sn/Pb, Sn/Ni. Po odstranění fotorezistu následuje proces leptání. Výsledné spoje jsou chráněny cínem nebo jinou použitou slitinou.

V tomto případě je možné, a i výhodnější použít cín jako kovový rezist v tloušťce 5-7 μm, protože cín se jednodušeji nanáší, lépe se stripuje a není tak ekologicky nebezpečný jako Sn/Pb.

Tato technologie je nejpoužívanější. Sled jednotlivých operací je následující:

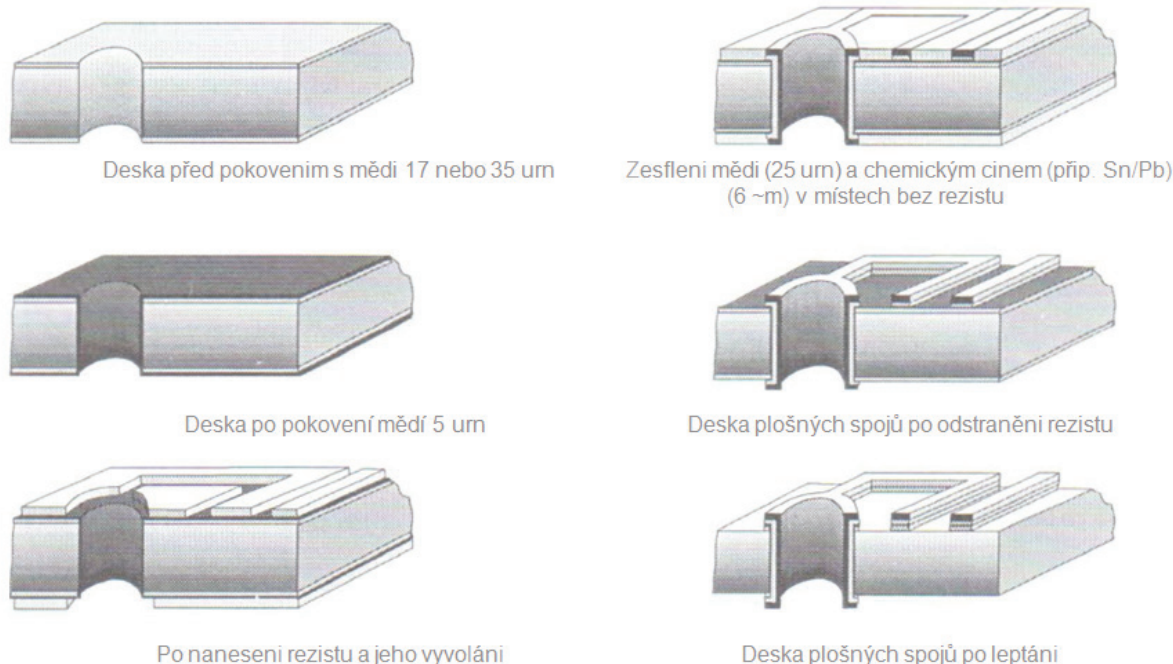
- 1 - pokovení celého panelu na tloušťku mědi min. 5 μm v otvorech,
- 2 - vytvoření obrazce,
- 3 - zesílení tloušťky mědi pouze v obrazci a v otvorech na min. 15 μm,
- 4 - pokovení obrazce cínem apod. na min. tloušťku 12 μm v otvorech,
- 5 - leptání (v případě cínového rezistu lze použít kyselinu chromsírovou).

Na obrázku je vidět pokovený otvor s pokovením Cu pouze na místech otvorů a obrazců spojů, Čárkovaná čára ukazuje oblast, která je leptána.



Obr. 17 Výsledný pokovený průchozí otvor

Podrobnosti průběhu leptání, detail B, jsou uvedeny v části o leptání. Následující přehled ukazuje desku plošných spojů v jednotlivých stádiích tvorby obrazce.



Obr. 18 Metoda pokovování obrazce – „Pattern plating“

Byly popsány typické kroky nutné k vytvoření obrazce. Následuje bližší popis jednotlivých technologických kroků,

NANÁŠENÍ FOTOCITLIVÉ VRSTVY

Nanést fotocitlivou vrstvu na desku je možno dvojím způsobem:

- a) Nanášením fotocitlivé fólie za tepla - použitím suchého rezistu.
- b) Nanášením kapalného fotocitlivého materiálu:
 - pomalým vytahováním desky z roztoku,
 - nanášením na odstředivce,
 - navalováním na válcích.

Jednotlivé způsoby vzhledem ke svým specifickým stránkám vyžadují i určité vlastnosti použitých fotocitlivých roztoků, např. viskozitu apod. Průmyslově nejvyužívanější je nanášení roztoku na válcích. K dosažení silnější vrstvy je možné proces zopakovat, až se získá potřebná síla organického rezistu. Metody pomalého vytahování desky z roztoku a nanášení na odstředivce se využívají pro laboratorní a malosériové výroby.

EXPOZICE FOTOCITLIVÉ VRSTVY (PŘENESENÍ TVARU SPOJOVÉHO OBRAZCE)

Po nanášení a vysušení fotocitlivé vrstvy (sušicí tunel bývá součástí nanášecího zařízení) se tato vrstva dále zpracovává přes filmovou předlohu motivu. Ta může být podle použitého fotocitlivého materiálu buď pozitivní, nebo negativní. Kvalita výsledné desky závisí na filmové předloze, která musí být dokonale kontrastní. Je třeba, aby byl zabezpečen přímý kontakt emulze filmové předlohy a vrstvy fotocitlivého materiálu. Pro exponaci se používá VV záření. Tím se zabezpečuje větší rozlišovací schopnost i lepší manipulovatelnost s polotovarem desky při technologickém zpracování. Nadměrnému tepelnému namáhání fotocitlivé vrstvy a filmové předlohy při osvětlení se předchází chlazením.

VYVOLÁNÍ

Exponovaná fotocitlivá vrstva se zpracovává ve vývojkách. Ty jsou voleny dle charakteru výroby (manuální, ostřiková, většinou průběžná zařízení). Typ vývojky je volen podle druhu použitého fotocitlivého materiálu, ta může být i ve výparech zdraví škodlivá (především vývojka pro negativní materiály).

RETUŠ A MEZIOPERAČNÍ KONTROLA

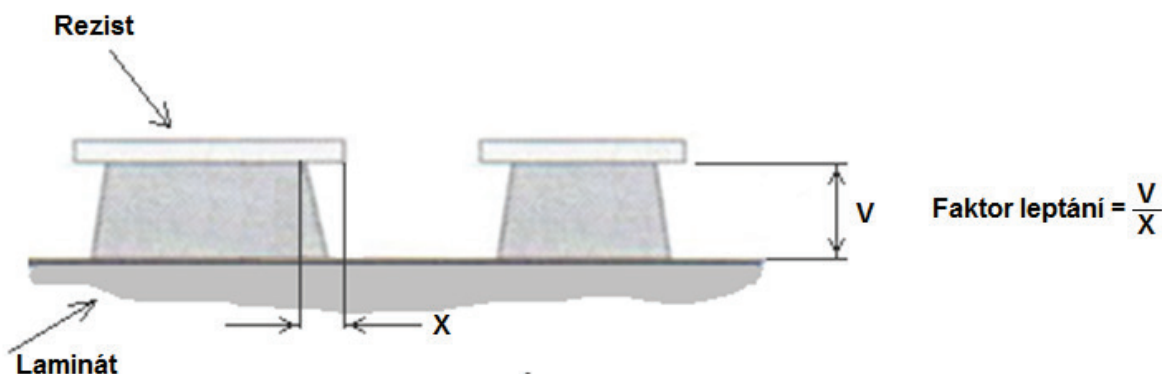
Na provedení retuše a mezioperační kontroly závisí výsledná kvalita a případná zmetkovitost celé produkce, je tudíž nezbytným technologickým krokem. Poškození naneseného rezistu a zbytky emulze se opravují pomocí speciálních retušovacích nástrojů. Podaří-li se zachytit v této fázi výroby potenciálně vadné desky, které je většinou možné opravit, sníží se počet vadných kusů. Výrobce by měl klást na tento krok velký důraz, čemuž by měl odpovídat i počet pracovníků v tomto úseku.

ODSTRANĚNÍ ORGANICKÉHO REZISTU

Po skončení galvanických procesů je třeba odstranit organický rezist. Tzv. stripovací roztoky jsou voleny v závislosti na typu rezistu. Chemický proces odstranění rezistu z povrchu desky a účinek chemického prostředku je u některých zařízení zvyšován kartáči.

LEPTÁNÍ

Při leptání motivů je nutné dodržovat nastavené podmínky leptání prostřednictvím kontrolního zařízení (pH, teplota, obsah mědi apod.), aby případné podleptání motivu bylo co nejmenší, protože se následně mění i rozměrové tolerance motivu, což může mít negativní vliv na kvalitu výroby. Důležitá je kontrola tenkých vodičů, kde existuje možnost jejich proleptání.



Obr. 19 Leptání plošného spoje

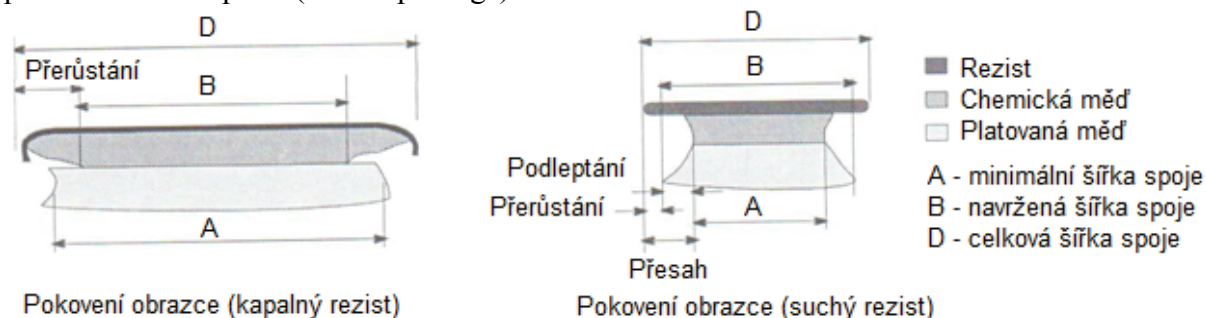
Leptáním se odstraňuje obnažená měděná fólie, a to ponorem nebo v ostřikovacích zařízeních. Pro proces leptání platí difúzní Fickovy zákony. Chemická reakce probíhá na rozhraní kapalina-kov všemi směry stejně. Při nevhodně zvoleném způsobu leptání, zejména při leptání ponorem, může dojít k podleptání a opadávání především tenkých vodičů. Výše uvedený obrázek znázorňuje faktor leptání, který udává velikost podleptání na výšku leptaného spoje. Za optimální se považuje faktor leptání = 1.

Následující nákresy ukazují plošný spoj podle metody zpracování desky plošných spojů. Obrázky znázorňují detaily hran při obou způsobech výroby obrazce spojů.



Obr. 20 Spoje zpracované metodou pokovování panelu "Panel plating", detail A (viz přecházející obrázek výsledný pokovený průchozí otvor)

V případě použití organického rezistu jako rezistu proti leptání bude rezist odstraňován teprve po ukončeném leptání ("Panel plating").



Obr. 21 Spoje zpracované metodou pokovování obrazce „Pattern plating“, detail B (viz předcházející obrázek výsledný pokovený průchozí otvor)

U této metody ("Pattern plating") se negativní fotorezist odstraní a zůstává pouze leptuvzdorný rezist (např. Sn), jak ukazuje obrázek.

STRIPOVÁNÍ VRSTVY KOVOVÉHO REZISTU

Velkou předností stripování vrstvy kovového rezistu z celého povrchu motivu desky plošných spojů před nanášením nepájkivé masky je zabezpečení stejných podmínek pro nanášení nepájkivé masky na celém povrchu desky plošných spojů. Přitom se využívá dvoustupňových stripovacích přípravků na bázi HBF_4 . V prvním stupni se stripuje vrstva Sn (Sn/Pb) a v druhém stupni intermetalická vrstva Cu/Sn/Pb. Úplné odstranění těchto vrstev je důležité z hlediska nanášení pájky na pájecí plošky a do otvorů technologií HAL. Rovněž existují přípravky pro jednostupňové stripování Sn (Sn/Pb) bez obsahu fluoridů, které se jeví jako výhodnější z hlediska technologie jejich používání a následného zpracování odpadových vod.

NEPÁJKIVÁ MASKA

Další důležitou a nedílnou součástí desky plošných spojů je nepájkivá maska. Původně se nepájkivé masky používaly jako prostředek prevence proti tvorbě můstků mezi vodiči během pájení vlnou. Masky se nanášely pouze na stranu pájení a nevyžadovala se jejich stálost. Očekávalo se od nich jen, že vydrží jeden pájecí cyklus. Hustoty obvodů byly nízké, proto na přesnosti aplikace masek příliš nezáleželo. Ve funkci nepájkivých masek se používaly různé materiály, všechny se měly snadno nanášet šablonou nebo sítotiskem na povrch desek plošných spojů.

Koncem 60. a začátkem 70. let se požadavky na nepájkivou masku začaly měnit. Od nepájkivých masek se očekávalo, že budou izolovat a chránit povrch plošného spoje a také zabránovat vzniku můstků pájky. Tyto nové požadavky sloužily k zúžení výběru materiálů na nepájkivé masky v podstatě na akryláty a epoxidy. Rovněž hustota obvodů se neustále



zvyšovala, i když podle dnešních měřítek bylo možno ji považovat za nízkou, proto bylo nutno věnovat zvýšenou pozornost přesnosti aplikace nepájivé masky. Tento požadavek vedl ke výšení rozlišovacích schopností síťotisku.

Koncem 70. let se požadavky na funkčnost pájecí masky dále zvýšily. Vyrovnávání pájky horkým vzduchem (HAL) se stalo standardním postupem, a tudíž se od masek požadovalo, aby snesly dva pájecí cykly. "Čistitelnost" masky se stala standardním požadavkem, protože přispívala k dlouhodobé spolehlivosti. Požadavky na přesnost vyhovující vyšší hustotě návrhu s pokovenými otvory se rovněž zpřísnily na $\pm 0,25$ mm ($0,010''$) a méně. Taková úroveň přesnosti vyžadovala výjimečnou péči o proces síťotisku a iniciovala komerční využití fotomasek s vyšší výtěžností.

Avšak nejvýznamnější trend - zvýšené zaměření na výtěžnost montáže - začal koncem 70. let. Sestavy desek plošných spojů byly stále složitější a součástky dražší. Toto zaměření na výtěžnost dále zvýšilo pozornost věnovanou zlepšování vlastností nepájivé masky a přesnosti její aplikace. Zaměření na výtěžnost pokračovalo do 80. let souběžně se zvyšující se hustotou obvodů a cenou součástek. Trend se zrychloval exponenciálně s tím, jak se povrchová montáž součástek stala standardním průmyslovým postupem v polovině 80. let.

Povrchová montáž se zvýšeným počtem vývodů součástek a zmenšenou roztečí z 2,54 mm ($0,100''$) na 0,5 mm ($0,020''$) kladla ještě vyšší požadavky na nepájivou masku. Aby bylo možno vyhovět přísnějším požadavkům těchto technologických nároků, výrobci stále častěji obraceli pozornost k tekutým, fotograficky zpracovatelným nepájivým maskám.

Volba vhodné nepájivé masky je důležitá pro výrobu a montáž velmi hustých desek plošných spojů s povrchovou montáží. Výtěžnost výroby je silně ovlivňována vlastnostmi nepájivé masky, jako je:

- rozlišovací schopnost,
- přilnavost,
- zapouzdření povrchu,
- opakovatelnost.

Následující vlastnosti nepájivé masky mají přímý vliv na kvalitu pájení desky plošných spojů:

- tloušťka,
- odolnost proti tepelnému nárazu,
- ochrana průchodek při montáži.

Čištění konečné sestavy je rovněž ovlivňováno chemickou odolností a tloušťkou masky.

1.7.4 NEPÁJIVÁ MASKA PŘI VÝROBĚ PLOŠNÝCH SPOJŮ

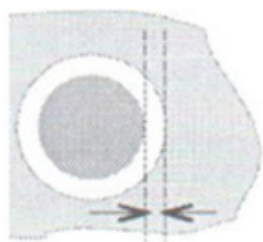
Ke kvalitativním vlastnostem, které je nutno u masek sledovat, patří rozlišovací schopnost, přilnavost a schopnost zapouzdření plošných spojů, případně otvorů.

ROZLIŠOVACÍ SCHOPNOST

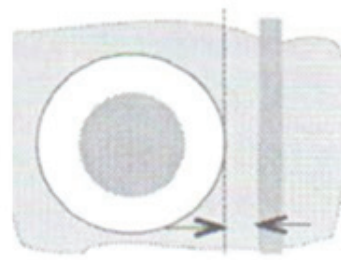
Nepájivé masky by měly zachovávat své rozměry během celého výrobního procesu. Podle typu nepájivé masky a její rozlišovací schopnosti, závisí kvalita reprodukce. Při skutečné výrobě plošného obvodu však několik faktorů nedovolí opakovanou výrobu s přesnou reprodukcí. Sem patří změny předlohy (nabývání nebo smršťování), posuny podložky a vývoj charakteristik nepájivé masky. Proto je třeba počítat s určitými tolerancemi. ČSN IEC 326-3



uvádí pro fotograficky zpracovanou masku 0,1 mm až 0,6 mm a masku zpracovanou sítotiskem od 0,4 do 1 mm.



Nepájivá maska má odstup 0,25 mm (0,4 mm) od pájecí plošky



Minimální odstup mezi aperturou masky a vodičem je 0,08 mm

Obr. 22 Rozlišovací schopnost kapalně epoxidové, fotograficky zpracovatelné nepájivé masky

PŘILNAVOST

Přilnavost nepájivé masky je rozhodujícím parametrem pro zajištění stálých mechanických a elektrických vlastností. Přilnavost je především řízena složením materiálu masky (i když ostatní vlastnosti, jako je příprava povrchu, jsou rovněž důležité). Mezi používané materiály patří epoxidy, které jsou považovány za materiál s nejlepší přilnavostí. Používají se na různých deskách plošných spojů zhotovených ze skloepoxidu, polyimidu a různých termoplastů jakož i kovů včetně mědi, cínu/olova, zlata, cínu a niklu.

Pro zvýšení přilnavosti nepájivé masky k povrchu měděného motivu desky plošných spojů je možné použít i technologii oxidace mědi, tzv. černění.

1.7.5 ZAPOUZDŘENÍ POVRCHU PLOŠNÉHO SPOJE

Úplné zapouzďření poskytuje optimální ochranu proti vnějším vlivům. Materiál nepájivé masky musí být jednotně nanesen po celém povrchu desky. Kapaliny s nízkou viskozitou zaručují lepší zapouzďření povrchu, než lze dosáhnout s kapalinami o vyšší viskozitě nebo s polotuhým filmem.

Se zapouzďřováním také úzce souvisejí krycí a plnicí schopnosti. Krycí schopnost určuje tloušťku povlaku masky, plnění určuje schopnost masky pronikat mezi vodiče s nepatrným odstupem.

Jednoduchý vodič



Maximální výška vodiče 0,13 mm

Vícenásobný vodič



0,25 mm - rozteč vodič/mezera

- max.výška vodiče 0,1-0,12 mm

0,2 mm - rozteč vodič/mezera

- max.výška vodiče 0,08-0,1 mm

0,13 mm - rozteč vodič/mezera

- max.výška vodiče 0,075-0,09 mm

Typický povlak pro výšku vodiče 0,08 mm - 0,025 mm pro střed

- 0,018 mm pro roh

- 0,030 mm laminát



Obr. 23 Krytí a plnění kapalně epoxidové, fotograficky zpracovatelné nepájivé masky, která definuje tloušťku vrstvy a schopnost maskovat mezi vodiči s nepatrným odstupem

Na výše uvedeném obrázku je předpokládané krytí a plnění pro záclonový povlak kapalně nepájivé masky s nízkou viskozitou. Záclonové kapalně povlaky je možno nanášet v tloušťkách od 0,013 mm (0,0005") do 0,04 mm (0,0015") s vrstvou na vrcholu vodičů asi o 30% menší. Typické výrobní parametry pro obvod vysoký 0,08 mm (0,003") jsou jmenovitá tloušťka 0,030 mm (0,0012"), 0,025 mm (0,001 ") na střezech vodičů a 0,018 mm (0,0007") na okrajích vodičů. Záclonové kapalně povlaky 0,08 mm (0,003") jsou schopny plnění mezi vodiči s odstupem 0,13 mm (0,005") do výšky vodičů 0,08 mm (0,003") až 0,09 mm (0,0035"). Parametry síťotiskové masky jsou uvedeny dále.

Vliv nepájivé masky na jakost pájení desky plošných spojů. Vlastnosti nepájivé masky mají velký vliv na pájitelnost. Přesně umístěná maska zabraňuje zkratům a můstkům na desce plošných spojů během pájení. Řízená tloušťka masky umožňuje správné nanesení pájky a odolnost masky proti tepelnému nárazu je důležitá pro některé pájecí operace. Celistvost masky je dána její přilnavostí a chemickou odolností.

Ochrana průchozích otvorů. Vhodným použitím nepájivé masky na průchozí otvory lze zvolit aplikaci pájky do otvoru. První běžnou aplikací pájky na průchozí otvory je při závěrečné úpravě desky plošných spojů HAL. Pokrytí okolí otvoru maskou představuje obrázek A. Druhou možností je umístění masky přímo do průchozího otvoru (obráz. B), tím se zabrání postupu roztavené pájky směrem ven z otvoru.



Obr. 24 Ochrana průchozích otvorů tekutou fotocitlivou nepájivou maskou

ČISTITELNOST

Chemická odolnost nepájivé masky a její tloušťka (kvůli znečištění pod součástkami) ovlivňuje čistitelnost konečné desky plošných spojů.

Nepájivá maska musí odolávat působení tavidla. To umožňuje používat bezoplachová tavidla. Tloušťka nepájivé masky musí být co nejmenší, aby mezi spodkem součástky a povrchem masky byla co největší mezera, kudy by pronikal čistící roztok při procesu čištění.

SPOLEHLIVOST NEPÁJIVÉ MASKY

Zkouška zrychleným stárnutím je standardní metodou zjišťování dlouhodobé spolehlivosti. Typická zkouška zrychleným stárnutím byla vypracována firmou British Telecom k simulaci 20 let provozu. Při použití této zkušební metody se hřebenové plošné spoje opatřené nepájivou maskou o tloušťce 0,16 mm (0,0065") uvedou pod napětí 15 V stejnosměrného napětí při teplotě 85°C a 85% relativní vlhkosti na dobu 2500 hodin. Za těchto podmínek je základním požadavkem, aby mezi vodiči nedošlo ke zkratu nebo k dendritickému růstu a odpor izolace zůstal na přijatelné úrovni. Nepájivá maska by měla splňovat podmínky této zkoušky.



TYPY NEPÁJIVÝCH MASEK

Tekutá nepájivá maska nanášená sítotiskem

Do první skupiny patří nepájivé masky nanášené sítotiskem. Natisknutí se provádí přes síto na potiskovací zařízení (ručním, poloautomatickém nebo plně automatickém). Výsledek závisí na volbě tkaniny, napětí síta, tlaku a rychlosti stěrky a výšce odtrhu síta.

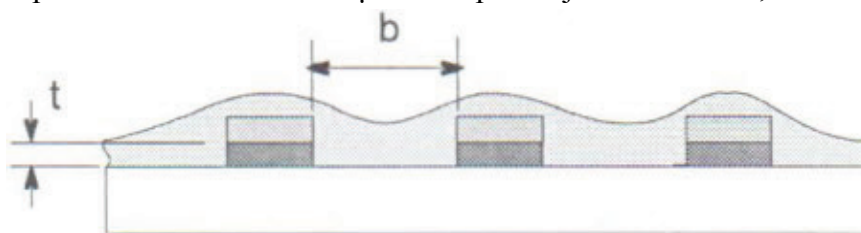
Mezi výhody patří:

- velmi jednoduché nanášení,
- malé náklady i pro malá a střední množství,
- malé investiční náklady pro zařízení,
- velký výběr materiálů,

Jsou zde i nevýhody:

- relativně velké náklady na malý počet kusů,
- kolísavé tloušťky nánosů,
- u velkých formátů může být problém dodržet tolerance, přesnost je dána
- sesazením síta a desky plošných spojů, protažením síta a technikou tisku,
- nemožnost použití na jemné plošné spoje.

Maska nanášená sítotiskem je schopna zaplnit prostor mezi paralelními vodiči pouze za následujícího předpokladu. Při tloušťce t Cu fólie menší než $17,5 \mu\text{m}$ se doporučuje b větší než $0,20 \text{ mm}$ a při tloušťce t Cu fólie $35 \mu\text{m}$ se doporučuje b větší než $0,30 \text{ mm}$.



Obr. 25 Omezení nepájivé masky nanášené sítotiskem

Z výše uvedených skutečností vyplývá, že tento typ se nehodí pro SMT. Řešením je suchá světlocitlivá nepájivá maska - suchý rezist nebo tekuté rezisty zpracovávané fotocestou.

Suchá fotocitlivá nepájivá maska

Suchý polymerní film definované tloušťky ($50, 75, 100 \mu\text{m}$) se za tepla a tlaku navaluje na povrch přířezu, který je upravený, čistý a suchý. Je schopný překrýt i otvory s průměrem větším než 2 mm . Pro odstranění vzduchových bublin podélných vodičů se s úspěchem používá vakuum. Tímto způsobem dojde k téměř dokonalému zapouzdření vodiče. Nalaminovaný film se zpracuje běžným způsobem, známým ze zpracování suchých fotorezistů. Expoziční časy jsou v porovnání s tekutými laky podstatně kratší ($5\text{--}15 \text{ s}$) a závisí na tloušťce filmu. Nakonec se film vy tvrdí v kombinované UV a IČ sušárně.

Výhody:

- vysoká přesnost při reprodukci,
- nepatrné náklady u malých sérií,
- rovnoměrné povrstvení,
- možnost velkých formátů.

Nevýhody:



- větší investiční náklady na zařízení,
- vyšší materiálové náklady,
- nutnost pracovat v klimatizovaných prostorech,
- náklady na vývojku a její přípravu.

Jiným technologickým postupem je navalení přípravku Conformask při normální teplotě (20°C) na přířez desky plošných spojů vložením do vakua a zahřátím na laminační teplotu. Ihned po vakuové laminaci se odstraní ochranná PE folie, která je součástí Conformasku, přířez se vloží do jednotky, kde se prudce ochladí na teplotu cca 20°C, čímž se film zatáhne do otvorů a pod převisy podleptaných vodičů. Poté se film použitím horkých přitlačných válců roztlačí na střezech vodičů k jejich hranám, čímž se dosáhne rovnoměrného obalení vodičů. Po expozici je film zpracovatelný ve vodo-alkalických roztocích za použití vyšších tlaků na tryskách vyvolávacího zařízení. Vytvrzení vrstvy nastává při použití UV a IČ záření. Firma Dynachem, která je výrobcem Conformasku, na základě svých zkušeností doporučuje použití nepájlivé masky s tloušťkou 50 µm, protože tyto masky mají dobrou výtěžnost výroby.

Tekutá fotocitlivá nepájlivá maska nanášená clonovým polem

Třetí skupinu tvoří tekutá fotocitlivá nepájlivá maska. Fotocitlivý lak je dvousložkový, obsahuje velké množství pevných látek (až 70%) a musí mít definovanou viskozitu a čistotu. Může být zpracováván rozpouštědly nebo vodo-alkalickými roztoky. Podmínky nanášení musí být kontrolovány automaticky s vyloučením lidského vlivu. Sušení přířezu s vrstvou laku musí mít definovaný průběh, aby byla zaručena jeho další zpracovatelnost. Tekutý lak je možné nanášet pouze jednostranně. Při nedodržení zpracovatelských podmínek může lak zatéct do otvorů, odkud se jen velmi těžko odstraňuje, a to je na závalu především u oboustranného osazení desky plošných spojů. Takto zpracované desky plošných spojů mají vrstvu laku na jedné straně sušenou dvakrát, čímž se mění podmínky zpracování jedné a druhé strany desky plošných spojů. Z tohoto důvodu výrobci nedoporučují oboustranné vrstvení přířezu a následné zpracování motivu nepájlivé masky fotocestou. Je lepší používat uzavřených okruhů, tj. jednostranně vrstvený přířez se zpracuje fotocestou, vyvolá se nasvícený motiv, vrstva masky se vy tvrdí UV zářením a přířez se vrátí na povrstvení a zpracování druhé strany desky plošných spojů. Nakonec se polymerní film na obou stranách desky termicky vytvrdí v sušárně.

Fotocitlivé laky zpracovávány rozpouštědly mají nižší nasákavost vlhkosti než laky zpracovávány vodo-alkalickými roztoky. Při fotopracování fotocitlivých laků je nutné počítat s delšími expozičními časy i při použití 5 kW zdroje UV světla (40-120 s). Dlouhé expoziční časy mají za následek nadměrné zahřívání filmové matrice při nedokonalém chlazení výbojky a tím dochází ke změnám jejich rozměrů a k jejímu znehodnocení.

Při použití fotocitlivých laků zpracováváných rozpouštědly se tyto dostávají do technologického procesu a vyžadují kontinuální regeneraci a následné zpracování nasycených vyvolávacích médií, což značně prodražuje celý výrobní proces.

Jakmile se při vyvolávání motivu nepájlivé masky nedostatečně odstraní neexponované části filmu, vznikají problémy při dalších operacích (HAL, pájení). Proto musí být vyvolávací zařízení vybavena ostřikovými systémy s tlakem až 4,5 bar na tryskách a proces průběžně kontrolován.



Tekuté laky při nanášení kopírují povrch reliéfu desky plošných spojů a vytvářejí zvlněnou vrstvu laku, což někdy způsobuje problémy při jeho zpracování (ostrost kresby apod.). Tekuté laky nejsou schopny dokonale překrýt propojovací otvory (záleží na jejich průměru). Tento faktor je nutné zohlednit při použití tavidla, které se z otvorů s malým průměrem vymývá jen velmi obtížně. Z tohoto důvodu některé normy vůbec nedovolují umístění propojovacích otvorů pod pouzdra SMD.

Celá technologie je náročná na čistotu a klimatizaci pracovního prostředí.

1.7.6 ZÁVĚREČNÁ POVRCHOVÁ ÚPRAVA

Protikorozi ochrana povrchu motivu desky plošných spojů nekrytého nepájivou maskou (pájecí plošky, součástkové otvory, průchozí otvory) se zabezpečuje nanášením vrstvy pájky technologií HOT AIR LEVELING. Před nanesením pájky je nutné motiv dokonale umýt a následně aktivovat, aby se odstranily oxidy mědi z povrchu motivu. Používá se především vodorozpuštěné tavidlo. Tloušťka nánosu cca 6-10 μm Sn/Pb s minimálním obsahem 55% Sn dostatečně zabezpečuje výborné pájecí vlastnosti a také ochranu povrchu mědi před vlivy prostředí. Nanosená horká vrstva se vyrovná pomocí horkého vzduchu. Přířez je však nutné ihned po povrchové úpravě umýt od zbytků tavidla a vysušit.

Pokud se aplikuje nepájivá maska přímo na kovový rezist Sn (Sn/Pb), dochází při tepelné zátěži při pájení ke zvrásnění povrchu Sn/Pb (tzv. pomerančový efekt) a tím ke snížení přilnavosti polymerového filmu nepájivé masky k povrchu desky plošných spojů. Může dojít až k mechanickému poškození celistvosti nepájivé masky. Ve většině případů se HAL používá na místa, která nezakrývá nepájivá maska. To znamená, že nepájivá maska je nanášena na čistou měď a v místech, kde maska není (plošky, pokovené otvory, průchodky, testovací body), se aplikuje HAL.

Technologie HAL je použitelná na desky plošných spojů, které mají obrazce vývodů s roztečí 0,4 mm. Na užší rozteče je nutno již použít chemicky aplikovaný povlak Ni/Au, bezproudově nanášenou vrstvu cínu s organickými aditivy, případně povlaky na bázi Ag s organickými aditivy.

Tyto technologie zatím nejsou masivně rozšířeny.

Pájkou je rovněž možné nanést ve formě pájecí pasty a následně provést přetavení. Postup je obdobný jako při nanášení pasty pro pájení SMD.

Další možností ochrany plošných spojů před oxidací je použití tzv. OSP (Organic Solder Preservatives) - organických inhibitorů na odhalené měděné plošné spoje. Aplikují se po nanesení nepájivé masky. Používají se na jednodušší obrazce jednovrstvých desek určených pro komerční aplikace.

Tabulka ukazuje maximální dobu skladování desek plošných spojů, aby byla zachována jejich dobrá pájitelnost pro jednotlivé druhy finálních úprav. Skladování desek je za následujících podmínek: 15-35°C, relativní vlhkost 45-75%, desky jsou zabalené v PE sáčkách. Podmínky jsou v ČSN EN 61760-2.



Závěrečná úprava	Maximální doba skladování [měsíc]
SnPb galvanicky + přetavení	12
SnPb + HAL	12
Ochranné laky, OSP	3
Chemický cín	1

Tab. 9 Maximální doba skladování desek plošných spojů, po kterou je zajištěna dobrá pájitelnost.

1.7.7 KONEČNÉ MECHANICKÉ OPERACE

Těmito operacemi se obvykle rozumí odštížení desky na konečný rozměr, úprava přímých konektorů, potisk, nanesení ochranného laku atd.

V celém technologickém procesu výroby desek plošných spojů je třeba klást zvýšený důraz na mezioperační kontroly, aby se nezvyšovaly náklady na výrobu pokračováním na vadných kusech. I zde platí pravidlo deseti. K zamezení zvyšování normální technologické zmetkovitosti je nutné provádět retuše a případné opravy. Pro složitější desky je nezbytná také vstupní kontrola na kvalitu pokovení otvorů a jejich elektrické parametry, vodivost (příp. přerušeni vodičů), tolerance vnějších rozměrů atd.

Kontrola se provádí v závislosti na vybavenosti kontrolních pracovišť buď vizuálně, pomocí jednoduchých měřičů a přípravků nebo na automatických testovacích zařízeních.

Součástí každé vyrobené desky plošných spojů by měl být tzv. atest, což je osvědčení o kvalitě a výstupní kontrola.

1.7.8 ELEKTRICKÉ TESTOVÁNÍ

Vysoká prvotní výtěžnost desek plošných spojů je měřítkem kvality výroby a určuje, zda použité materiály a postupy byly bezporuchové. Elektrické testování, často ve spojení s optickou kontrolou, se stalo požadavkem zvláště u desek plošných spojů s jemnými vodiči. Konstrukci i možnostem testovacího zařízení je nutné přizpůsobit návrh desek plošných spojů. Testovací zařízení mají jehlová pole (jednostranná a oboustranná), kterými se kontaktují desky v každé pájecí plošce a průchozím otvoru. Kontrola spočívá v elektrickém prozkoušení každého plošného spoje. Operace testování je velmi nákladná a její cena představuje 10-15% z výrobní ceny desky plošných spojů. Desky plošných spojů s hustými motivy není vhodné ani možné *opravovat*, protože se tím velmi snižuje jejich spolehlivost.

1.7.9 VÝROBA PLOŠNÝCH SPOJŮ SEMIADITIVNÍ METODOU

Semiaditivní metoda výroby desek plošných spojů má obdobné výhody a přednosti jako výrobní proces s měděnou fólií tloušťky 5 μm . Výchozím materiálem je speciální neplátovaný materiál bez měděné fólie, který se celý včetně otvorů pokoví po vyvrtání a úpravě povrchu (sledující co největší adhezi následného povlaku) vrstvou mědi o tloušťce cca 5 μm . Další postup je obdobný jako v případě výroby desek metodou pokovování obrazce.

Semiaditivní technologie je důležitým mezistupněm k plně aditivní technologii, jež je pro budoucnost velmi perspektivní.

1.7.10 VÝROBA PLOŠNÝCH SPOJŮ ADITIVNÍ METODOU

Aditivní proces zhotovování spojů s pokovenými otvory je velice zajímavý úplným odpadnutím leptání, a tím i problémů s ním spojených (podleptání, zkratky způsobené



oddělenými převisy, zpracování odpadli po leptání). Výchozí základní materiál je neplátovaný. Po vyvrtání otvorů se přímo vytváří požadovaný vodivý obrazec včetně pokovení otvoru.

Měď nebo další kovové povlaky se nanášejí chemicky bez použití elektrického proudu. Proces má i další výhody. Na rozdíl od subtraktivního procesu není výchozí materiál tepelně zpracován s měděnou fólií, čímž nedochází k vnitřnímu pnutí, které je příčinou prohnutí a zkroucení desek. Vysoce náročnými, ale kvalitními lázněmi se při chemickém vylučování mědi dosahuje podstatně lepší rovnoměrnosti jak na ploše, tak v otvorech desky. Tím nastávají i příznivější poměry při pokovování materiálů různé tloušťky ve vztahu k průměru otvorů. Je možno pokovovat i otvory malých průměrů (0,3 mm). Aditivní proces umožňuje plně respektovat přání zákazníka, co se týče tloušťky vodičů, přičemž dochází k úsporám mědi.

Na jedné straně stojí nesporné výhody této technologie, ale na straně druhé vysoké finanční náklady na výzkum a vývoj. To je hlavním důvodem, proč se aditivním způsobem výroby zabývá jen několik velkých světových firem a proč se tento proces podstatně nerozšířil do sériové výroby.

Aditivní technologie umožňuje zhotovovat spoje a mezery širší 0,1 mm. Z určitých příčin, např. přilnavosti, nejsou užší spoje technicky realizovatelné.



2 LITERATURA

doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D. a kolektiv. *ZÁKLADY KONSTRUKČNÍCH TECHNOLOGIÍ V ELEKTRONICE - Výroba DPS v laboratořích VŠB TU Ostrava*, učební text a návody do cvičení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, FEI, KAT 450. 2012 [30.6.2013]. Interní document.

Ing. Martin Abel. *PLOŠNÉ SPOJE SE SMD, NÁVRH A KONSTRUKCE*. Nakladatelství Platan, Kunětická 101, Pardubice. Tisk Grafion Pardubice, Vydání první, dotisk. ISBN 80-902733-2-7. 2000 [20.6.2011].

Kristýna Friedrischková. *Příprava výukových textů v projektu MOST-TECH, Technologie propojení součástek v systému, plošné spoje – materiály, konstrukce, výroba*. VŠB TU Ostrava, učební text a návody do cvičení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, FEI, KAT 450. 2012 [30.6.2013]. Dostupné z
< http://mostech.vsb.cz/source/dokumenty/4_Plosne%20spojce.pdf >.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ**



NAVRHOVÁNÍ A TECHNOLOGIE DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

TECHNOLOGIE PROPOJENÍ SOUČÁSTEK V SYSTÉMU PLOŠNÉHO SPOJE

Ing. David Vala
Ing. Kristýna Friedrischková
Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D.
Ing. Bohumil Horák, ml.
Ing. Ondřej Balák

Ostrava 2013

© Ing. David Vala, Ing. Kristýna Friedrischková, Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D., Ing. Bohumil Horák, ml., Ing. Ondřej Balák

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3062-9



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

1	TECHNOLOGIE SPOJOVÁNÍ SOUČÁSTEK V SYSTÉMU PÁJENÍ.....	3
1.1	Úvod	4
1.1.1	Montáž součástek na plošný spoj	4
1.2	Technologické postupy v povrchové a zástrčné montáži.....	4
1.2.1	Mechanická montáž.....	5
1.2.2	OSAZOVÁNÍ.....	8
1.2.3	Technologické postupy montáže vývodových součástek.....	8
1.2.4	Požadavky a osazení axiálních a radiálních součástek na DPS.....	10
1.2.5	Technologické postupy v povrchové montáži	12
1.3	Materiály pro montážní technologie	16
1.3.1	Tavidlo.....	16
1.3.2	Pájka.....	23
1.3.3	Pájecí pasta	25
1.3.4	Zpracování pájecí pasty	28
1.3.5	Teorie pájení	29
1.3.6	„STUDENÉ SPOJE“.....	31
1.3.7	Termomechanické namáhání pájeného spoje.....	31
1.4	Vady pájeného spoje	34
1.4.1	Klasifikace vad podle fáze vzniku	34
1.4.2	Požadavky na kvalitu pájených spojů	35
1.4.3	Pájené spoje s vývodovými součástkami	35
1.4.4	Požadavky na zapájení čipových součástek	36
1.4.5	Technika ručního pájení.....	37
1.4.6	Typy pájecích zařízení	38
1.4.7	Metody pájení přetavením.....	39
1.4.8	Osazování smd	40
1.4.9	Kritéria pro výběr optimálního zařízení	47
2	LITERATURA	48



1 TECHNOLOGIE SPOJOVÁNÍ SOUČÁSTEK V SYSTÉMU PÁJENÍ



OBSAH KAPITOLY:

Obsahem této kapitoly je seznámit studenty s technologií spojování součástek v systému znamená seznámení se s povrchovou montáží jak vývodových tak SMD součástek, jejich možností pájení. K této technologii neodmyslitelně také patří typy tavidel a pájek k tomu využívaných.



MOTIVACE:

Každý technolog či student zabývající se výrobou zařízení musí znát technologie k jejich vytvoření. Do jedné z těchto technologií patří také technologie spojování součástek v systému pájení. Po prostudování tohoto materiálu by měl být každý schopen zvolit si typ osazování desky plošného spoje a také vybrat materiál kterým tuto činnost bude realizovat.



CÍL:

Cílem je čtenáře seznámit s technologií montáže vývodových a SMD součástek. Dále pak seznámit je s možnostmi materiálů pro celý cyklus realizace plošného spoje od uložení součástek, po zvolení vhodného typu past a tavidel a správného určení pájecího cyklu.

1.1 ÚVOD

Pájení je obecný název technologie, při které jsou kovy spojovány - pájeny pomocí pájky. V případech, které nás zajímají nejvíc, tzn. pájení součástek či různých materiálů převážně z barevných kovů a jejich slitin běžně dostupnými páječkami, hovoříme o tzv. měkkém pájení. Logicky vás napadne, že existuje i pájení tvrdé, rozlišujícím činitelem je teplota.

Hranice není úplně přesně definována, pro hrubou orientaci můžeme říci, že při teplotách do cca 330°C hovoříme o pájení měkkém, při teplotách nad cca 500°C o pájení tvrdém. Princip měkkého pájení spočívá ve spojování - pájení kovů pomocí pájky, která má bod tavení nižší, než bod tavení spojovaných - pájených kovů. V našem zájmovém případě měkkého pájení je pájkou slitina cínu a dalších vhodných kovů, u tvrdého pájení jde obvykle o slitinu mědi, hliníku a stříbra.

1.1.1 MONTÁŽ SOUČÁSTEK NA PLOŠNÝ SPOJ

Desky s plošnými spoji mohou obsahovat nejen SMD, ale i klasické součástky. Tomu musí být podřízen způsob montáže součástek na desky s plošnými spoji i způsob pájení.

Jsou možné následující způsoby montáže:

- **montáž pouze SMD součástek.** Ta může být: - **jednostranná**, kdy na desku s plošnými spoji jsou součástky osazovány pouze na jednu stranu;
 - **oboustranná**, kdy součástky jsou osazeny z obou stran plošného spoje.
- **kombinovaná montáž SMD i klasických součástek.** Součástky pro klasickou montáž jsou umísťovány na jednu stranu desky s plošnými spoji (na stranu součástek), SMD součástky jsou osazovány na stranu spojů. Při osazování jsou nejprve osazeny součástky pro klasickou montáž, následuje osazení dále popsaným popisem SMD součástek a pájení vlnou.
- **kombinovaná montáž SMD i klasických součástek**, kdy jsou SMD součástky osazeny jak na straně klasických součástek, tak na straně spojů.
 - **Úprava plošného spoje před osazením součástek**

Prvním předpokladem pro kvalitní osazení je výborná pájitelnost DPS. Toho se zpravidla dosahuje nanesením tavidla.

Tavidlo je zpravidla kapalná látka, která při ohřátí zrychluje nebo podporuje smáčení pájených materiálů pájkou. Tavidlo za působení tepla odstraní z povrchu pájeného materiálu oxidy i jiné nečistoty a chrání jej během procesu pájení proti oxidaci. Reakce tavidla s oxidy zapříčiní zvýšení povrchového napětí a tím zlepšení smáčivosti. Přísady, pomocí kterých je dosahováno kvalitní pájení jsou nazývány **aktivátory**.

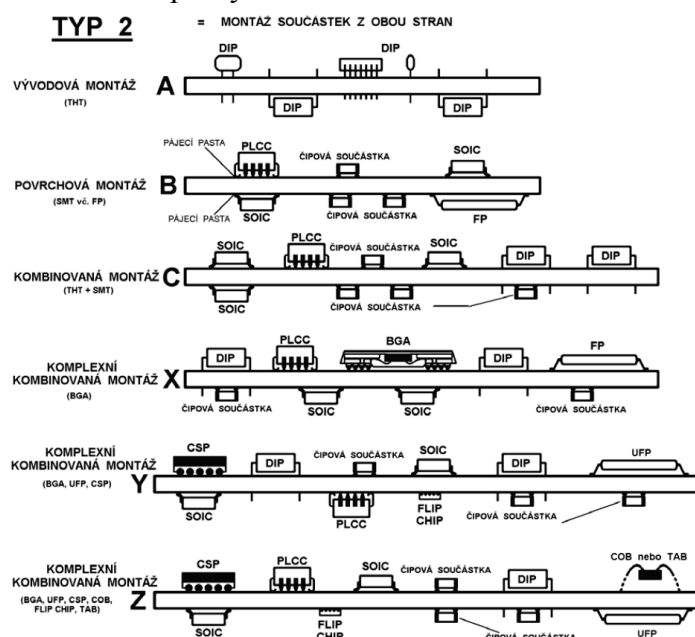
Hlavním požadavkem na tavidlo je zajistit spolehlivý proces pájení s reprodukovatelnou kvalitou pájených spojů a s minimálním obsahem zbytkovým obsahem nečistot po pájení. Jsou preferována bezoplachová tavidla, která nevyžadují čištění (tzv. no clean typy).

1.2 TECHNOLOGICKÉ POSTUPY V POVRCHOVÉ A ZÁSTRČNÉ MONTÁŽI

Montážní a propojovací sestavy (tj. osazené desky s plošnými spoji) jsou osazeny součástkami z jedné strany (typ 1) nebo z obou stran (typ 2) viz Obr. 1. Montují se



elektronické součástky určené pro zástrčnou technologii (Through Hole Technology – THT) i povrchovou montáž (Surface Mount Technology - SMT) s různou konstrukcí vývodů, způsobů pouzdření i mechanické prvky.



Obr. 1. Přehled montážních a propojovacích sestav - typ 2

Příklad značení:

- 1A (jednostranná montáž vývodových součástek)
- 2B (oboustranná montáž SMD prvků až po fine pitch)
- 2Z (komplexní oboustranná kombinovaná montáž se součástkami CSP, COB, Flip Chip, TAB aj.).

Pozn: Tento způsob členění je dle normy IPC-J-STD-013 z roku 1996 a je zpracováván i pro evropskou normu IEC.

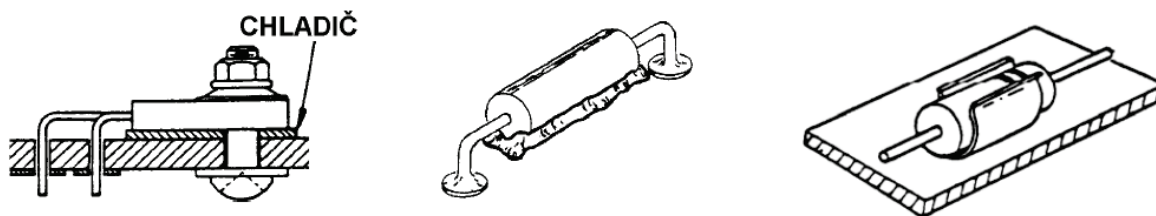
1.2.1 MECHANICKÁ MONTÁŽ

Zahrnuje operace prováděné na montážní a propojovací struktuře, např.:

- montáž nýtů, pájecích oček i konektorových pinů
- montáž chladičů, konektorů, úhelníků
- upevnění elektronických součástek nýtováním, šroubováním, pomocí montážních svorek
- fixace součástek pomocí tmelů i lepidel
- odizolování a upevňování vodičů a lanek

Mechanická montáž doplňuje montáž elektronických prvků s cílem dosažení požadované spolehlivosti i funkčnosti. Montáž se realizuje před nebo po montáži elektronických prvků:





Obr. 2. Příklady upevnění součástek

Kvalita upevnění montážních prvků se posuzuje zejména opticky, sleduje se shoda s požadavky norem např. IPC-A-610 B, IPC SM-782 aj.

Více v kapitole: Technologie spojování součástek v systém, rozebíratelné spoje, kabeláže

MONTÁŽ ELEKTRONICKÝCH PRVKŮ

Vývodová montáž

Na montážní a propojovací strukturu s upevněnými mechanickými prvky se montují vývodové součástky. Vlastní proces montáže spočívá v natvarování vývodů, osazení do otvorů DPS a zapájení. Některé elektronické prvky jsou ještě často fixovány mechanicky např. pomocí nýtů, šroubů na desce plošného spoje.

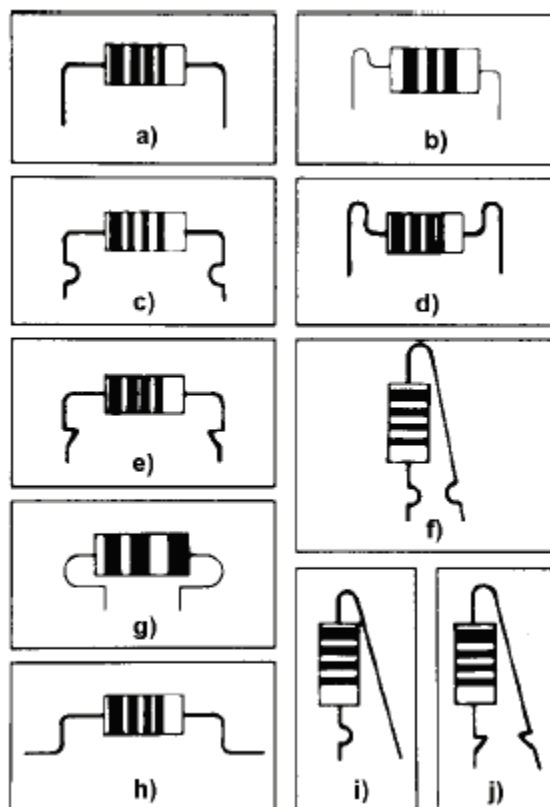
Tvarování vývodů

Hlavním úkolem natvarování je, aby byly součástky lépe fixovány na DPS během procesu pájení a po pájení zvýšily spolehlivost pájeného spoje.

Před tvarováním vývodů je nutno určit **rastr tvarovaných vývodů** (tj. vzdálenost mezi vývody – buď z technické dokumentace nebo přímo z hotové DPS) i **vlastní tvar a délku vývodu**. Tvary vývodů jsou znázorněny na Obr. 3. a Obr. 4.

Vývody součástky jsou fixovány v otvorech následujícími způsoby:

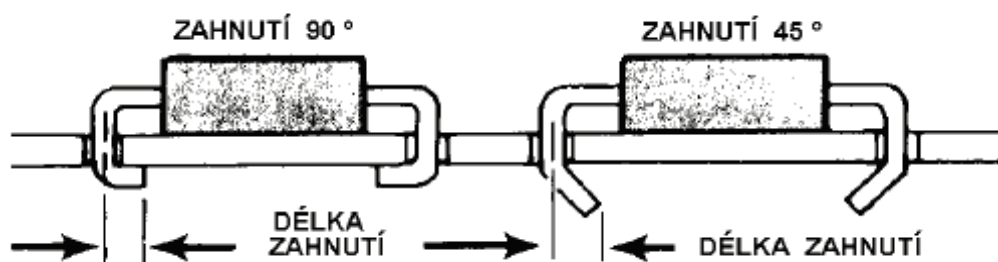
- vlastní hmotností viz Obr. 3. a), b), d), g)
- pružností natvarovaných vývodů viz c), e), f), i), j)
- zahnutím vývodů na druhé straně desky (tg. cut and clinch), Obr. 4.
- pomocí upevňovacích prvků (přišroubování chladiče k DPS aj.)



Obr. 3. Tvary vývodu klasických součástek

Pro některé aplikace vyhovuje tvarování dle obr. 3, h) a osazení vývodové součástky na pájecí plošky a pájení postupy jako v povrchové montáži

Pro zvýšení spolehlivosti při náročnějších aplikacích se požaduje vývody na spodní straně DPS zahýbat, tzv. technologie cut and clinch viz obr. 4. Tyto zvýšené požadavky má např. automobilový průmysl, trakce, armáda, aj.



Obr. 4. Fixace vývodů tzv. technologií cut and clinch

Zásady pro tvarování vývodů

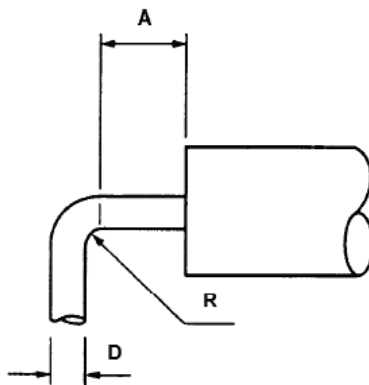
A - vzdálenost od ohybu- minimálně $1 \times D$, ne méně než 0,8 mm

D - průměr vývodu součástky

R - poloměr ohybu:

- minimálně $1 \times D$ (D menší než 0,8 mm)
- minimálně $1,5 \times D$ (pro D od 0,8 do 1,2 mm)





Obr. 5. Zásady pro tvarování

Minimální vzdálenost L tvarovaných vývodů axiálních součástek:

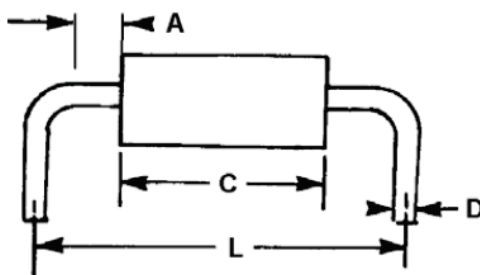
$$L = C + 2A + 3D$$

L - minimální vzdálenost

C – max. velikost tělesa součástky

D – průměr vývodu

A – minimální vzdálenost počátku ohybu od tělesa součástky Obr. 6.



Obr. 6. Zásady pro tvarování

1.2.2 OSAZOVÁNÍ

Osazování se provádí ručně nebo strojově. Rozhodující je sériovost, požadavky na kvalitu i vybavenost technologickými zařízeními.

1.2.3 TECHNOLOGICKÉ POSTUPY MONTÁŽE VÝVODOVÝCH SOUČÁSTEK

RUČNÍ MONTÁŽ

Prototypové vzorky

Hlavní zásady pro osazování vývodových součástek:

- osazování začínáme zleva doprava, odshora dolů,
- postupujeme od nejmenších součástek po největší.

Pozn: je vhodné prověřit správné tolerance otvorů na DPS a průměry vývodů součástek, rozteče vývodů a případně postup osazování modifikovat.

Rozpiska + osazovací plán +

DPS + součástky + mechanické prvky

Postup:



- upevnění mechanických prvků
- ruční eventuálně poloautomatické tvarování a zkracování vývodů elektronických součástek pomocí přípravků, nástrojů i zařízení
- osazení ruční, případně s poloautomatickou podporou
- pájení strojní (vlnou) případně ruční
- čištění
- doosazení (po pájení vlnou)
- vizuální kontrola
- testování, opravy
- oživování

Malosériová produkce

Jedná se o desítková a stovková množství DPS. Je nutné zvolit optimální technologii:

- **Tvarování** (tvarovací poloautomaty na axiální i radiální součástky)
 - zahnutí a zkrácení vývodů - preference nejjednoduššího tvaru, kdy součástka leží na DPS vlastní hmotností a vývody nejsou v otvorech mechanicky fixovány
 - natvarování a zkrácení vývodu - součástka často neleží na DPS, součástka je mechanicky fixována pružností vývodu v otvoru
- **Osazení** pomocí osazovacích poloautomatů nebo ručně. Principiálně jsou k dispozici 2 typy osazovacích poloautomatů:
 - s horní projekcí, některé typy jsou vybaveny i technologií cut and clinch
 - s dolní projekcí (většinou se už nepoužívají)

Osazovací poloautomaty osazované místo i orientaci součástky indikují světelným paprskem nebo laserem. Vlastní osazení je nutno provést manuálně.

- **Doosazení** (např. konektory, transformátory, cívky,..)
- **Pájení strojní** (vlnou)
- **Čištění** (je-li nutné)
- **Dodatečná montáž** po strojním pájení (tepelně citlivé součástky, součástky, které nelze hromadně čistit aj.), lokální čištění, je-li nutné
- **Vizuální kontrola**
- **Testování**
- **Opravy**

STROJNÍ

Velkosériová produkce

Nasazení automatů a robotů s minimalizací lidské práce. Pro osazovací automat se axiální součástky používají sekvenčně páskované a verifikované (proměření jejich hodnot, polarity). Tvarování a fixace součástek (cut and clinch) se provádí přímo na osazovacích automatech. Osazovací automaty se programují, využívají se data z návrhového systému.





Obr. 7. Znázornění automatizované montáže elektronických součástek

Technologický tok:

- napáskované součástky axiální
 - **sekvencer** - vystřížení součástky z původního pásu a zařazení do nového pásu dle sekvence osazovacích kroků platných pro osazovací automat
 - **verifikátor** - proměření hodnot, tolerančních polí i polarit v sekvenčním pásu
- součástky napáskované radiální, součástky v tyčích, DPS
- napáskované součástky axiální sekvenčně řazené verifikované
- osazovací automat axiálních součástek
- osazovací automat radiálních součástek
- osazovací automat integrovaných obvodů
- robotické pracoviště (doosazení speciálních součástek)
- strojní pájení vlnou
- vizuální kontrola
- testování
- opravy
- výstupní kontrola

1.2.4 POŽADAVKY A OSAZENÍ AXIÁLNÍCH A RADIÁLNÍCH SOUČÁSTEK NA DPS

AXIÁLNÍ SOUČÁSTKY

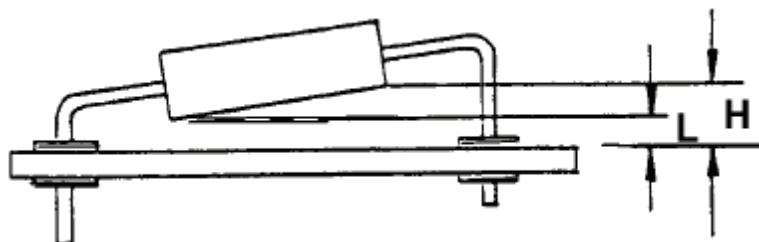
Osazované horizontálně:

Součástka často leží na DPS, vzdálenost součástky od DPS je volena tak aby vyhovovala elektrickým požadavkům, tepelnému zatížení součástky, eventuálně i požadavkům na čištění. Pokud osazujeme součástku nad DPS musí být vzdálenost min. 1,5 mm.

$H_{\max} = 2 \text{ mm}$

$L_{\max} = 1,5 \text{ mm}$

$H-L_{\max} = 1,25 \text{ mm}$



Obr. 8. Požadavky na osazení axiální součástky**Osazované vertikálně**

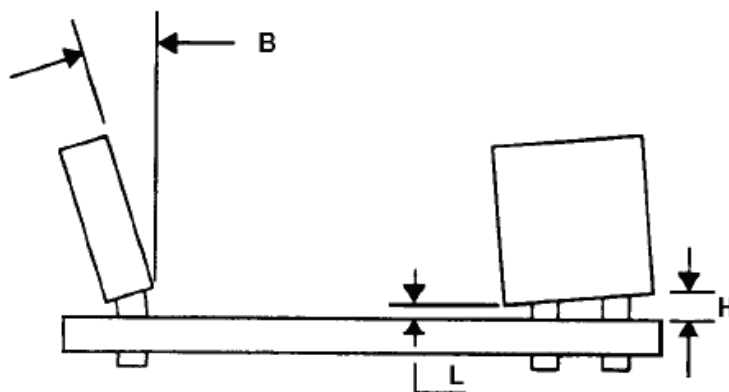
Součástka by měla být osazena kolmo k DPS a doporučená vzdálenost axiální součástky od DPS je 0,4 – 1,5 mm.

RADIÁLNÍ SOUČÁSTKY

Součástka by měla být osazena kolmo k DPS a doporučená vzdálenost radiální součástky od DPS je 0,3 – 2 mm.

Dle IEC 61191-3:

- Náklon součástky do strany: B max. 15 °
- Zvednutí součástky nad DPS:
 - L min 0,4 mm
 - H max 2,0 mm

**Obr. 9. Požadavky na osazení radiální součástky**

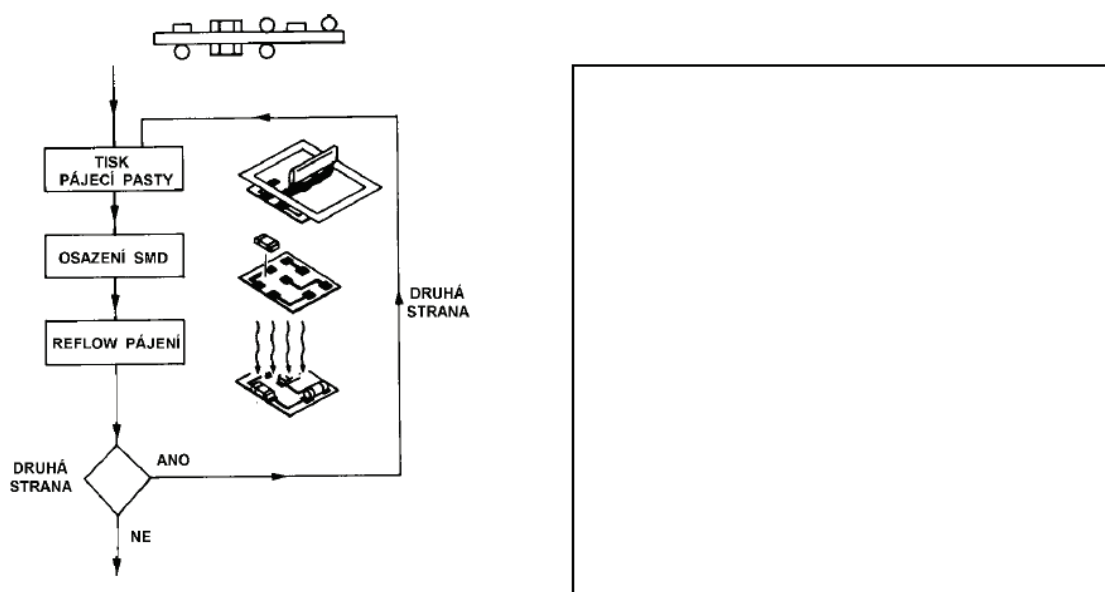
Délka vývodu ze spodní strany DPS:

- nezahnutého: 1,5 - 2,5 mm
- zahnutého: délka zahnutí vývodu minimálně 1/2 průměru pájecí plošky. Zahnutý vývod by neměl přesahovat, nebo jen minimálně pájecí plošku.

Kvalita osazení se posuzuje zejména opticky, sleduje se shoda s požadavky norem např. IPCA- 610 B, IPC SM-782 aj.

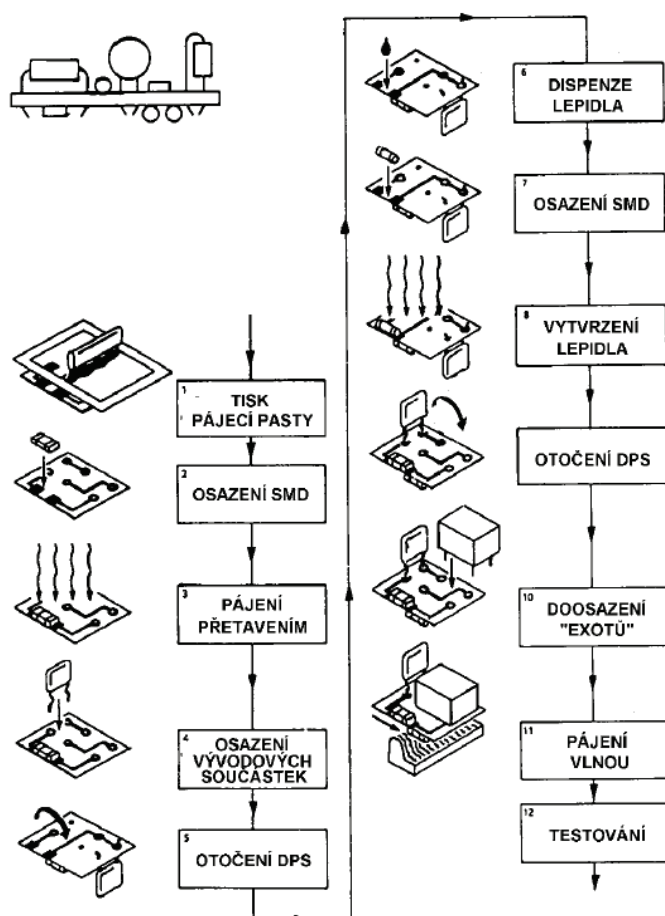
Pozn:Výše uvedené požadavky vyhovují kategorii montážních a propojovacích sestav pro průmyslové aplikace - třída 2 (dle IPC) ev. B (dle IEC).

1.2.5 TECHNOLOGICKÉ POSTUPY V POVRCHOVÉ MONTÁŽI



Obr. 10. Čistá povrchová montáž

Kombinovaná povrchová montáž z jedné strany



Obr. 11. Kombinovaná povrchová montáž z obou stran

MONTÁŽ SMD SOUČÁSTEK

Při tomto způsobu montáže součástek na plošný spoj je používána tzv. metoda přetavení pájecí pasty. Tato technologie má některé přednosti oproti technologii vlnového pájení.

Pájecí pasta plní dvě funkce:

zpočátku slouží jako dočasné lepidlo, které fixuje součástku k desce (musí mít dobrou lepivost);

po přetavení slouží k zajištění pevného elektrického spojení součástek s DPS.

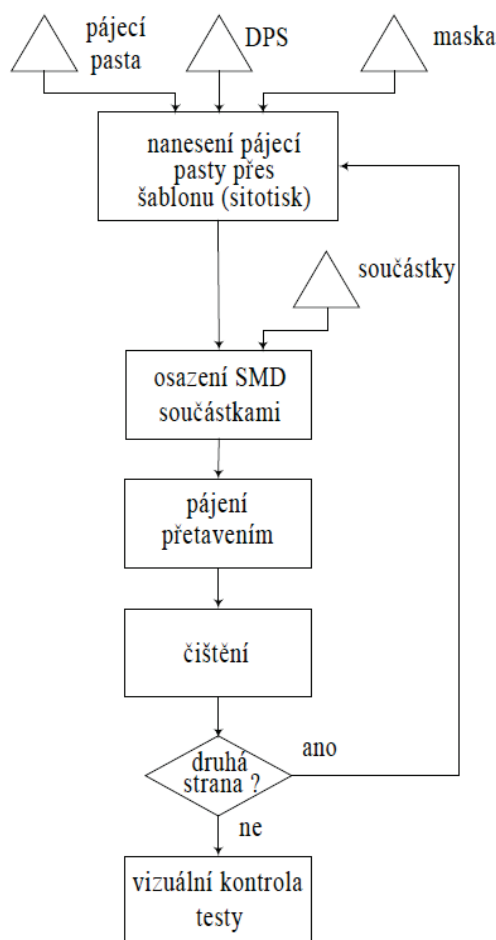
Nanášení pájecí pasty je prováděno zpravidla sítotiskem nebo šablonovým tiskem. Při tom je nanášeno definované množství pasty (pájky a tavidla) na plošný spoj, což zabezpečuje reprodukovatelnou kvalitu spoje. Důležitým faktorem je volba správné pasty a teplotního profilu. Součástky jsou osazovány osazovacími automaty (případně poloautomaty).

Po přetavení je spoj lesklý a hladký. Případné zbytky pájecí pasty jsou odstraněny v etapě čištění.

Je-li deska osazena součástkami SMD z obou stran, celý proces se uskutečňuje dvakrát. Nejprve pro jednu, potom pro druhou stranu.

Vizuální kontrola má za úkol zjistit viditelné závady, jako např. můstky cínu mezi spoji, špatně připájené součástky atd.

Konečné testy vyhodnocují správnost funkcí osazené desky. Po jejich bezchybném ukončení je možné vyhotovenou desku montovat do zařízení.



Obr. 12. Postup osazování SMD součástkami

KOMBINOVANÁ MONTÁŽ**SMD součástky na stranu spojů, klasické součástky na stranu součástek.**

Při kombinaci klasických a SMD součástek na jednu desku s plošnými spoji jsou klasické součástky uchyceny k plošnému spoji svými vývody zasunutými do otvorů v plošném spoji. SMD součástky jsou před pájením přitmeleny na vyznačená místa k druhé straně DPS.

Jako první krok je provedeno osazení klasickými součástkami, jejichž vývody jsou zasunuty do prokovených otvorů v plošném spoji. Aby součástky z plošného spoje nevypadávaly, jsou k plošnému spoji uchycovány převážně zahnutím konců určených vývodů k desce s plošnými spoji.

Součástky SMD jsou osazovány na stranu spojů. Před osazením je na stanovená místa přes masku nanášeno lepidlo, kterým jsou SMD součástky k desce přilepeny.

Lepidlo má tyto základní vlastnosti:

- jednosložkový bezrospouštědlový systém;
- je tixotropní (nedochází k jeho roztékání);
- je elektricky nevodivé a dielektricky stabilní (pro některé aplikace jsou používána elektricky vodivá lepidla, která jsou v tom případě využívána nejen k přilepení součástek, ale i k vodivému propojení mezi ploškami a vývody součástky);
- je chemicky stabilní;
- je nekorozivní;
- má dobrou lepivost;
- má dobrou teplotní stabilitu (stálá viskozita při změnách teploty);
- je výrazně barevné – kvůli vizuální kontrole;
- má dlouhou skladovatelnost;
- je odolné vůči teplotám používaným při pájení.

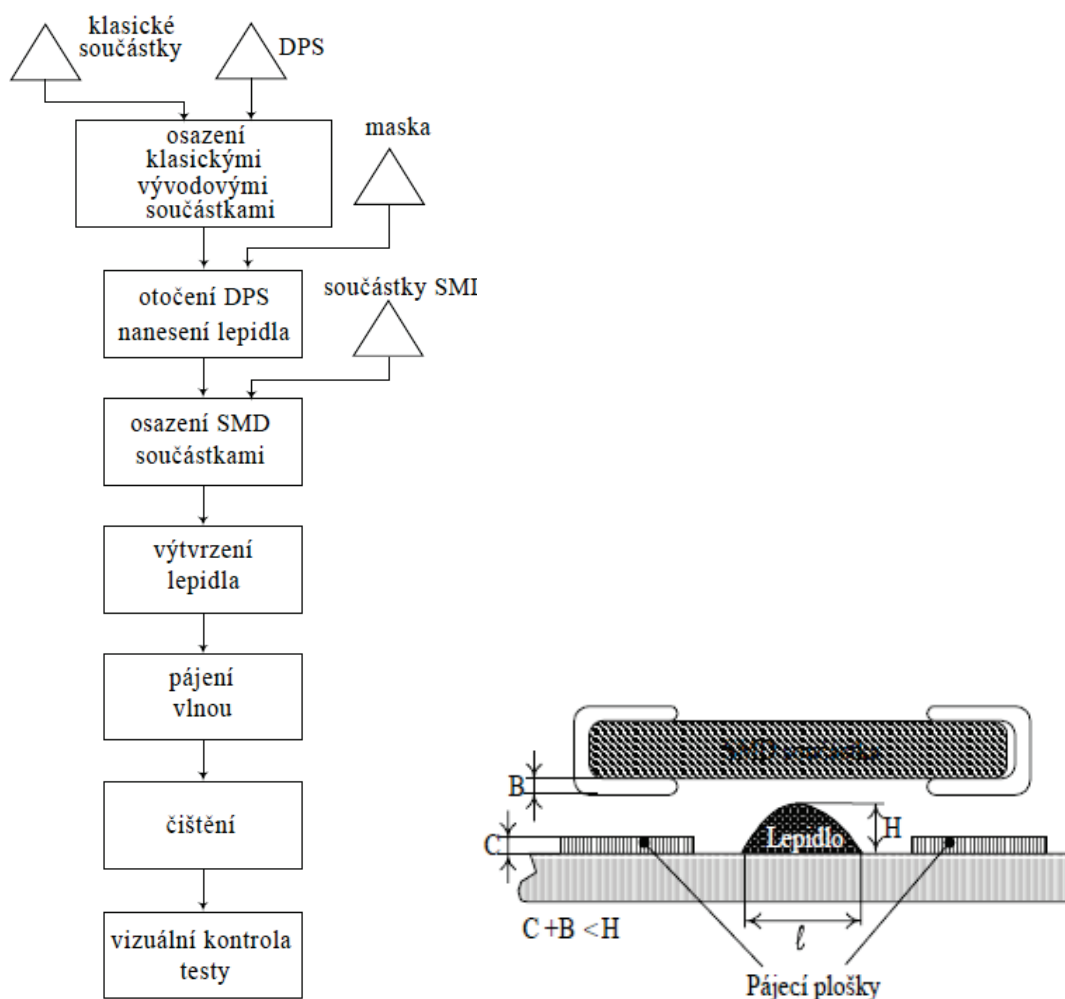
Princip lepení SMD součástek je znázorněn na obr. 13. Po přilepení součástek a vytvrzení lepidla je prováděno pájení vlnou.

Vlna roztavené pájky současně pájí SMD součástky i vývody klasických součástek k plošnému spoji. SMD součástky jsou umístěny na straně pájení.

Po vyčištění zapájené desky je prováděna vizuální kontrola, pomocí které jsou zjišťovány viditelné závady, jako např. můstky cínu mezi spoji, špatně připájené součástky atd.

Konečné testy vyhodnocují správnost funkcí osazené desky. Po jejich bezchybném ukončení je možné vyhotovenou desku montovat do zařízení.





Obr. 13. a) Postup osazování desky klasickými a jednostranně SMD součástkami, b) Lepení SMD součástek

SMD součástky po obou stranách desky s plošnými spoji, klasické součástky na stranu součástek

Při této metodě jsou SMD součástky osazovány po obou stranách desky s plošnými spoji, klasické součástky jsou osazovány pouze na stranu součástek.

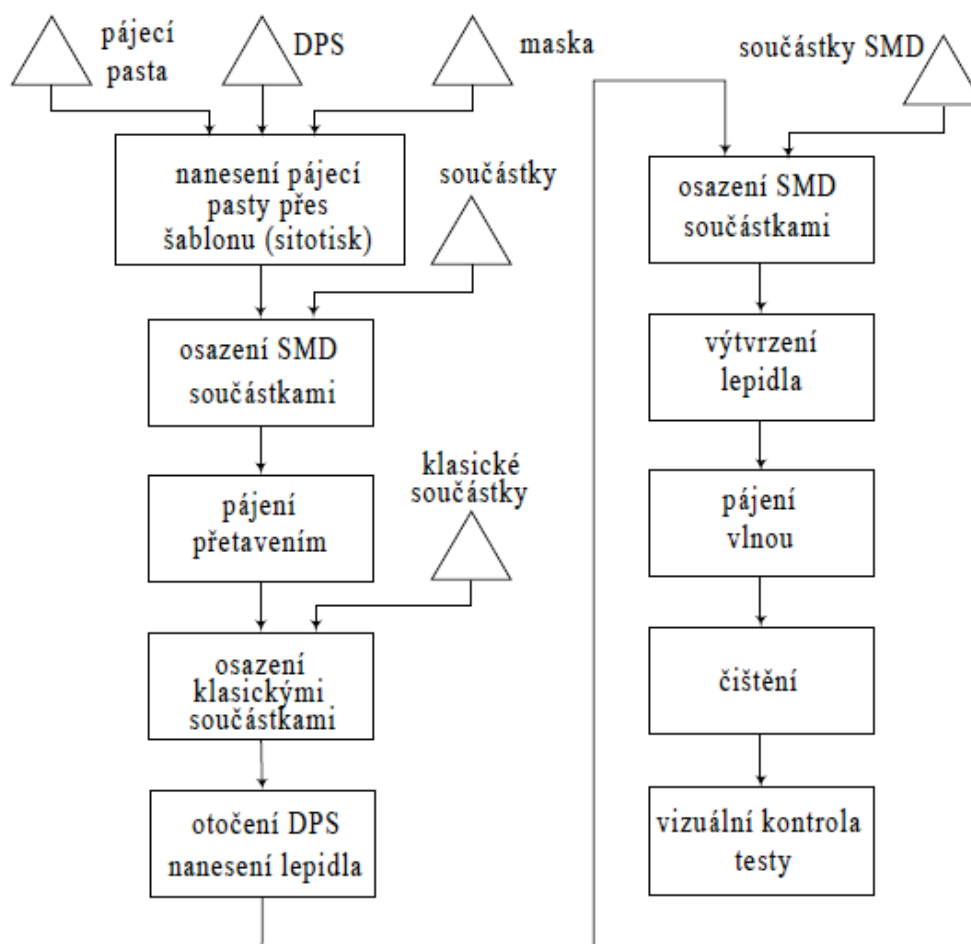
Tato metoda je z hlediska počtu montážních operací nejsložitější. Používají se při ní oba způsoby pájení: pájení přetavením, kdy je přetavována pájecí pasta, i pájení vlnou, při kterém jsou pájeny současně SMD i klasické součástky.

Postup je zřejmý z obr. 14.

Nejprve je na stranu součástek tam, kde budou osazeny SMD součástky, nanесena pájecí pasta. Následuje osazení strany součástek SMD součástkami a jejich pájení přetavením. Při tom musejí být zakryty otvory určené pro montáž klasických součástek.

Nyní jsou na stranu součástek osazeny součástky s klasickými vývody a další postup je shodný s postupem, kdy jsou SMD součástky osazovány pouze na stranu spojů.

Poznámka: Někdy je nutné osadit desku těžšími a rozměrnějšími součástkami, které je vhodné osazovat až po osazení ostatními součástkami. Potom je technologie před pájením vlnou doplněna o další krok, kterým je osazení těmito součástkami.



Obr. 14. Postup osazování desky klasickými a oboustranně SMD součástkami

1.3 MATERIÁLY PRO MONTÁŽNÍ TECHNOLOGIE

1.3.1 TAVIDLO

Tavidlo urychluje smáčecí proces a tak napomáhá k vytvoření spolehlivého pájeného spoje. Má následující funkce:

- odstraňuje nečistoty a reakční produkty ze spojovaných povrchů a umožní tak pájce, aby se dobře roztekla - tj. fyzikální funkce
- zlepšuje přenos tepla - tj. fyzikální funkce
- odstraňuje oxidy ze spojovaných povrchů a brání jejich reoxidaci - tj. chemická funkce

Jedná se převážně o kapalnou, plynnou nebo pevnou látku, která při ohřátí zrychluje nebo podporuje smáčení pájených materiálů pájkou. Tavidla pomáhají za působení tepla odstranit z povrchu pájeného materiálu oxidy, nečistoty a chrání jej i proti oxidaci během procesu pájení. Reakce tavidla s oxidy zapříčiní zvýšení povrchového napětí a tím zlepšení smáčivosti. Přísady, pomocí je dosaženo dobrých pájecích výsledků se nazývají aktivátory. Nejstarší typ tavidla je kalafuna - tj. přírodní pryskyřice, která se skládá zejména z organických kyselin.

Tavidlo volíme zejména s ohledem na:

- pájitelnost součástek a DPS



- způsob nanášení
- vlastnosti pájecího zařízení i technologii pájení
- snadnou odstranitelnost zbytků po pájení, pokud budeme čistit,
- nekorozivní zbytky se stabilním a vysokým SIR i ve vlhkosti po klimatických zkouškách (nebudeme-li čistit)
- minimální zbytky po pájení pro splnění náročných vzhledových kritérií
- testování / znečištění testovacích jehel/.

Základním požadavkem je při výběru tavidla zajistit spolehlivý pájecí proces s reprodukovatelnou kvalitou pájených spojů a s minimálním zbytkovým obsahem nečistot po pájení, které mohou způsobit v klimaticky náročnějších prostředích zhoršení izolačních vlastností DPS příp. i korozi vývodů součástek a přerušení vodivých obrazců na DPS.

DĚLENÍ TAVIDEL

V tuzemsku se používá několik dělení tavidel. V Tab. 1. je zpracována klasifikace tavidel pro měkké pájení dle ČSN EN ISO 9454-1 a v Tab. 2. dle německé normy DIN 8511.

Typy tavidla	Základní složka	Aktivátor	Forma tavidla
1. Plyskyřice	1. Klafuna (přírod. Prysk.) 2. Bez kalafuny Syntetická pryskyřice	1. Bez aktivátoru 2. Aktivováno halogenidy 3. Aktivováno bez halogenidů	A tekuté B tuhé C pasta
2. Organické	1. Rozpuštěné ve vodě 2. Nerozpuštěné ve vodě	4. Bez aktivátoru 5. Aktivováno halogenidy Aktivováno bez halogenidů	A tekuté B tuhé C pasta
3. Anorganické	1. Soli 2. Kyseliny 3. Zásady	1. NH ₄ Cl 2. Bez NH ₄ Cl 3. Jiné kyseliny 4. Aminy nebo amoniak	A tekuté B tuhé C pasta

Tab. 1. Klasifikace tavidel pro měkké pájení dle ČSN EN ISO 9454-1

Typ	Charakteristika
F-SW 34	Organické bezhalogenidové kyseliny s přírodní pryskyřicí bez aminů
F-SW 33	Syntetické pryskyřice s organickými aktivátory bez halogenidů a aminů
F-SW 32	Čistá přírodní pryskyřice s organickými aktivátory bez halogenidů a aminů
F-SW 26	Přírodní pryskyřice nebo modifikovaná přírodní pryskyřice s přísadou organických aktivátorů s halogenidy v max. množství 0,6%

F-SW 26 (doporučuje se čistit, F-SW 32,33,34 (nemusí se čistit)



Tab. 2. Klasifikace tavidel dle německé normy DIN 8511

Nejnovější členění tavidel dle **J-STD-004** popisuje Tab. 3. Tavidla jsou na bázi přírodní pryskyřice (RO), syntetické (RE), organických kyselin (OR) i anorganických látek (IN). Norma značí aktivitu tavidla i tavidlových zbytků písmeny L (low – nízká), M (moderate – střední), H (high – vysoká). Aktivace halogenidy je indikována číslicí 1. Tavidla se značí např. jako ROL0, ORL0 ORL1 aj.

Základ tavidla	Zkratka	Úroveň aktivace (%halidů)					
		L00	L1 do 0,5	M00	M1 0,5 - 2	H00	H1 nad 2
Přírodní pryskyřice	ROSIN	A	B	C	D	E	F
Syntetické pryskyřice	RESIN	G	H	I	J	K	L
Organické kyseliny	ORGANIC	M	N	P	Q	R	S
Anorganické kyseliny	INORGANIC	T	U	V	W	X	Y

Tab. 3. Členění tavidel dle J-STD-004

Příklad: Tavidlo ROL0 je na bázi přírodní pryskyřice bez obsahu halidů, značí se symbolem A

Nejstarší dělení tavidel dle aktivních složek podle **MIL-F-14256** se stále ještě v praxi používá, ale normy MIL už neplatí!, totéž dělení je i dle QQ-S-571E. MIL-F- 14256 byla nahrazena normou J-STD-004. Tavidla na bázi přírodní pryskyřice (rosin) se značila těmito zkratkami:

R

- velmi málo aktivní
- vhodný na dobře pájitelné spoje
- zůstávají po něm zbytky nečistot, které netřeba čistit

RMA

- halogenidy aktivovaný, středně aktivní
- zůstávají po něm zbytky nečistot, které je vhodné čistit

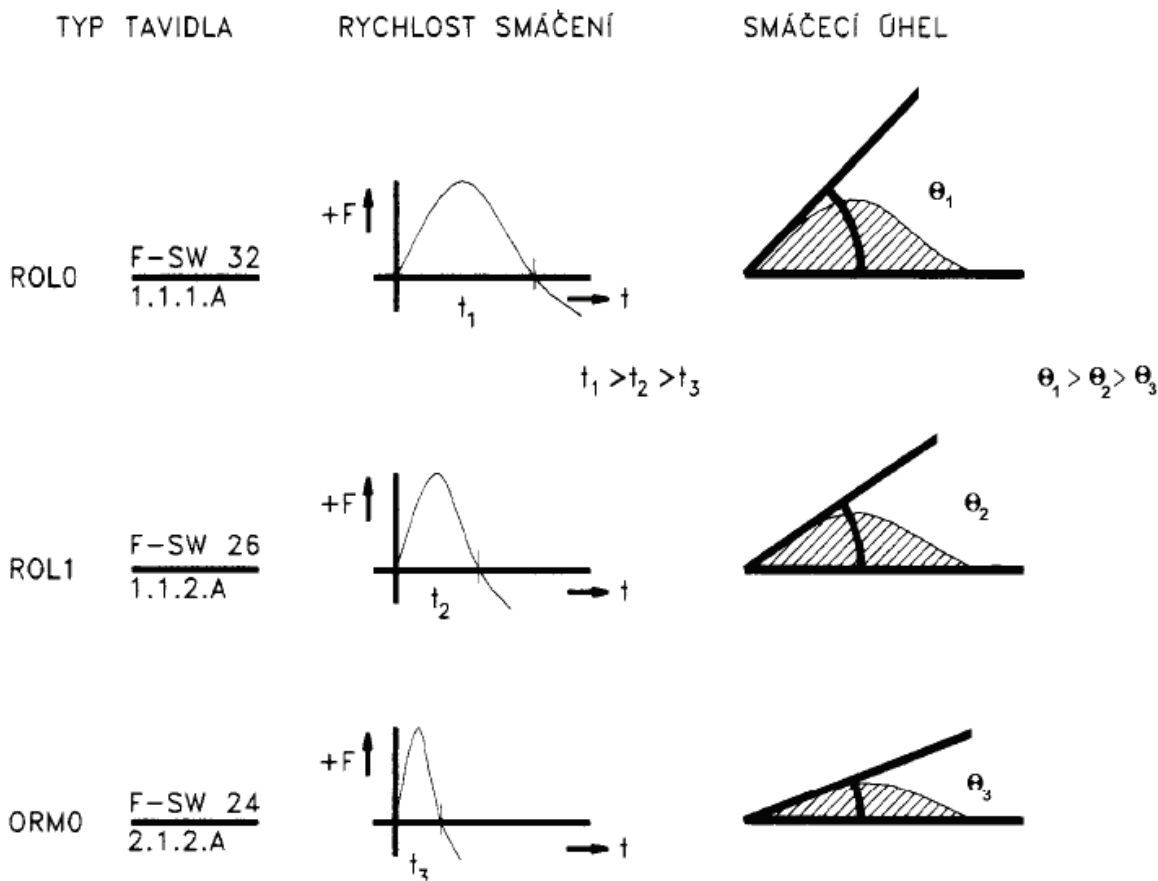
RA

- silně aktivovaný, nutné čistit
- zůstávají po něm zbytky nečistot, které je nutno odstranit

Vztah mezi aktivitou tavidel dle nového a původního značení je uveden v Tab. 4.

L0	L1	M0	M1	H0	H1
Všechny R Část RMA Část low solids Část no clean	Většina RMA Část RA	Část RA Část low solids Část on clean	Většina RA	Část vodorozpustných	Většina vodorozpustných

Tab. 4. Kategorizace tavidel původního značení dle nové normy



Obr. 15. Porovnání různých typů tavidel

Porovnání kvality tavidel a metody

Je vhodné provádět měření smáčecích charakteristik pomocí meniskografu, měřením smáčecích úhlů i sledováním roztékavosti pájky na povrchu. Na obr. 15. je provedeno porovnání různých typů tavidel.

TEST NA MĚDĚNÉ ZRCADLO

Testuje se vliv tavidla na povrch napařené měděné vrstvy na skleněné destičce. Kapka testovaného tavidla se nechá působit po dobu 24 hod. při teplotě 25°C v 50% RH. Po 24 hodinové expozici se tavidlo z testované destičky opláchne a sleduje se poškození měděného zrcadla. Na testovanou destičku se často aplikuje i vzorek srovnávacího tavidla (RO + izopropanol)

- ANSI-J-STD-004
- I PC-SF-818

OBSAH HALOGENIDŮ

Přítomnost halogenidů (chloridů, bromidů, jodidů) se testuje na stříbro chromátovém papíru. Kapka tavidla se aplikuje na testovaný papír. Halogenidy jsou indikovány žlutým nebo bílým zbarvením. K přesnějšímu určení obsahu halogenidů se používají titrační metody.

- ANSI-J-STD-004
- I PC-SF-818



IONIZOVATELNÉ NEČISTOTY

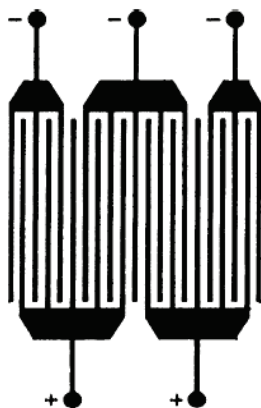
Se měří dle MIL-C-28809B i IPC-TM-650 metodou vodního výluhu.

SIR (POVRCHOVÝ IZOLAČNÍ ODPOR)

K měření se používají testovací obrazce dle IPC-B-25.

KOROZNÍ TEST

Na očištěný vzorek plátovaného ZM se aplikuje tavidlo, přidá se pájka a kontaktně se přetaví. Zapájený vzorek se vloží do klimatizační komory 50°C/65% RH po dobu 10 dnů. Po uvedeném stárnutí vzorku se sleduje úroveň koroze.



Obr. 16: Měření SIR

ELEKTROMIGRACE

BELLCORE test TR-NWT-000078. Vzorky podrobeny stárnutí 500 hodin v prostředí 85°C/85% RH při 10Vss. Měření se provádí při 50V ss. Sleduje se změna SIR i nárůst šířky vodičů v důsledku elektromigrace.

PROBLÉMY VOC

Hlavní složkou tavidel jsou rozpouštědla na organické bázi obsahující organické těkavé látky (VOC). Tavidla s normálním obsahem VOC (od 60 do 98%) uvolňují při pájecím cyklu nezanedbatelné emise, které svým působením napomáhají vytváření foto-chemického smogu. K vytváření smogu přispívají všeobecně tři základní faktory:

- oxidy dusíku (NOx) sluneční paprsky
- VOC

Tyto faktory mají největší vliv především na ozónovou vrstvu. Kvalita ozónu nepříznivě působí jak na zdraví lidí, tak i na celý život na zemi. Dohled nad uvolňováním ozón poškozujících látek převzala Světová Zdravotní Organizace (WHO). VOC se také značnou měrou podílí na tzv. skleníkovém efektu, který negativním způsobem přispívá ke globálnímu oteplování.

Výrobci tavidel v oblasti elektroniky vyvíjí a vyrábí tavidla bez obsahu VOC (VOCfree).

Používání tavidel s nízkým obsahem VOC

Tradiční tavidla používají k dosažení dobrých pěnících a smáčecích charakteristik rozpouštědla na bázi alkoholu s malou přísadou vysoko molekulárních organických složek. Jako aktivátory jsou v těchto tavidlech používány organické těkavé látky, které jsou ve své



podstatě hydrofobní, což napomůže tomu, aby bránily absorpci vody v reziduích po pájení, které zůstaly na DPS. Vzhledem k nízkému bodu varu (obvykle menší než 80°C) dojde u systémů na bázi isopropanolu, metanolu a etanolu ke kompletnímu odpaření v cyklu předehřevu a pak teprve již relativně suchá deska přijde do kontaktu s pájkou. Od roku 1991 výrobci začali používat tavidla s redukováným obsahem V_{OC} (viz. Tab. 6). Tabulka je rozdělena do čtyř kategorií. V první kategorii jsou typy dříve používaných tavidel, v druhé a třetí tavidla používaná v současné době a ve čtvrté je naznačen trend tavidel vzhledem k obsahu VOC.

Parametry typického tavidla s nízkým obsahem V_{OC} jsou podrobně uvedeny v Tab. 5. Rozpouštědlo je nahrazeno vodou.

Typ	V_{OC} v %	Rozpouštědlo	Typ aktivátoru
Přírodní pryskyřice	15 – 40	Isopropanol, metanol	Organické kyseliny, aminy hydrochloridu
Na bázi vody	10 – 25	Isopropanol, metanol, voda	Organické kyseliny, anorganické chloridy
Syntetická pryskyřice	10 – 20	Isopropanol, methyl etylen, methyl isobutyl ketone	Aminy hydrochloridu
Synteticky aktivované	10 – 25	Isopropanol, metanol	Aminy hydrochloridu sulfáty
No-clean	0,5 – 3	Isopropanol	Organické kyseliny
S nízkým zůstatkem	2 – 6	Isopropanol	Organické kyseliny
S nízkým obsahem V_{OC}	0,5 – 3	Voda	Organické kyseliny (vodorozpustné)
Bez obsahu V_{OC}	0	Voda	Organické kyseliny (vodorozpustné)

Tab. 5. Srovnání vývoje tavidel vzhledem k obsahu V_{OC} .

Výhody tavidel s nízkým obsahem V_{OC} :

- malé množství nebo žádné rozpouštědlo v tavidle snižuje V_{OC} emise
- neobsahuje nehořlavé látky, proto se nevyžaduje uchovávání v protipožárních skladovacích prostorech
- vzhledem k tomu že se jedná o nerizikové materiály, není třeba žádného speciálního schvalování

Chemické vlastnosti tavidel s nízkým obsahem VOC lze shrnout následovně:

- rozpouštědlo: deionizovaná voda
- aktivátor: karboxilové kyseliny; nízká molekulární hmotnost (0,5-2,0%)
- aktivní činidla: 0,1-0,5% neiontové povahy

Vzhled	bezbarvý
Obsah netěkavých složek	2,2 % hmotnosti
Specifická hmotnost	1,10 gcm ⁻³
Číslo kyselosti	25,0 mg KOH/ g



Obsah halidů	žádný
Bod vzplanutí	není
Test na měděné zrcadlo	vyhovuje
Izolační odpor (Bellcore)	vyhovuje

Tab. 6. Typické parametry tavidla s nízkým obsahem VOC

Nanášení tekutých tavidel

Preferovaná metoda pro nanášení tavidla na DPS je sprejem (nástříkem), používá se i nanášení pěnou nebo vlnou. Je-li to možné je potřeba se vyhnout přehřevům vyšším než 120°C

Typ tavidla	Způsob aplikace	Tepl. Přehřevu (°C)	Odstranění zbytků
Nevyžadující čištění (no-clean)	Pěna, vlna, sprej	100 - 120	Rozpouštědla, rozpuš./voda
S nízkým obsahem pevných částic	Pěna, vlna	100 - 120	Rozpouštědla
S nízkým obsahem VOC	Pěna, vlna, sprej	100 - 130	Voda

Tab. 7. Podmínky pro jednotlivé typy tavidel

TREND V TAVIDLECH

Je pravděpodobné, že používání tavidel s nízkým obsahem VOC i bez obsahu VOC bude v budoucnu růst. V současné době se preferují bezoplachová tavidla na bázi přírodní i syntetické pryskyřice s malým obsahem sušiny (2-3%), která nevyžadují čištění. Ředidlem je většinou izopropanol. Tavidla na bázi izopropanolu mají hustotu zpravidla 0.800-0.812 g/cm³ na bázi destilované vody 1.001 g/cm³.

BEZOPLACHOVÁ TAVIDLA (NO CLEAN) ŘEDITELNÁ VODOU

NULOVÉ VOC = EKOLOGICKÉ I EKONOMICKÉ DŮVODY (NENÍ TŘEBA ČISTIT)

Hlavní požadavky na no-clean tavidla:

- vysoká aktivita při pájecí teplotě
- nízké reaktivní působení při pokojových teplotách
- žádné vypařování nebo rozložení se při pokojových teplotách
- hydrofobní
- bezhalidové
- stabilní roztok
- vysoký povrchový izolační odpor
- žádná elektromigrace

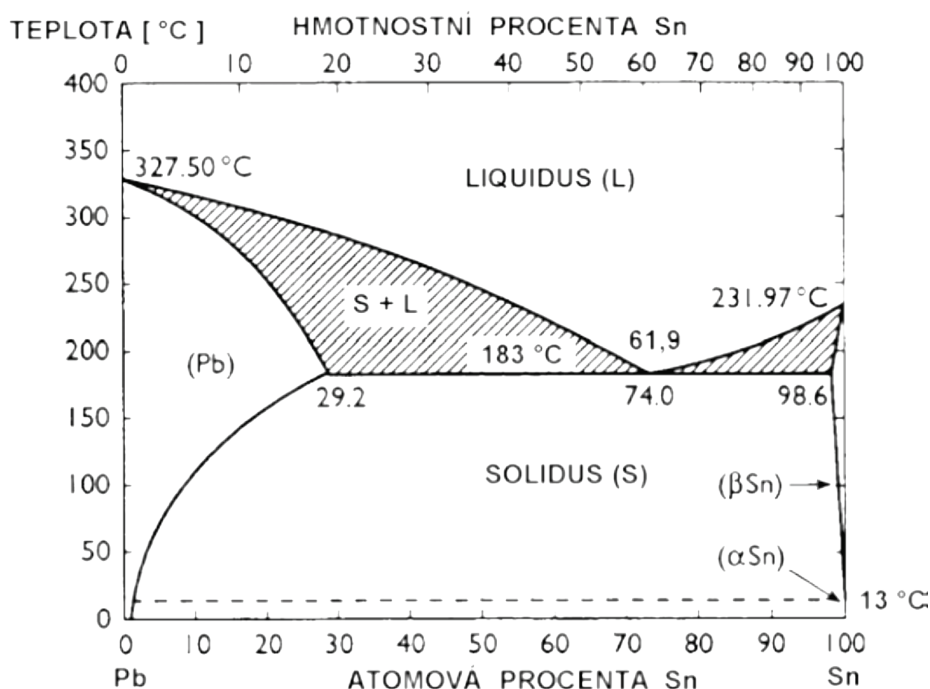


1.3.2 PÁJKA

PÁJKA SNPB

V elektrotechnice se používá nejčastěji pájka skládající se z podílu 60 - 63 hmotnostních % cínu Sn a 40-37 hmotnostních % olova Pb díky svým specifickým vlastnostem:

- teplota tavení slitiny 183 - 189°C vyhovuje z hlediska návrhu (používané součástky a substráty), technologického procesu i běžných pracovních teplot elektronických zařízení
- cín vykazuje velmi dobré smáčecí charakteristiky, oxidy cínu lze odstranit relativně málo aktivovanými tavidly
- pájecí slitina nevytváří křehké intermetalické fáze
- příznivá cena



Obr. 17. Fázový diagram SnPb

SnPb pájka s různým podílem složek se dodává ve formě **trubiček, drátů, kuliček, tyčí, fólií**. **Trubičkové pájky** se používají pro ruční pájení. Zpravidla mají několik jader, která jsou vyplněna tavidlem. Pro vlastní pájecí proces je rozhodující: typ slitiny, typ tavidla, množství tavidla v trubičkové pájce, průměr trubičkové pájky, způsob čištění tavidlových zbytků po pájení.

Kuličky pájky se používají do pájecích past i pro samostatné aplikace (reballing u BGA oprav aj). Rozhodujícím parametrem kromě typu slitiny, rozptylu hodnot požadovaného průměru kuliček je i množství oxidů.

Pro strojní pájení se užívá měkká **pájka v tyčích** zejména Sn63Pb37 (eutektická) ev. Sn60Pb40, používají se i pájky s příměsí fosforu (P), india (In). Předností vakuově přetavovaných pájek je zejména nižší viskozita, zlepšení smáčecí schopnosti, jasnější spoje.

Fólie pájky (často plněné tavidlem) definovaných tloušťek se používají pro speciální aplikace. V mnohých případech se na jejich přednosti i aplikace zapomíná.

BEZOLOVNATÉ PÁJKA

Snaha o náhradu pájecí slitiny Sn63Pb37 je nejen z důvodu toxicity, ale i pevnosti pájeného spoje. Bezolovnaté pájky mají větší podíl cínu ve slitině a potřebují vyšší teplotu pájení, mají větší tendenci k oxidaci i teoreticky lepší smáčecí charakteristiky. Odpovídající smáčecí charakteristiky se ale uplatní pouze v dusíkové atmosféře.

Evropská komise dokonce předložila návrh na ukončení používání olova v elektrotechnickém průmyslu do konce roku 2004.

Bezolovnaté slitiny musí vyhovovat těmto požadavkům:

- kompatibilita s používanými zařízeními i postupy (vlnové pájení, HAL, vhodnost pro ruční pájení ve formě trubičkového drátu i použitelnost pro pájecí pastu zejména no-clean aplikace).
- ekvivalentní a lepší materiálové charakteristiky než stávající slitiny teplota tavení $>185^{\circ}\text{C}$
- minimální rozsah plastického stavu, optimálně $4 - 15^{\circ}\text{C}$

Bezolovnaté pájky (lead free solder – LSF) mají výrazně odlišné zpracovatelské charakteristiky ve srovnání se slitinami obsahujícími olovo. Při implementaci bezolovnatých pájek do výrobního procesu se řeší zpravidla tyto 3 oblasti:

- volba typu slitiny a odpovídajícího procesu
- eliminace halogenovaných retardantů ze základních organických substrátů, teplotní odolnost ZM
- volba součástek, používaných plastů, povrchových úprav i chemie, jejich slučitelnost i vhodnost pro vyšší teploty.

Slitiny pod 180°C		
Systém	Složení (hm%)	Rozsah teplot tavení ($^{\circ}\text{C}$)
Sn-Bi	Sn-58Bi	138e
Sn-In	Sn-52In	118e
	Sn-50In	118-125
Bi-In	Bi-33In	109e
Slitiny $180 - 200^{\circ}\text{C}$		
Sn-Zn	Sn-9Zn	199e
Sn-Bi-Zn	Sn-8Zn-3Bi	189-199
Sn-Bi-In	Sn-20Bi-10In	143-193
Slitiny $200-230^{\circ}\text{C}$		
Sn-Ag	Sn-3,5Ag	221e
	Sn-2Ag	221-226
Sn-Cu	Sn-0,7Cu	227e
Sn-Ag-Bi	Sn-3,5Ag-3Bi	206-213
	Sn-7,5Ag-2Agi	207-212
SnAgCu	Sn-3,8Ag-0,7Cu	217e
Sn-Ag-Cu-Sb	Sn-2Ag-0,8Cu-0,5Sb	216-222



Tab. 8. Přehled bezolovnatých slitin

Příměsi In, Zn, Bi, Sb v bezolovnatých pájkách vykazují špatné smáčecí charakteristiky. Smáčecí úhly pro bezolovnaté pájecí slitiny na Cu substrátu jsou ve srovnání s Sn63Pb37 jsou o poznání vyšší

Nové slitiny dosahují srovnatelných smáčecích a fyzikálních charakteristik. Některé vykazují i lepší mechanické vlastnosti a charakteristiky tečení. Teploty tavení se zpravidla pohybují kolem 215 - 220°C. Otázkou zůstává cena i ekonomie provozu těchto slitin.

Spojovací materiál a volba pájecí slitiny

Výběr slitiny pájky závisí na:

- druzích spojovaných materiálů i jejich povrchové úpravě
- mechanických vlastnostech, požadované teplotě slitiny (solidus/liquidus), technice zpracování
- množství příměsí

V Tab. 9. jsou uvedeny kompatibilní i nekompatibilní pájky pro spojování různých kovů. U pájek plněných tavidlem je třeba volit odpovídající typ tavidla, jeho aktivitu i hmotnostní podíl v pájce.

Spojovaný materiál	Kompatibilní pájka	Nekompatibilní pájka
Au, Ag, Pd, Pt	In, InPb, InPbAg, AuSn	všeobecně slitiny s Sn
Cu a slitiny Cu	SnPb, SnPbAg, SnPbBi	všeobecně slitiny s In
Ni	nejméně 50% Sn, SnPbAg	není
Sn a slitiny	SnPb všeobecně, SnBi	slitiny s In
Nerez ocel	nejméně 50% Sn	ne Pb pro potraviny

Tab. 9. Kompatibilita materiálů při pájení

Trubičkové pájky s Ag, Cu a jejich přednosti

Pro pájení povrchové montovaných prvků se používají pájky s obsahem Ag. Pro některé aplikace je výhodné použití pájecího drátu a externího tavidla. Pájka s příměsí Ag vykazuje větší pevnost v pájených spojkách, brání rozpouštění terminálů obsahujících stříbro a má i menší povrchové napětí než slitina Sn63Pb37. Pro pájení měděných lanek se preferuje pájka s obsahem Cu.

1.3.3 PÁJECÍ PASTA

Technologie využívající přetavení pájecí pasty má některé přednosti ve srovnání se strojním pájením vlnou. Hlavní výhodou je nanesení definovaného množství pájky a tavidla na pájený spoj a reprodukovatelnější kvalita spoje. Základem je volba vhodné pájecí pasty i technologie zpracování. Na pájecí pasty jsou kladeny stále vyšší požadavky v závislosti na vyšších zástavbových hustotách, rychlejších procesech montáže i teplotních požadavcích, které musí splňovat teplotní profil.

Z hlediska chování se pájecí pasta řadí do kategorie viskózně-elastických kapalin a její chování je charakterizováno reologickými vlastnostmi (ty jsou podmíněny složením pasty). Pro různé aplikační techniky pájecí pasty se volí následující viskozity s rozdílným množstvím kovu viz. Tab. 10.



TECHNIKA NANÁŠENÍ	PODÍL KOVU	VISKOZITA
dávkořač kovu	200-450 Pa.s	82-86 hm. %
sítotisk kovu	400-700 Pa.s	86-89 hm. %
řablonový tisk	600-1.000 Pa.s	90-92 hm. %

Tab. 10. Dělení pájecích past

SLOŽENÍ PÁJECÍ PASTY

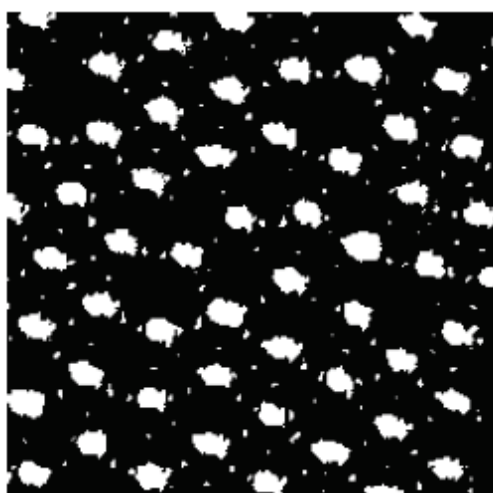
Pájecí pasta je homogenní směs pastovité konzistence. Skládá se z prářkovité pájky (65 -96% hmotnostních), gelového tavidla (tavidlový nosič, aktivátor, rozpouřtřdlo) a reologických modifikátorů.

PRÁŘKOVÁ PÁJKA

Je charakterizována velikostí řástic, jejich tvarem i typem pájecí slitiny. Prářková pájka se ve velké míře podílí na kvalitě tisku, roztékání i na smářecích charakteristikách a ředurčuje teplotu tavení.

VELIKOST A TVAR ČÁSTIC

Preferují se kulovité řástice, ale ve většině pájecích past se vyskytuje až 15% elipsoidů a cca 1% řástic jiných tvarů. Jmenovitá velikost řástic a jejich zastoupení v hmotnostních procentech je udáno v Tab. 11.



Obr. 18. Velikost řástic pájecí pasty

Velikost řástic pájecí pasty se volí podle nejmenší apertury řablony. Často se používá pravidlo 3D, tj. do nejmenší apertury v řabloně by se měly jak na výřku, tak i na řířku vejít 3 kuličky pájecí pasty největřího průměru. Určujícím faktorem je vzdálenost vývodů souřástky a technika nanáření pasty

a)

TYP	80% ČÁSTIC	MAX 10% ČÁSTIC	ŘÁDNÁ VĚTřÍ NEŘ
1	150 - 75 μm	menřích neř 20 μm	160 μm
2	75 - 45 μm	menřích neř 20 μm	80 μm
3	45 - 25 μm	menřích neř 20 μm	50 μm

Typ 2 je vhodný pro nenáročné aplikace do rozteče vývodů souřástek 0,65 mm,



Typ 3 pro ultra fine pitch aplikace (rozteč 0,4 - 0,3 mm), vhodné i pro dávkování

Typ 4 pro ultra fine pitch aplikace s roztečemi pod 0,3 mm

b)

TYP	90% ČÁSTIC	MAX 10% ČÁSTIC	ŽÁDNÁ VĚTŠÍ NEŽ
4	38 – 20 μm	menších než 20 μm	40 μm
5	25 – 15 μm	menších než 15 μm	30 μm
6	5 – 15 μm	menších než 5 μm	20 μm

Tab. 11. Jmenovitá velikost částic a jejich zastoupení v hmotnostních procentech /dle ANSI J-STD-005/

Pozn. 1: Vyrábí se i pájecí pasty s velikostí částic $25 \div 75 \mu\text{m}$, jsou vhodné pro fine pitch (rozteč 0,65 - 0,50 mm) a nanášení dávkovači

Pozn. 2: Někdy se pájecí pasty značí dle sít používaných pro prosívání částic pájecí slitiny

znaménko minus – částice projdou sítí

znaménko plus – částice neprojdou sítí

typ 2: -200/+325 mesh

typ 3: -325/+500 mesh

TYPY PÁJECÍ SLITINY

Pájecí slitiny se používají pro rozdílné zástavbové hustoty montážních a propojovacích sestav, často oboustranně pájených s různými typy pouzder. Jsou proto rozdílné i požadavky. Nejdůležitější jsou následující parametry: teploty liquidu a solidu, elektrická a tepelná vodivost, mechanická pevnost, teplotní koeficient délkové roztažnosti (TCE), povrchové napětí slitiny (hraje klíčovou roli při smáčivosti a tudíž i pájitelnosti), kompatibilita s povrchovými úpravami, aj. Základní typy pájecích slitin jsou uvedeny v Tab. 12.

TYP SLITINY	TEPLOTA SOLIDU[°C]	TEPLOTA LIQUIDU[°C]	POZN.
58Bi42Sn	138	138	E
43Sn43Pb14Bi	144	163	
62Sn36Pb2Ag	179	179	E
63Sn37Pb	183	183	E
60Sn40Pb	183	193	
90Pb10Sn	268	302	

E - eutektická slitina

Tab. 12. Základní typy pájecích slitin

Hmotnostní podíl kovu v pájecí pastě

Výraznou měrou ovlivňuje viskozitu pájecí pasty i teplotní změny viskozity (se vzrůstem kovového podílu se zmenšuje vliv teploty na viskozitu).

Oxidy v pájecí pastě

Oxidy kovů musí být zastoupeny v minimální míře. Nevhodným skladováním i stárnutím pasty se zvyšuje jejich obsah. Oxidy kovů mají výrazně vyšší teploty tavení, např. $\text{SnO}_2 > 1930^\circ\text{C}$, $\text{PbO} > 890^\circ\text{C}$. Vyšší podíl oxidů přináší mnohé problémy při pájení přetavením pasty (např. „solder balling“ aj. Větší podíl oxidů se vyskytuje u pájecích past s menšími zrny pájecí pasty (dáno větší oxidující plochou pájky).

Reologický modifikátor



Reologické vlastnosti popisují změny v chování pájecí pasty, zejména změny v tečení a deformaci vlivem působících faktorů: tlaku při tisku, rychlosti pohybu stěrky, teploty aj. Reologické vlastnosti se zabývají viskózně elastickými změnami v chování pájecí pasty v dynamickém režimu. Reologické vlastnosti nezahrnují sledování statických a strukturálních vlastností pájecí pasty.

Reologické chování pájecí pasty je dáno složením pájecí pasty, tvarem a velikostí částic, strukturou tavidlového pojiva i vzájemným fyzikálně chemickým působením mezi jednotlivými složkami pájecí pasty včetně smáčení i rozpouštění.

Hlavní reologické vlastnosti u pájecí pasty jsou: viskozita a tixotropnost. Požadované reologické vlastnosti pasty se upravují reologickými modifikátory, které ovlivňují zejména:

- chování pasty během tisku i po natisknutí
- smáčecí charakteristiky
- výslednou kvalitu pájeného spoje

POŽADAVKY NA PÁJECÍ PASTU

Požadavky na pájecí pastu se liší podle jednotlivých aplikací. Hlavní důraz je kladen na tisk pasty, přetavení a testování.

- během tisku a po natisknutí:

dobré tiskové vlastnosti pasty, zejména tixotropnost, stabilita pasty na šabloně, minimální zasychání na šabloně, ostrý obrazec natisknuté pasty, rozměrová stabilita pasty po tisku, minimální vliv zvýšené vlhkosti i teploty na viskozitu pájecí pasty

- během dávkování:

minimální separace složek, malý frikční koeficient, minimální „tahání vláken“, žádné vzduchové bubliny

- při osazení:

dobrá lepidlost, dlouhá doba lepidlosti během přetavovacího cyklu a po přetavení:

- **přetavovací profil:** velké technologické okno
- **pájený spoj:** vzhled spoje (lesklý, hladký), tvar spoje (správný smáčecí úhel), nesmí být přítomny kuličky pájky
- **rezidua:** minimální množství, bez migrací ve vlhku, stálý a vysoký SIR, rezidua na ploškách a spojích, čirý vzhled

- čištění:

snadné čištění i rozpustnost v izopropanolu

- testování:

kompatibilita s testovacím procesem

1.3.4 ZPRACOVÁNÍ PÁJECÍ PASTY

NANÁŠENÍ

Pájecí pasta se nanáší na požadovaná místa na DPS sítotiskem (nebo pomocí šablony) a dispenserem. **Doba zpracování** pájecí pasty nám udává, po jakou dobu má pájecí pasta stabilní tiskové vlastnosti a viskozitu. Doba zpracování je ovlivněna zejména tixotropními vlastnostmi, tlakem par rozpouštědla a hydrofobními vlastnostmi aktivátorů. Novější typy past vykazují velmi dobré tiskové charakteristiky i po časových prodlevách 60 - 90 minut, s minimálním zaschnutím pasty v aperturách. **Rychlosti tisku pájecích past** se pohybují v



rozsahu 10 - 200 mm^s⁻¹. **Přítlak** až 5 kgcm⁻¹ délky stěrky. Metody nanášení pájecí pasty budou popsány níže. Nanášení pájecích past je vhodné provádět při definovaných podmínkách pracovní teploty (doporučeno 22 – 25 °C) a vlhkosti (45 – 65 % RH, event. 45 – 80 % RH).

PŘETAVENÍ PÁJECÍ PASTY

Pájecí pasta s osazenými SMD prvky je přetavena v přetavovacím (reflow) tunelu, s podélným teplotním profilem dle doporučení výrobce. Všeobecně se vyžaduje širší **technologické okno** (větší rozsah pracovních časů i teplot).

1. Konformní povlak

Tenká vrstva izolačního materiálu (ochranného laku), která je konformní s konfigurací nanášeného předmětu. Konformní povlak se nanáší na osazenou a otestovanou DPS.

Konformní povlak zvyšuje spolehlivost a bezpečnost montážního celku z mechanického, elektrického, chemického i ekologického hlediska.

Konformní povlaky jsou navrženy za účelem chránit osazenou, oživenou a od tavidlových zbytků očištěnou montážní a propojovací sestavu před nepříznivými vlivy prostředí, zejména před:

- vysokou atmosférickou vlhkostí
- prachem, kouřem, vodivými částicemi
- chemickými vlivy prostředí, do kterého je deska určena
- mechanickým působením (vibrace, abraze aj.)

Konformní povlaky mají vynikající dielektrické vlastnosti, stabilizují elektroizolační vlastnosti DPS a zvyšují elektrickou pevnost.

Konformní povlak se nanáší na čistý, suchý a přilnavý povrch DPS a součástek (musí být testována zejména kompatibilita s nepájivou maskou pro zajištění dostatečné adheze). Povlak musí mít také přiměřenou tloušťku (obvykle 0.05 mm +/- 0,025 mm) a pokrytí musí být rovnoměrně rozložené po celé desce, povlak nesmí pokrývat testovací body. Zpracovatelnost a životnost musí být vyhovující pro zamýšlené aplikace.

Používá se široká škála konformních povlaků na různé **chemické bázi**, v široké škále **barev** i s rozdílnými **plnivy** (oxid křemičitý aj.) i **přísadami** (fluorescenční aj.). Nanášení konformních povlaků se provádí různými metodami, nejčastěji ponorem nebo nástřikem.

Konformní povlaky se vytvrzují při:

- pokojové/zvýšené teplotě
- působením ultrafialového záření
- vzdušnou vlhkostí
- příp. vzájemnou kombinací

1.3.5 TEORIE PÁJENÍ

Pájení je proces metalurgického spojování kovových částí roztavenou pájkou, zpravidla za přítomnosti tavidel. Pájení součástek patří do kategorie měkkého pájení s pracovními teplotami do 450°C. Při tomto fyzikálně chemickém procesu se atomy spojovaných kovů a roztavené pájky dostávají do velmi malých vzdáleností, přičemž dochází k účinkům adhezních (přilnavých) a kohezních (soudržných) sil. Při pájení probíhá difúze a rozpouštění některých prvků pájky i spojovaných materiálů. Aby došlo k tomuto procesu, musí být



povrchy spojovaných materiálů čisté a atomy kovů umístěné na rozhraní musí mít dobrou adhezi.

Z fyzikálního a fyzikálně chemického hlediska musíme procesem pájení dosáhnout mechanicky pevného a dlouhodobě spolehlivého pájeného spoje, tj. vytvořit kvalitní metalurgické spojení vývodů součástky s pájecími ploškami substrátu. Minimálním požadavkem pro spolehlivě zapájený spoj je dobrá pájitelnost spojovaných materiálů, jejich kompatibilita v pájecím procesu i minimální (smáčecí) teplota.

Nestačí pouze pájené komponenty zahřát na požadovanou teplotu a dodat pájku, ale je třeba pájené komponenty připravit - musí mít vyhovující pájitelnost. Termín pájitelnost povrchu je použit jako popis schopnosti povrchu být smáčitelný pájkou během procesu pájení.

PÁJITELNOST

Je to funkce přesného procesu a práce materiálu; kontakt může vykazovat přijatelnou pájitelnost v některých procesech, ale v jiných ne.

Stupně smáčení mohou být děleny následovně:

Nesmáčení

V tomto případě se nevytvoří metalurgická vazba a rozhraní mezi pájkou a povrchem zůstane zřetelné. Tavidlo použité k podpoře pájení nemohlo adekvátně odstranit povrchové znečištění, nebo protože je oxidační vrstva příliš silná nebo tavidlo není dostatečně aktivní.

Smáčení

Povrchová energie čistého kovového povrchu je vyšší než roztavené pájky. Za této podmínky pájka smočí povrch a vytvoří tak na rozhraní metalurgickou vazbu. Jak smáčení postupuje, tak roste na rozhraní tenká mezikovová vrstva a vytváří základ pro spolehlivý spoj.

Odsmačení

Mezi kovové vrstvy, které rostou na rozhraní, jsou bohaté na cínové směsi, které vytahují cín z cíno-olověné pájky. Jak je cín odtavován z pájky, opouští oblasti bohaté na olovo s relativně slabou pájitelností. Když teplota klesá dost dlouho, pak velikost těchto oblastí bude dostatečná k tomu, že pájka ustoupí z již dříve smáčených oblastí, tento jev se nazývá odsmačení. Odsmačení se může také vyskytnout zespoda – od pájeného místa, v místě vystavenému nesmačenému povrchu, kdy je tenká pájená vrstva kovu totálně rozpuštěna do pájky. Toto může vzniknout, když se pájí kontakty z drahých kovů, které se rychle rozpustí v cíno-olověné pájce.

Slabá pájitelnost součástek se hlavně projevuje při špatném režimu pájení přetavením SMD. V procesu pájení vlnou je spoj omýván velkým množstvím pájky. Malá množství nečistot jsou rychle zředěna a odnesena pryč. Pájení přetavením neprovádí čisticí operaci; nečistoty, které jsou přítomny na kontaktech součástky zůstanou v hotovém spoji.

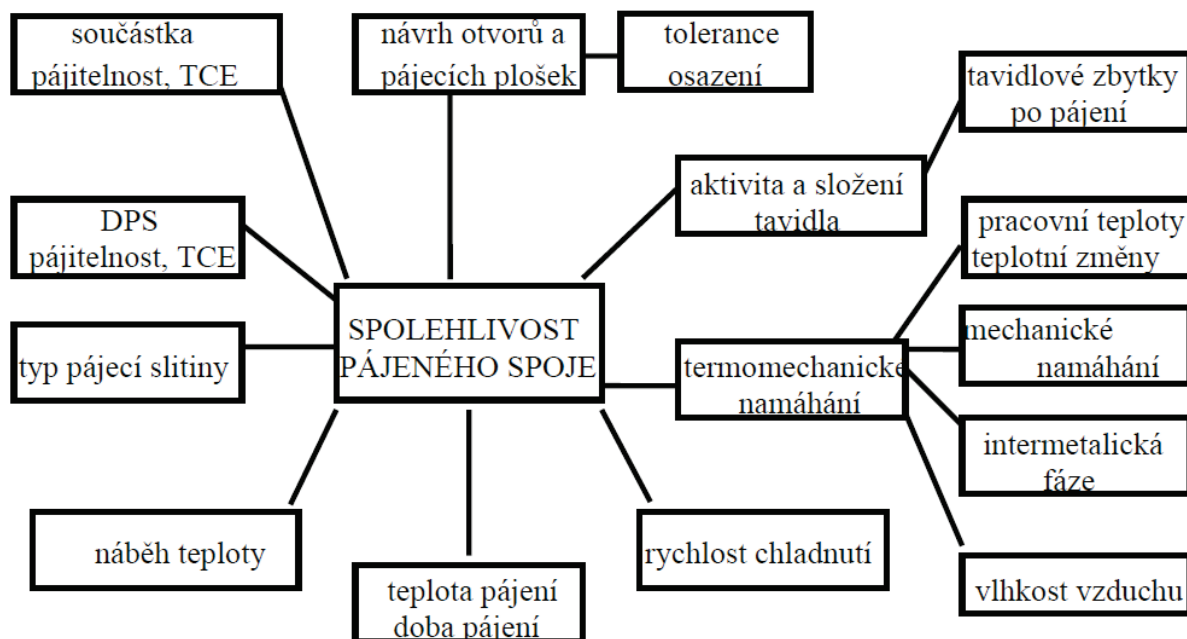
SPOLEHLIVOST PÁJENÉHO SPOJE

Spolehlivý pájený spoj je základním požadavkem v elektronické výrobě. Ideální pájený spoj je charakterizován konkávním pájecím kuželem, lesklým a hladkým povrchem pájky s dokonale smočeným vývodem součástky i pájecí ploškou/pájecím mezikružím DPS. Takto vizuálně charakterizovaný pájený spoj má i dostatečnou pevnost, která odpovídá úrovni pájecího procesu.

Spolehlivost je dána kompatibilitou pájených i pájecích materiálů i pájecím procesem. Záleží na mnoha faktorech – viz Obr. 19. Základním předpokladem pro vytvoření spolehlivého



pájeného spoje je dobrá pájitelnost všech pájených částí - přívodů součástek a plošného spoje. Pájitelnost je podmíněna dobrou smáčivostí.



Obr. 19. Faktory ovlivňující spolehlivost pájeného spoje

Nedostatečné smáčení, nevytvoření odpovídajícího menisku s odpovídajícím množstvím pájky i nehomogenita pájeného spoje (vměstky, nečistoty) vedou ke snížení spolehlivosti.

1.3.6 „STUDENÉ SPOJE“

K tzv. „studeným spojům“ dochází v případech, kdy nenastala odpovídající difúze mezi spojovanými materiály a pájkou:

- je přítomna vrstva oxidů mezi spojovanými materiály (bylo použito málo aktivní tavidlo)
- je přítomna intermetalická fáze na povrchu spojovaných materiálů (nevhodná povrchová úprava i doba skladování)
- nesprávný proces pájení
- pájka nebo spojovaný kov byly při pájecím procesu na nízké teplotě
- doba pájení není optimální

Elektrická vodivost „studených spojů“ je velmi malá, protože proud prochází přes více či méně izolační vrstvy oxidů. Adheze je též velmi špatná a po ztuhnutí spoje může pájka při mechanickém namáhání ztratit kontakt se základním materiálem. Vzhled spoje je šedý, porézní.

Nedostatečné smáčení, nevytvoření odpovídajícího menisku s odpovídajícím množstvím pájky i nehomogenita pájeného spoje (vměstky, nečistoty) vedou ke snížení spolehlivosti.

1.3.7 TERMOMECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ PÁJENÉHO SPOJE

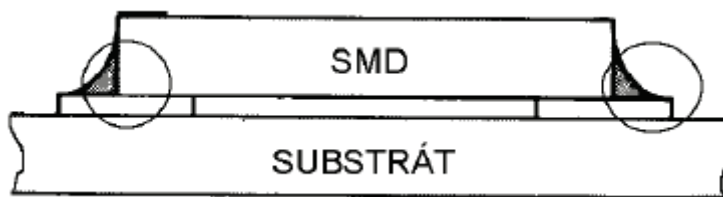
Pájený spoj Obr. 20. je vystaven **mechanickému namáhání** (v tahu i ve smyku), které je způsobeno:

a) **rozdílnými teplotními dilatacemi** součástky a substrátu hlavní příčiny jsou:

- výkonové zatížení součástky



- teplotní cyklování součástky a substrátu



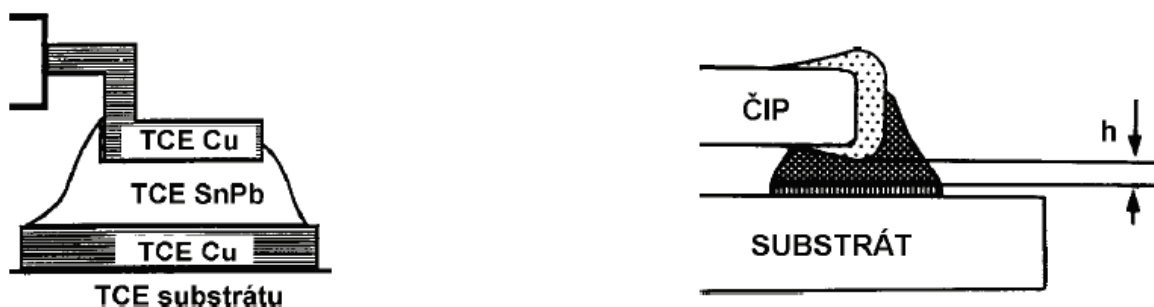
Obr. 20. Pájený spoj

b) **prohnutím** montážního celku

c) **vibracemi** montážního celku

Mechanické namáhání pájeného spoje je kromě výše uvedených příčin ovlivněno **geometrií spoje** (výškou pájky mezi substrátem a čipem Obr. 21., výškou pájeného spoje, velikostí pájecích plošek a jejich přesahem), **typem pájecí slitiny** aj.

Vlivem **creepové únavy materiálu** způsobené dlouhodobě zvýšenou teplotou (nad 20°C) a vlhkostí vzduchu (nad 50%) i **formací intermetalické fáze** při teplotním cyklování dochází dále ke zkřehnutí spoje a snížení stříhové pevnosti.



Obr. 21. Výška pájky mezi substrátem a čipem

Během únavy materiálu dochází k:

- shlukování zrn, které jsou nejvíce vystaveny namáhání v pájeném spoji
- vytváření prasklin pod spojem
- růst prasklin, které jsou později viditelné a mohou probíhat na rozhraní součástka/pájený spoj

VLIV KONTAMINACÍ NA VLASTNOSTI PÁJENÉHO SPOJE

Kontaminace, tj. zejména škodlivá přítomnost některých kovů v pájce má vliv na kvalitu a spolehlivost pájeného spoje. Výrazně ovlivňuje mikrostrukturu spoje, pevnost spoje, křehkost, smáčecí charakteristiky i elektrické vlastnosti (rezistivitu) aj. Problémy související s pájením (krápníky, matný povrch, praskliny ve spoji, nezaplňená horní strana pokoveného otvoru aj.) mohou mít příčinu též ve zvýšené úrovni kontaminací v pájce.

Pájka	Substrát, součástky	Výrobní proces
nečistoty z vlastní výroby nečistoty ze zpracování	kovové vrstvy na substrátu nečistoty na substrátu kovové povlaky mech.prvků nečistoty mech. prvků	rozpuštění součástek rozpuštění DPS rozkladné produkty při pájení okolní prostředí

Obr. 22. Zdroje nečistot

Členění nečistot:

- oxidující kovy: Al, F, Zn, Cd
- kovy vytvářející intermetalické fáze: As, Fe, Co, Ni, Pd, Cu
- kovy vytvářející směsné krystaly: Sb, Bi

Všeobecně:

- příměsi oxidujících kovů snižují rozpouštění substrátu, snižují tloušťku intermetalické zóny, průměr krystalů narůstá,
- příměsi kovů vytvářejících intermetalické fáze výrazně zvyšují rozpouštění substrátu, ale je to naopak doprovázeno minimálními průměry krystalů,
- kovy vytvářející směsné krystaly nelze považovat za nečistoty, ale jsou často přidávány do pájky pro zlepšení smáčecích charakteristik, nemají vliv na vytváření intermetalických zón, vedou ke zmenšování průměru krystalů.

Max. úrovně nečistot:

Al - 0,006%	Fe - 0,02%	Pd - neuvedeno	Zn - 0,05%
Sb - 0,5%	Au – neuvedeno	P - neuvedeno	
As - 0,3%	In – neuvedeno	Ag - neuvedeno	
Cd - 0,005%	Cu - 0,3%	Bi - 0,25%	

VLIV JEDNOTLIVÝCH PŘÍMĚSÍ:

Al - malé množství Al se rozpouští v Sn při zvýšených teplotách nad E. 0,001% Al vede ke zhoršení adheze, zrnitosti, větší viskozitě pájky, praskání z důvodu křehkosti za tepla, podporuje oxidaci povrchu pájky. Al se používá na výrobu nosných rámečků DPS, PÚ - anodická oxidace.

Sb - 0,3% výrazně zlepšují smáčivost, omezení růstu whiskerů a eliminace cínového moru. Příměs zvyšuje pevnost. Příměsi Sb nezhoršují výrazně vlastnosti pájky.

As - škodlivá příměs, As je nerozpustný v solidu Sn nebo Pb, dlouhé jehlice v mikrostruktuře, způsobuje nesmáčivost.

Bi - není považován za nečistotu v pájce, ale za příměs do slitiny. Bi zlepšuje smáčecí charakteristiky při solidifikaci vede k pozitivním změnám v mřížce.

Cd - zanedbatelná rozpustnost v tuhé fázi, tvoří intermetalické sloučeniny, toxické, slitiny s nižší teplotou tavení, podporuje oxidaci povrchu pájky, nežádoucí, pájecí jed.

Cu - zanedbatelná rozpustnost v tuhé fázi, tvoří dvě ortorombické intermetalické sloučeniny, kontaminace vede k větší zrnitosti i viskozitě, nutnost zvýšit pracovní teplotu lázně.

Kontaminace Cu způsobuje křehkost. Částečné odstranění Cu ze slitiny se provádí přidáním síry S nebo odstraněním povrchové vrstvy slitiny při nižší teplotě.



Au - zanedbatelná rozpustnost v tuhé fázi, tvoří intermetalické sloučeniny, matný vzhled, mnoho strusky, max 0,2% způsobuje křehkost. Koncentrace Au x 2 + koncentrace Cu celk. méně než 0,35%.

Fe - žádná rozpustnost v tuhé fázi, tvoří intermetalické sloučeniny, kontaminace způsobuje křehkost, zrnitost.

Mg - podobně jako Al.

Ni - žádná rozpustnost v tuhé fázi, tvoří intermetalické sloučeniny s Sn, neškodí.

Ag - žádná rozpustnost v tuhé fázi, tvoří intermetalické sloučeniny, zrnitost a důlky v povrchu.

Zn - zanedbatelná rozpustnost v tuhé fázi, netvoří intermetalické sloučenin, škodlivý 0,005%, zrnitost povrchu, výrazně zhoršuje smáčecí charakteristiky, problémy při tuhnutí, podporuje oxidaci povrchu pájky.

S - škodlivá kontaminace od 7 ppm, vytváří nežádoucí sirníky.

P - fosfor a arsén způsobuje nesočivost.

1.4 VADY PÁJENÉHO SPOJE

1.4.1 KLASIFIKACE VAD PODLE FÁZE VZNIKU

KONSTRUKČNÍ VADY

- volba součástky - typ pouzdra, povrchové úpravy vývodu, rozdílu mezi průměrem velikosti otvoru a průměrem vývodu.
- návrh DPS - návrh pájecích plošek a otvorů, návrh vodičů, respektování izolačních vzdáleností

VADY Z TECHNOLOGICKÉ PŘÍPRAVY VÝROBY

- součástky - špatná pájitelnost, typ povrchové úpravy, skladování (teplota, vlhkost), kvalita pokovení
- DPS - špatná pájitelnost, typ povrchové úpravy, skladování, nečistoty v pokovení/ projevy dílčích degradačních mechanismů:
 - chemická koroze
 - difúze v tuhých látkách
 - vznik intermetalických sloučenin
 - degradace polovodičových součástek
- materiály pro pájení - nevhodný typ tavidla, pájecí pasty, nekompatibilní povrchy pájených kovů a pájky. Nečistoty v pájce.

VÝROBNÍ VADY ZPŮSOBENÉ NESPRÁVNÝM PROCESEM PÁJENÍ

- odsmáčení a nesmáčení (dewetting a nonwetting)
- nedostatek pájky (solder voids)
- přebytek pájky (excess solder)
- můstky a pavučiny (bridging a webbing)
- krápníky (icicles)
- dírky v pájených spojkách (blowholes)



- studený a prasklý spoj (cold and cracked joint)
- matný a zrnitý spoj (dull and grainy)
- skvrny na povrchu pájky (stains)

OPRAVÁRENSKÉ VADY

- nevhodná technika opravy, nesprávná volba materiálu

PROVOZNÍ VADY

- zvětšování odporu propojení
- snižování izolačního odporu

1.4.2 POŽADAVKY NA KVALITU PÁJENÝCH SPOJŮ

Jsou definovány v normách, používají se jak tuzemské i zahraniční. Za zahraničních je nejznámější IPC - A - 610 B, která klasifikuje montážní celky do 3 tříd podle oblasti použití:

Třída 1: Všeobecná elektronika zahrnuje spotřební elektroniku, včetně části výpočetní techniky

Třída 2: Spolehlivá provozní elektronika zahrnuje komunikační techniku, měřicí elektroniku. Funkčnost zařízení bez přerušení je sice požadována, ale není to kritický faktor

Třída 3: Vysoce spolehlivá elektronika zařízení musí být maximálně spolehlivé, nesmí dojít k výpadkům v jeho činnosti. Třidu 3 vyžaduje armáda, medicína aj.

Kvalita montážních celků se hodnotí třemi stupni:

- **Preferovaná** kvalita - blíží se ideálnímu stavu, montážní celek vyrobený v této kvalitě bude vykazovat maximální spolehlivost
- **Přijatelná** kvalita - zařízení bude vykazovat spolehlivou funkci
- **Nepřijatelná** kvalita - montážní celek vykazuje vady, které nezajistí spolehlivou funkci V normách jsou vyobrazeny jednotlivé kvalitativní stavy montážního celku po dílčích montážních operacích. Hodnocena je dosažená kvalita jedním ze třech stupňů a je uvedeno, pro kterou třídu takto provedená operace ještě vyhovuje.

1.4.3 PÁJENÉ SPOJE S VÝVODOVÝMI SOUČÁSTKAMI

Ideální pájený spoj:

- pájecí kužel je konkrávní
- pájka dokonale smáčí vývod součástky i pájecí mezikruží DPS
- povrch pájky je lesklý a hladký

Přijatelný pájený spoj:

- pájecí kužel je mírně konvexní, smáčení povrchu vývodu i mezikruží je dobré
- pájka vyplňuje pokovený otvor do 75% výšky, pájka je 360° kolem vývodu a smáčí nejméně 80 % plochy mezikruží

Nepřijatelný pájený spoj:

nezapájený nebo neúplně zapájený vývod

- nedostatek pájky v otvoru pájecí mezikruží není pokryto pájkou
- neúplný pájený spoj kolem vývodu (méně než 270°)

vývod není vidět

- kapkovitý spoj



- vysoký kužel
- můstek mezi pájecími kuželi

krátery v pájecím kuželi i v pájce zapájeného pokoveného otvoru

- větší kráter v kuželi nebo více jak 2 malé
- plynová bublina, resp. kráter ve spoji
- prasklina v kuželi

zrnitý pájený spoj v okolí vývodu

přítomnost cizího materiálu ve spoji

- rezidua tavidla v okolí pájeného spoje
- rezidua pájky v okolí pájeného spoje, která redukují vzdálenosti mezi vodiči
- izolace z vodiče kontaminuje pájený spoj

odhalený základní kov

- zastřižený konec vývodu pokud je vývod na bázi železa
- poškozená/odhalená měď na plošném vodiči nebo pájecím mezikruží na DPS
- odhalený základní kov na vývodu součástky, pokud se nejedná o konec vývodu

1.4.4 POŽADAVKY NA ZAPÁJENÍ ČIPOVÝCH SOUČÁSTEK

Ideální stav:

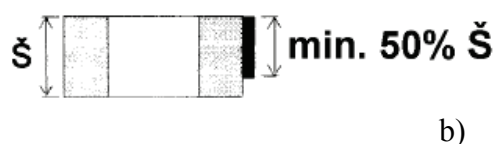
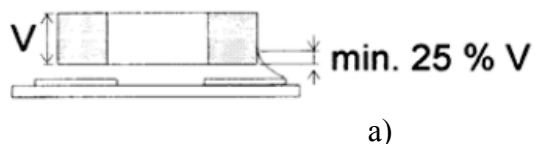
- součástka je na pájecích ploškách,
- tvar pájeného spoje je konkávně vzestupný,
- je patrná výborná smáčivost povrchu,
- povrch je lesklý.

Přijatelný stav:

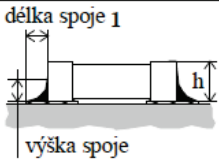
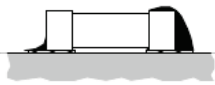
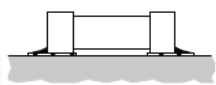
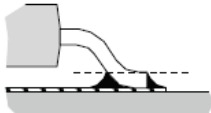
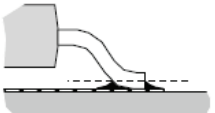
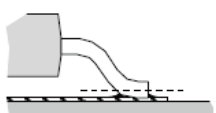
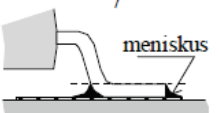
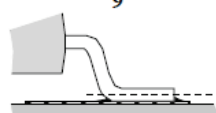
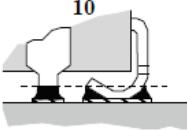
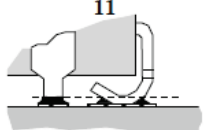
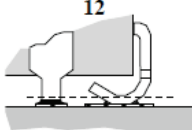
- stranový přesah vývodu je max. 50% šířky terminálu nebo pájecí plošky,
- délkový přesah součástky není povolen,
- šířka pájeného spoje min 50 % šířky terminálu nebo pájecí plošky,
- pájený spoj po bocích terminálu není vyžadován,
- minimální tloušťka pájky mezi spodní plochou terminálu součástky a pájecí ploškou není vyžadována, ale musí být zřejmé dobré smáčení povrchu terminálu,
- minimální výška pájky na spoji je buď 25 % výšky terminálu, nebo 0,5 mm.

Platí menší hodnota

- maximální výška pájky na terminálu není omezena, ale pájka nesmí zasahovat na pouzdro součástky



Obr. 23. Minimální výška pájeného spoje a) a minimální šířka pájeného spoje b)

Součástka	Optimální	Akceptovatelný	Nevyhovující
Kvádrový tvar (R, C, L)			
Vývody tvaru Gull wing (SO a podobné typy)			
Vývody tvaru Gull wing (QFP, VSO)			
Vývody tvaru J (PLCC)			

Obr. 24. Jakost pájených spojů

1.4.5 TECHNIKA RUČNÍHO PÁJENÍ

Hlavní zásada: efektivní přenos tepla při optimálních pracovních teplotách. Cílem je dosažení co nejspolehlivějšího spoje volbou vhodného času a teploty. Pro eutektickou pájku Sn63Pb s teplotou tání 183°C se doporučuje teplota hrotu asi o 80°C vyšší. Dále je nezbytné zvolit vhodný typ tavidla a pájecí slitiny v trubičkové pájce, zajistit dobrou hájitelnost spojovaných částí při respektování správné techniky ručního pájení.

Během pájení je nutno zajistit prohrátí pájeného spoje a přidávání pájky přímo na pájené místo viz Obrázek 25 a). Nesprávný postup s přidáváním trubičkové pájky na hrot je na Obrázek 25 b)



Obr. 25. Ruční pájení a) správná technika b) nesprávná technika

Trubičkové pájky s Ag, Cu a jejich přednosti

Pro pájení povrchové montovaných prvků se používají pájky s obsahem Ag (eliminuje rozpouštění terminálů obsahujících stříbro), pro pájení měděných lanek se preferuje pájka s obsahem Cu. Pro některé aplikace je výhodné použití pájecího drátu a externího tavidla.

1.4.6 TYPY PÁJECÍCH ZAŘÍZENÍ

Zařízení pro ruční pájení pracují na 2 základních principech:

REGULOVATELNÁ PRACOVNÍ TEPLOTA

Teplota je snímána čidlem poblíž hrotu ve vyhřívané části pracovního nástroje. Jako čidlo se používá termočlánek nebo laserem trimovaný rezistor. Zapojení topného tělesa je zpravidla pětivodičové (2 vodiče napájení, 2 vodiče čidlo, zem).

FIXNÍ PRACOVNÍ TEPLOTA

Hroty jsou důležité pro kvalitní pájecí proces a pro dobrý přenos tepla. Hrot bývá buď zasunut a vyhříván topným tělesem po obvodu, nebo je topné těleso umístěno uvnitř hrotu. Hroty mají pro zajištění dlouhé životnosti několik vrstev povrchových úprav. Pro dlouhou životnost je vhodné dodržovat tato doporučení:

Všeobecná doporučení pro zvýšení životnosti hrotů:

1. Používat co nejnižší pracovní teploty
2. Volit hrot s maximální kontaktní plochou
3. Volit hrot co možná nejkratší
4. Udržovat hrot pocínovaný a čistý bez oxidů
5. Používat pájku pro zlepšení přenosu tepla
6. Aplikovat trubičkovou pájku na spoj, ne na hrot

2. Pájení přetavením pájecí pasty (reflow pájení)

Při tomto technologickém postupu se součástky osazují do pájecí pasty, která se přetaví při teplotě, která je vyšší, jako bod tání pájky obsažené v pastě. Během pájení jsou součástky povrchovým napětím "vycentrovány" na plošky DPS. Pájí se montážní celky osazené čistou povrchovou montáží jednostrannou či oboustrannou i typy kombinované povrchové montáže.

Druhy přenosu tepla

Pro přetavení pájecí pasty je možno použít prakticky všechny **způsoby přenosu tepla**: tj.:

- vedení (kondukce)
- proudění (konvekce)
- záření (radiace)

Vedení (kondukce)

Každá látka je charakterizována teplotou, která je mírou tepelného pohybu částic. Při kontaktu dvou látek o rozdílných teplotách předávají částice teplejší látky část své kinetické energie částicím látky chladnější, tzn. přímým fyzickým kontaktem. Přenos tepla lze zprostředkovat přes tuhá, kapalná a plynná média.

Tepelný tok q , tj. množství tepla, které projde plochou S za určitý časový interval se určí ze zjednodušeného vztahu jednodimenzionální formy Fourierova zákona.

$$q = \lambda \times S \times \Delta T / L, \quad (1)$$

kde



q - teplotní tok (W)

λ - teplotní vodivost materiálu ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

S - plocha, kterou prochází teplo (m^2)

$\Delta T/L$ - teplotní gradient Km^{-1}

⇒ jistá analogie s Ohmovým zákonem: q - proud, ΔT - rozdíl napětí, $L/\lambda S$ odpor

Touto metodou se realizuje přenos tepla z pouzder součástky/spoje na substrát. Kontaktní metodu lze použít na pájení keramických substrátů, příp. vícevrstvých DPS s kovovým jádrem, tedy materiálů, které mají velmi dobrou tepelnou vodivost.

Proudění (konvekce)

Teplo se přenáší pohybem celého souboru molekul kapaliny nebo plynu. Šíření tepla prouděním je tedy intenzivnější než šíření tepla vedením (neuspořádaný pohyb jednotlivých molekul). V konvekčním proudění je i jistá část energie předávaná kondukcí. Konvekce je buď přirozená, nebo nucená.

Přirozená konvekce nastává v kapalinách nebo plynech působením gravitačních sil, v místech, kde je hustota vyšších částí teplotního media větší než částí nižších, klesají hustší části dolů a řidší stoupají naopak vzhůru.

Nucená konvekce se používá tam, kde je potřeba větší přenos tepla. Proudění se vytváří uměle pomocí ventilátorů nebo čerpadel.

$$q_c = h_c \times S \times (T_s - T_a), \quad (2)$$

kde

q_c - přenos tepla prouděním z povrchu do okolí (W)

h_c - koeficient konvekčního přenosu tepla ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)

S - plocha (m^2)

$(T_s - T_a)$ - rozdíl teploty povrchu T_s a teploty okolí T_a (K)

⇒ jistá analogie s Ohmovým zákonem: q - proud, ΔT - rozdíl napětí, $1/h_c S$ odpor

Záření (radiace)

Tepelná energie se přenáší zářením, tj. elektromagnetickým vlněním. Množství tepelné energie přenesené radiací mezi dvěma tělesy teploty T_1 a T_2 lze vyjádřit rovnicí:

$$q = \epsilon k (T_1^4 - T_2^4), \quad (3)$$

kde

q - množství tepelné energie

ϵ - koeficient vyzařování

k - Stefan-Boltzmanova konstanta $5,67 \cdot 10^{-8} (\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4})$

T_1, T_2 – teploty

1.4.7 METODY PÁJENÍ PŘETAVENÍM

Metody pájení přetavením:

- konvekční pájení
- infraohřev
- metoda pájení pomocí laseru
- kondenzační metoda
- kontaktní metody
 - vyhřátým nástrojem
 - vyhřátým pásem



Ve srovnání s pájením vlnou, případně jinými technologiemi, má pájení přetavením pájecích past následující **výhody**:

- pájka a tavidlo se vhodným technologickým postupem aplikují pouze v místech kde je třeba, výsledkem je:
 - úspora materiálu
 - pájka a tavidlo se dávkuje v přesně definovaném poměru
 - je vyloučena "nekontrolovatelná" přítomnost nečistot, které se mohou dostat na pájený spoj při pájení vlnou, případně jiných postupech
- pájecí proces probíhá bez teplotních rázů
- přesný technologický postup aplikace pasty umožňuje dosáhnout vyšší hustoty montáže
- oboustranná montáž SMD

V Tab. 13. je srovnání jednotlivých metod.

Faktor	IR	Kondenzace	Konvekce
Řízení procesu	dobré	výborné	velmi dobré
Pracovní teplota	regulovatelná	pevná	regulovatelná
Homogenita pracovní teploty	špatná	velmi dobrá	dobrá
Max.teplota	špatně def.	pevná	špatně def.
Univerzálnost	ucházející	velmi dobrá	dobrá
Citlivost na barvu materiálu	velká	žádná	malá

Tab. 13. Srovnání tří nejdůležitějších metod pájení přetavením

Konvekční pájení je nejrozšířenější metodou. Součástky, DPS i pájecí pasta jsou ohřívány proudem vyhřátého plynu. Méně se používá infraohřev kondenzační metoda, metoda pájení pomocí laseru, případně kontaktní metody - vyhřátým nástrojem, nebo vyhřátým pásem.

TRENDY V REFLOW PÁJENÍ:

- kontinuální zlepšování kvality pájení při dalším snížení koncentrace O₂ v dusíkové atmosféře
- nucená konvekce s recirkulací plynného média
- zlepšení technického vybavení reflow pecí, např. samočištění tj. „spálení“ zkonzenzovaných tavidlových zbytků krátkým cyklickým ohřevem a jejich odsátí, přídavné spodní chlazení v přetavovací sekci aj.
- monitorování procesu vč. SPC

1.4.8 OSAZOVÁNÍ SMD

Požadavek doby je osazovat rychleji, kvalitněji, levněji stále se zmenšující DPS s vyššími zástavbovými hustotami i menšími pouzdry. Výrobci elektronických zařízení se snaží udržet krok se stále vyvíjejícími se požadavky trhu (technologie, balení, výroba, kvalita a samozřejmě i produkty se neustále mění). Proto se vyžadují zařízení, která jsou dostatečně flexibilní, aby se dala těmto změnám přizpůsobit. Stále větší množství osazovacích strojů se vyrábí buď na určité společné platformě, nebo formou modulů, které vyhovují různým výrobním požadavkům. Téměř všichni přední dodavatelé výrobních zařízení dělají nějaký typ „modulárního“ osazovacího zařízení, aby pomohli svým zákazníkům držet krok.



Přes rostoucí oblibu těchto strojů si stále silné místo udržují „tradiční“ linky – vysokorychlostní osazovací stroje následované fine-pitch osazováním.

PRINCIP OSAZOVÁNÍ

Spočívá v odebrání součástky (pick) za zásobníku, její vystředění a osazení (place) do lepidla, pájecí pasty nebo tavidla na DPS.

U metody **automatického** (automatic) osazení je tato operace provedena strojově. Pro poloautomatickou i automatickou metodu se zhotovuje **osazovací program** buď v samoučícím režimu, nebo se data generují přímo z návrhového systému.

U **ruční** (manul) nebo **poloautomatické** (semiautomatic) metody odebrání součástky i její osazení se provádí rukou. U osazovacího poloautomatu je odebíraná pozice indikovaná světelně nebo nastavením odebírací pozice, místo pro osazení SMD prvku na DPS je indikováno světelným paprskem.

Pozornost bude věnovaná osazovacím automatům, které jsou nabízeny v širokém sortimentu, které jsou schopny na rozdíl od ručních zařízení osazovat výrazně levněji větší výrobní série DPS. Automaty jsou nenahraditelné také z hlediska přesnosti, zejména při osazování pouzder s malou roztečí (fine pitch) a malých pasivních součástek (0402, 0201 aj.) i vyšší spolehlivosti. Existují tři základní **konstrukční typy** osazovacích strojů:

- tzv. kartézský systém (overhead gantry-style)
- revolverový systém
- plně paralelní systém, z nichž každý má své přednosti a nevýhody v závislosti na aplikaci. Hledá se kompromis mezi rychlostí a přesností.

Kartézský systém nabízí větší pružnost a přesnost, ale nemůže dosáhnout takové rychlosti, jako zbylé dva způsoby. S přechodem na součástky s pouzdry QFP a BGA (area-array) se stává přesnost stále důležitější. Revolverové a paralelní systémy se většinou k takovým účelům nepoužívají. X a Y souřadnice kartézského systému se určují s přesností 50µm, tedy nepřesněji ze všech tří systémů.

Revolverový systém dosahuje relativně vyšších rychlostí díky mnoha stejným rotujícím hlavám. Součástky jsou umísťovány, jakmile hlava dosáhne určitého bodu nad místem usazení. Pohyblivé zásobníky doručují součástky k hlavám, které odebírají a umísťují součástky na desku. DPS se pohybují pod hlavami a zastavují se ve správných pozicích, aby na ně mohly hlavy umístit součástky.

Plně paralelní systém využívá série malých individuálních umísťovacích sekcí. Každá z nich má vlastní polohovací systém s připojenou kamerou a osazovací hlavou. Hlava má přístup k omezenému počtu pásků se součástkami a osazuje dané části několika desek současně.

Revolverový a paralelní systém jsou příklady vysokorychlostních systémů často používaných k umísťování malých součástek.

Rychlost osazování bývá u nepřesnějších kartézských systémů 5000-20000 souč./hod., u revolverových 20000-50000 a u plně paralelních systémů 50000-100000 souč./hod.

Osazovací automaty lze rozdělit podle **principu odebírání a osazování** na tři základní skupiny:

1. Sekvenční systémy
2. Simultánní systémy
3. Simultánně/sekvenční



SEKVENČNÍ „PICK-AND-PLACE“ OSAZOVÁNÍ AUTOMATY

Jednou z hlavních předností pick-and-place automatů je jejich vysoká pružnost. Díky velké variabilitě, množství typů osazovaných součástek a krátkému času potřebnému ke změně jsou sekvenční automaty vhodné i pro výrobu malých sérií.

Princip:

Součástka je vyzvednuta ze zásobníku pomocí vakuové pipety, vycentrována a umístěna do přesné polohy na DPS. Osazovací hlava se pohybuje pomocí portálového systému v osách x,y.. DPS i zásobníky) jsou nepohyblivé. Při osazování rozměrnějších součástek se provádí externí centrování optickým nebo mechanickým systémem. Na Obr. 25. je znázorněn postup osazení včetně externího mechanického centrování.

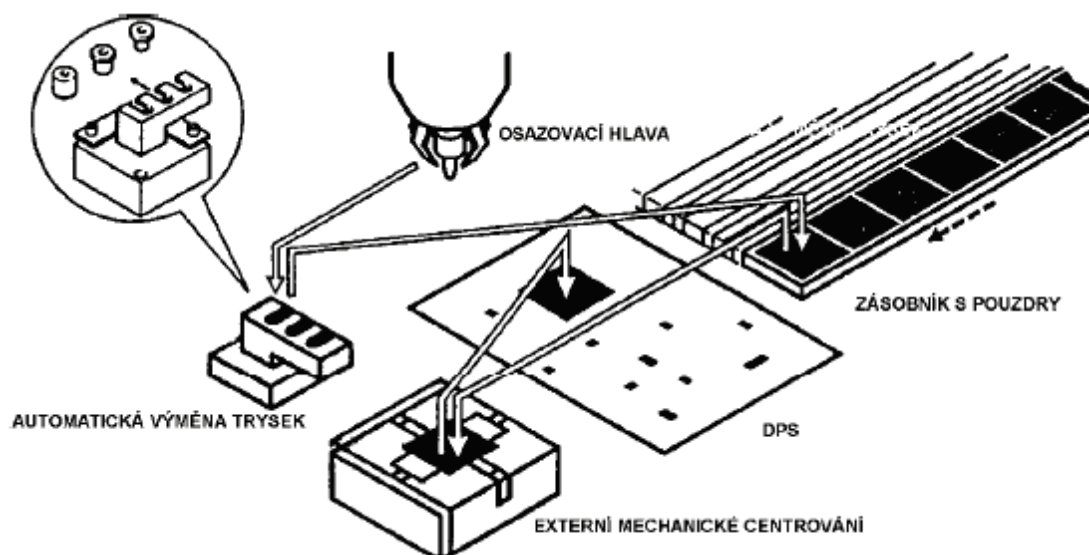
Krok 1: Hlava vybere nástroj vhodný pro daný typ součástky

Krok 2: Hlava nabere součástku ze zásobníku („Pick,,)

Krok 3: Vycentrování součástky do správné polohy

Krok 4: Osazení součástky na DPS („Place“)

U některých systémů se osazovací hlava pohybuje pouze v ose x. Vůči hlavě se pak pohybuje osazovaná DPS nebo zásobník.



Obr. 25. Externí mechanické centrování

Sekvenční pick-and-place systémy se v současné době používají:

- ve flexibilních výrobních malých firem, tj. s požadavky na rychlou změnu charakteru výroby - osazovaného typu DPS, použitých součástek a typů pouzder i rozdílnou sériovostí: Sekvenční osazovací automaty jsou vhodné pro osazování široké škály součástek od čipových po fine pitch a vzhledem k relativně malé osazovací rychlosti jsou tyto automaty určeny pro malé a středně velké výrobní série. Jsou konstruovány pro práci v samostatném režimu, nebo jsou řazeny společně s dalšími zařízeními do montážní linky.
- u středních a velkých firem jako doplněk k rychlým a relativně málo přesným „čip shooterům“ Sekvenční automaty se zde uplatní při osazování komponentů s velkým počtem vývodů a pouzder s malou roztečí (tzv. „fine-pitch,,). Vysoká spolehlivost a přesnost je zajištěna prostřednictvím centrovacích a kontrolních systémů vidění a modulů pro měření rovinnosti vývodů součástek.

Pro zvýšení osazovacího výkonu se používají sekvenční zařízení s několika osazovacími hlavami.

SEKVENČNÍ NASTŘELOVAČE ČIPŮ „CHIP SHOOTER“

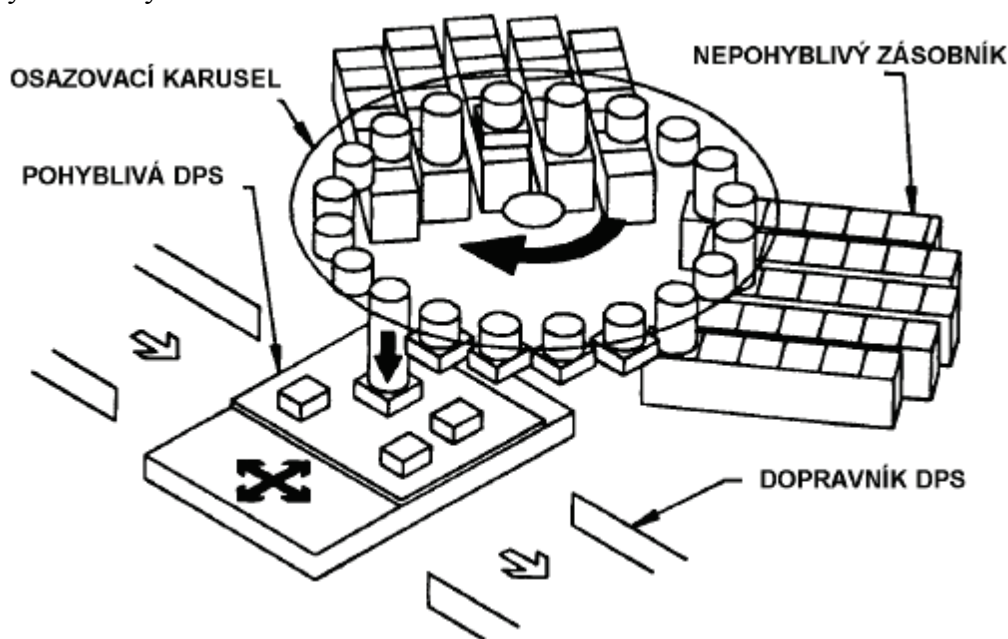
Nutný požadavek na zvýšení montážní rychlosti vedl k vývoji automatů, jejichž princip je sice stále založen na sekvenčním osazování, zpracovávají však mnohem vyšší množství standartních součástek (až 40.000 součástek/hod). Tzv. nastřelovače čipů osazují čipové součástky a součástky s malým počtem vývodů, vysoká osazovací rychlost je dosažena na úkor jejich snížené pružnosti.

Princip

Nastřelovače čipů osazují součástky sekvenčně, avšak určité množství součástek je transportováno z podávací do osazovací polohy současně, nebo v souvislém proudu. Existuje několik principů řešení nastřelovačů čipů, které umožňují jejich vysokou rychlost. Mezi nejrozšířenější patří:

Rotační hlava vertikální fixní s fixním zásobníkem součástek

Součástky jsou nabírány z nepohyblivých zásobníků vakuovými pipetami, které jsou umístěné na rotační hlavě. Osazovací hlava rotuje kolem vertikální osy po krocích, přičemž se daná součástka, která byla vyzvednuta pipetou vždy přiblíží těsněji k osazovací pozici. Během otáčení rotační hlavy je poloha DPS upravována tak, aby dosáhla osazovací polohy. Takto je vždy v každém kroku připravena jedna součástka k osazení a další součástky jsou zároveň vyzvedávány ze zásobníků.

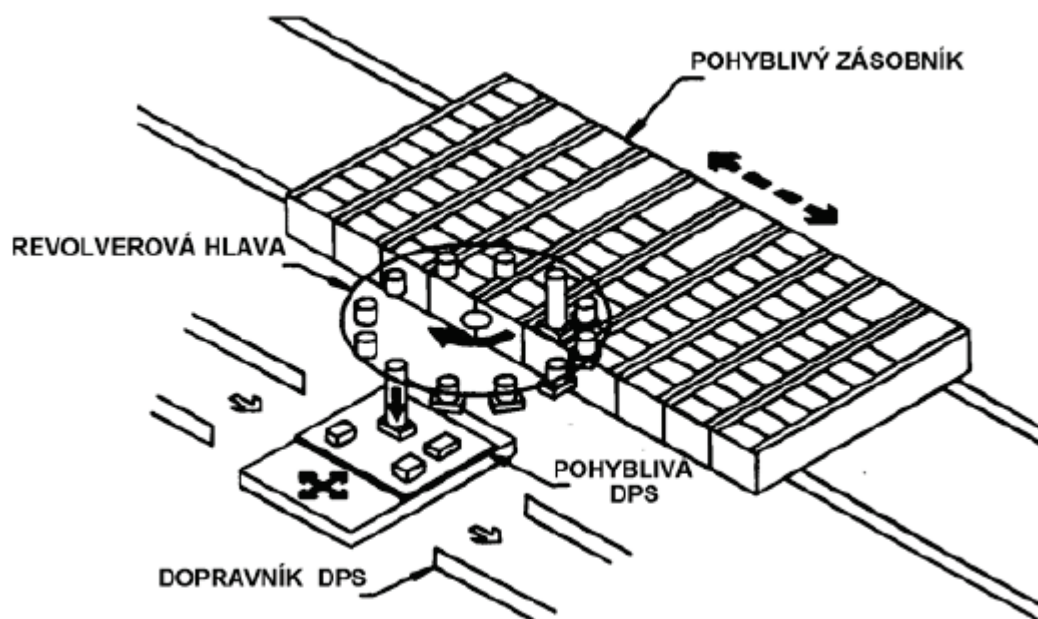


Obr. 26. Princip rotační hlavy vertikální

Rotační hlava vertikální fixní s pohyblivým zásobníkem součástek

Díky pohyblivému zásobníku je možno použít větší počet zásobníkových modulů, než tomu bylo u montážního karuselu s pevným zásobníkem. Zatímco rotační hlava osazuje jednu součástku na DPS, nabere zároveň součástku pro další osazení ze zásobníkového modulu. Při otáčení revolverové hlavy o jeden krok se poloha desky upraví do polohy nutné pro osazení dalšího pouzdra.



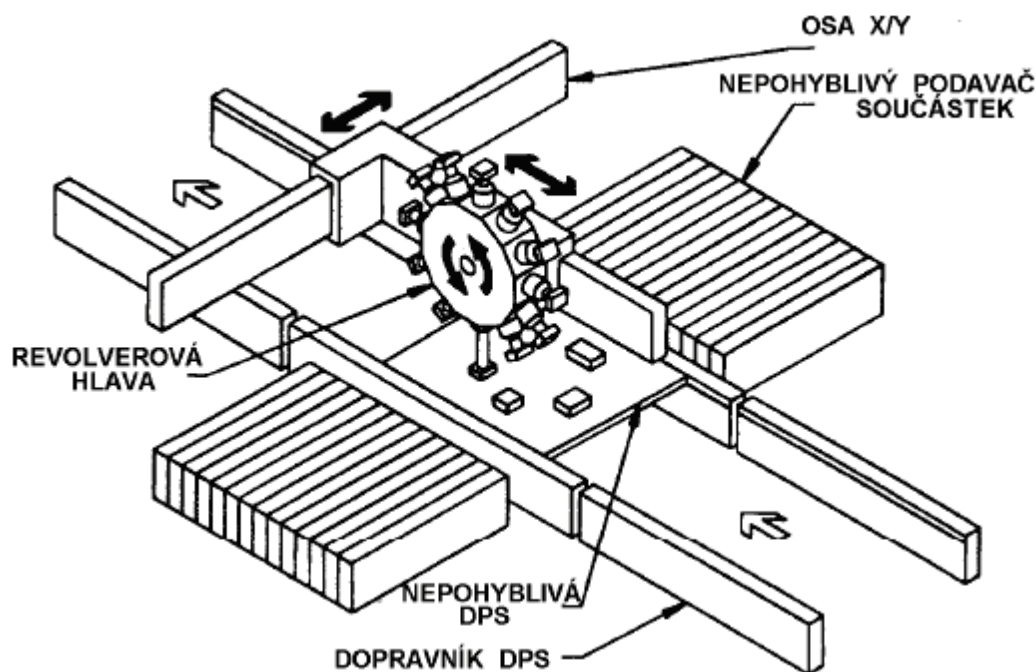


Obr. 27. Princip rotační hlavy s pohyblivým dopravníkem

Rotační hlava horizontální na dvouosém portálovém systému

V tomto případě se rotační hlava pohybuje po dvouosém portále, tak že je eliminovaná nutnost nastavovat polohu DPS a také zásobníky jsou nepohyblivé. Rotační hlava si v prvním kroku nabere sekvenčně součástky se zásobníků (standardně 12 součástek).

V druhém kroku se přemístí do osazovací polohy a postupně všech 12 součástek osadí (tzv. systém collect and place). Aby bylo možno dosáhnout ještě větších rychlostí, bývají v tomto systému kombinovány dvě hlavy. Zatímco první hlava nabírá součástky, druhá hlava provádí osazování.



Obr. 28. Princip rotační hlavy na dvouosém portálovém systému

Rotační hlava horizontální na jednoportálovém systému

Vzhledem k tomu, že osazování pouzder s malou roztečí vyžaduje mnohem větší přesnost osazováním, než jsou výše uvedené „chip chootery“, schopné zajistit, byl vyvinut nastřelovač čipů, který obsahuje nejen rotační hlavu, ale i hlavu pro malé rozteče.

Uvedené osazovací hlavy jsou umístěny na spojeném dvouosém portálovém systému a používají se za sebou. Hlava malých roztečí osazuje sekvenčně, což umožňuje vysokou přesnost. Rotační hlava pracuje na principu „collect and place“. Takto řešený automat může zpracovávat všechny standardní prvky až do velikosti 0402.

3. Simultánní osazovací automaty

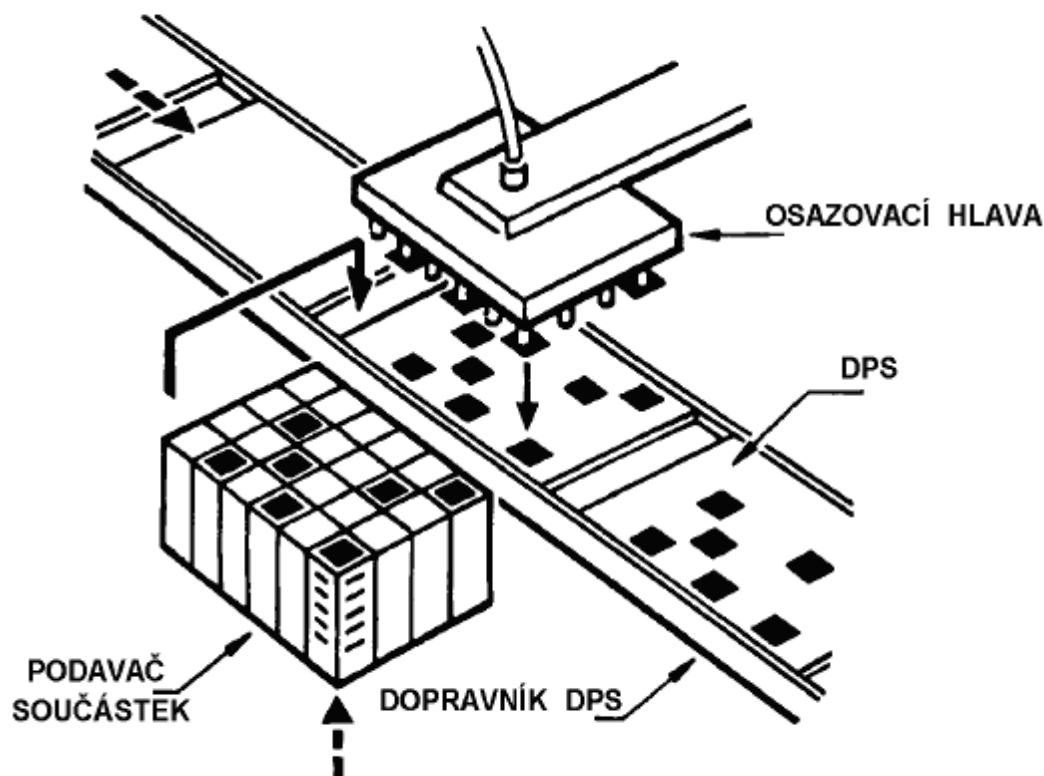
Simultánní osazovací automaty jsou navrženy tak, aby dosahovaly maximální možnou osazovací rychlost (až 300.000 součástek/hod). S požadavkem na vysokou rychlost však souvisí omezení týkající se počtu typů osazovaných DPS, omezení počtu typů možných osazovaných pouzder (pouze čipové prvky a malé součástky s malým počtem vývodů) a menší přesnost osazení i malá flexibilita systému.

Princip

Součástky jsou pomocí „trubicového systému“ simultánně uloženy z pásových nebo ze zásobníků s volně sypanými součástkami do zásobníkového modulu. Speciální osazovací hlava nabere pomocí vakuových pipet simultánně komponenty z modulu a osadí je na správnou pozici na DPS.

Zásobníkový modul i osazovací hlava musí přesně odpovídat uspořádání osazované desky plošných spojů. Jakékoli změny typu osazované DPS si vyžadují samostatné úpravy podávacích nástrojů, které jsou časově náročné (viz. Obr. 29.).





Obr. 29. Princip simultánního osazovacího automatu

Simultánní automaty jsou určeny zejména pro masovou výrobu spotřební elektroniky. Díky vysokým osazovacím rychlostem jsou náklady na osazování nízké.

MODULÁRNÍ SYSTÉMY OSAZOVACÍCH AUTOMATŮ

Provedeme-li rozbor typů pouzder, která jsou osazovaná na DPS, je zřejmé, že největší část (70-80%) tvoří jednoduché součástky typu odporů, kondenzátorů, diod apod..

Mnohavývodové pouzdra a pouzdra s malou roztečí se na DPS vyskytují méně často. Pro osazování jednoduchých pouzder typu čip je požadována maximální osazovací rychlost, zatímco osazování pouzder složitějších, zejména „fine pitch“, vyžaduje vysokou přesnost a automaty se systémy vidění. Automaty, v nichž je sloučena vysoká osazovací rychlost a přesné „fine-pitch“, osazování jsou velice nákladné. Běžným řešením je spojení dvou, nebo více osazovacích automatů, které mají rozdílné parametry do modulárního systému.

Jedna část takového modulu pak osazuje čipové komponenty při velkých rychlostech s maximální možnou přesností a druhá část pak osazuje s extrémně vysokou přesností, ale s menší rychlostí složitější pouzdra. Výhodou modulárního systému jsou nízké náklady a vysoká flexibilita.

Modulární systémy mohou být rozšířeny o další části na základě aktuálních požadavků na kapacitu výroby.

Metoda osazování	Rychlost (součástky/hod)	Flexibilita	Chybovost metody (dpm)
Ruční osazovací manipulátor	300 – 500	vysoká	cca 3000
Stolní osazovací poloautomat	300 – 600	vysoká	cca 700



Sekvenční „Pick and Place,, automat			
- „Single-Head“ Systém (1 osaz.hlava)	2.000 – 4.000	vysoká	100 - 30
- „Multi-Head“ Systém (více osaz.hlav)	až 30.000	střední	
- „Chip Shooter,, Nastřelovač-čipů	až 180.000	střední	
Simultánní automat	cca 120.000 až 300.000	malá	cca 100

Tab. 14. Srovnání rychlostí u jednotlivých metod osazování

Požadavek na chybovost:

Automatické osazování obvykle: 100 - 30 dpm, požadavek doby je dostat se na přesnost osazení 17,5 µm, která odpovídá 5 sigma.

1.4.9 KRITÉRIA PRO VÝBĚR OPTIMÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ

Musí vyhovovat individuálním požadavkům výroby Rozhodnutí, které z obou řešení bude pro výrobu výhodnější, může být usnadněno následujícími úvahami zohledňujícími:

- osazovací rychlost, cenu na osazení součástky
- přesnost
- flexibilitu
- spolehlivost
- servisní podporu

Dále volba závisí na řadě výrobních faktorů:

- počet typů DPS a jejich výrobní série
- rozměry DPS (efektivní osazovací plocha)
- počet typů osazovaných součástek -> požadavky na počet podavačů
- typy pouzder i balení součástek -> druhy podavačů a metody centrování
- zařazení stroje do výrobní linky („In Line,,), nebo samostatně (Off Line)
- úroveň SW, konverze dat z CADu
- typy a „intelligence“ podavačů s verifikací odebíracích pozic i hodnot součástek
- komunikace se čtečkou čárového kódu aj.

Parametry udávané u osazovacích automatů:

- osazovací rychlost (počet osazených součástek za hodinu). Je to teoretická hodnota
- praktická hodnota bývá asi 2/3 hodnoty teoretické
- minimální/maximální rozměry DPS
- max. počet 8 mm podavačů
- přesnost osazení
- vhodnost osazování pro „fine pitch“
- metody centrování a možnosti rozšíření



2 LITERATURA

doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D. kolektiv. *ZÁKLADY KONSTRUKČNÍCH TECHNOLOGIÍ V ELEKTRONICE - Výroba DPS v laboratořích VŠB TU Ostrava*, učební text a návody do cvičení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, FEI, KAT 450. 2012 [30.6.2013]. Interní document.

Ing. Martin Abel. *PLOŠNÉ SPOJE SE SMD, NÁVRH A KONSTRUKCE*. Nakladatelství Platan, Kunětická 101, Pardubice. Tisk Grafion Pardubice, Vydání první, dotisk. ISBN 80-902733-2-7. 2000 [20.6.2011].

Kristýna Friedrischková. *Příprava výukových textů v projektu MOST-TECH, Technologie propojení součástek v systému, plošné spoje – materiály, konstrukce, výroba*. VŠB TU Ostrava, učební text a návody do cvičení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, FEI, KAT 450. 2012 [30.6.2013]. Dostupné z
< http://mostech.vsb.cz/source/dokumenty/4_Plosne%20spojce.pdf >.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ**



NAVRHOVÁNÍ A TECHNOLOGIE DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

POČÍTAČOVÝ NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE (DPS)

Ing. David Vala
Ing. Kristýna Friedrischková
Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D.
Ing. Bohumil Horák, ml.
Ing. Ondřej Balák

Ostrava 2013

© Ing. David Vala, Ing. Kristýna Friedrischková, Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D., Ing. Bohumil Horák, ml., Ing. Ondřej Balák

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3062-9



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

1	POČÍTAČOVÝ NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE (DPS)	3
1.1	Úvod	4
1.1.1	Schematický návrh	4
1.1.2	Návrh elektronického schématu	5
1.1.3	Definice vlastností součástek a spojů	5
1.1.4	Kontrola návrhových pravidel	5
1.1.5	Analogová a číslicová simulace	6
1.1.6	Výstupy schematického návrhu	6
1.2	Návrh desek plošných spojů (DPS)	7
1.2.1	Princip vrstev a jejich využití	7
1.2.2	Knihovny pouzder	7
1.2.3	Načtení netlistu	9
1.2.4	Obrysy DPS, výřezy a montážní otvory	11
1.2.5	Rozmístění součástek	11
1.2.6	Vedení spojů	11
1.2.7	Finální úpravy	12
1.2.8	Podklady pro formátování na výsledný rozměr	12
1.2.9	Sesazovací a náměrné značky	13
1.2.10	Popisy desky plošného spoje	14
1.2.11	Generování technologických dat	15
1.2.12	Podklady pro osazování	17
2	LITERATURA	19



1 POČÍTAČOVÝ NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE (DPS)



OBSAH KAPITOLY:

Tato kapitola popisuje tvorbu schématického návrhu a jeho pravidla.



MOTIVACE:

Po prostudování této kapitoly budete znát zákonitosti schématického návrhu.



CÍL:

Cíle je nastudování nových poznatků a zákonitosti schématického návrhu tak, aby při jeho realizaci nevznikaly nežádoucí efekty.



1.1 ÚVOD

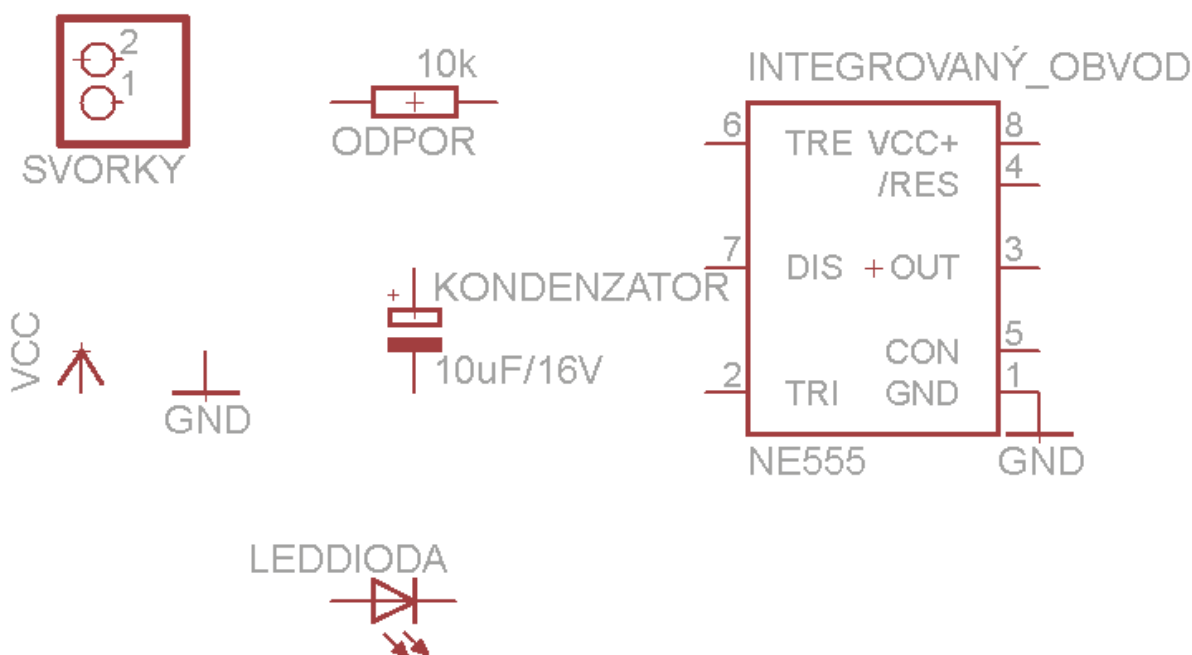
V dnešní době počítačové techniky se počítače využívají také k návrhu plošných spojů. Programy k tomu určené (Eagle, Oracle a jiné) poskytují vývojáři rychlé a snadné navržení a realizaci plošného spoje.

1.1.1 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 vyroben 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 a filtrační prvky u zdrojů atd.

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

TVORBA SCHEMATICKÝCH ZNAČEK



Obr. 1 Schematické značky a) součástek, b) symbolů

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 DPS. Symbol bude pomocná značka přímo neexistující na DPS, bez níž by ale nebylo schéma funkční, tedy například značka napájení (obr. 1b).

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 značek, ale i o obsah položek a vlastností, jako jsou vzor pořadového označení, hodnoty součástek, vsazení názvu pouzdra, případně nadefinování dalších popisů (objednacího čísla, ceny atd.).

1.1.2 NÁVRH ELEKTRONICKÉHO SCHÉMATU

Z pohledu ovládání programu spočívá návrh elektronického schématu ve vyvolávání schematických značek z knihoven, jejich umísťování na pracovní ploše monitoru a propojování jejich vývodů. Návrhové systémy umožňují hierarchický návrh a různé techniky propojování nejen pomocí vodičů. K dispozici jsou například sběrnice, návěští, napájecí symboly

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

- Konfigurace zapojení konektorů, systém sběrnicí a propojovacích kabelů.
- Systém blokování napájení pomocí kondenzátorů a filtrace vůbec.
- Ochrany vstupů a výstupů, případně jejich galvanická oddělení.
- Volba součástek s ohledem na rušivé vyzařování a odolnost.
- Impedanční přizpůsobení kritických spojů.

Za nejvíce porušovanou zásadu s velmi negativním dopadem na funkci obvodu je možné považovat podceňování významu blokování napájení aktivních součástek a integrovaných obvodů pomocí kondenzátorů.

1.1.3 DEFINICE VLASTNOSTÍ SOUČÁSTEK A SPOJŮ

Návrhové programy umožňují jednotlivým součástkám a uzlům přiřazovat různé položky (vlastnosti). 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 návrhářů schémat a jinou skupinu návrhářů desek plošných spojů. Mezi těmito skupinami musí existovat přesně definovaný způsob přenosu informací o funkci a vlastnostech jednotlivých součástek a vodičů ve schématu, aby byl návrh DPS 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 dodavatelů, upozornění na vysoké napětí, napěťová úroveň či proudové zatížení důležitých uzlů.
- Popis pro následné simulace obvodového chování. Je možné zadat například odkaz na model součástky.
- Popisy vlastností pro návrh DPS. Tyto popisy se mohou prostřednictvím netli stát promítnout do návrhu DPS. Jedná se například o název pouzdra, zařazení součástek do skupin, párování uzlů do diferenčních párů.

1.1.4 KONTROLA NÁVRHOVÝCH PRAVIDEL

Kromě výstupů pro náročné analogové nebo číslicové simulace chování obvodů 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 nadefinovány typy vývodů součástek (například vstupní, výstupní, napájecí.).

Součástí může být i kontrola integrity hierarchického návrhu. Při hierarchickém návrhu totiž neztídka dochází k formálním chybám při definici portů, 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 ANALOGOVÁ A ČÍSLICOVÁ SIMULACE

Analogovou a číslicovou simulaci můžeme přirovnat k měřicímu pracovišti, na kterém ověřujeme vlastnosti obvodu, který nás zajímá. Tento obvod si nejdříve sestavíme, připojíme k němu budící zdroje a budeme sledovat co se v něm děje. To má řadu výhod. Nemusíme stavět prototyp, a přesto máme k dispozici schéma s jednoznačnými hodnotami součástek, ošetřenými hazardy, zákmity a ochranami. Tím ušetříme značné množství času a nákladů. Další výhodou je možnost sledovat průběhy napětí a proudů i v místech, kde by nebylo měření buď vůbec možné, nebo by bylo velmi obtížné. Například v místech, kde připojení měřicí sondy výrazně ovlivní chování celého obvodu.

Simulační programy vypočítávají napětí všech uzlů a proudy vývodů všech prvků analogové části simulovaného obvodu a logické stavy uzlů v číslicové části obvodu. Standardně umožňují provádět stejnosměrnou analýzu a analýzy obvodů v kmitočtové i časové oblasti.

Velkým přínosem je používání simulačních programů při výuce. Počítačové simulace nám umožňují do hloubky si "osahat" vlastnosti různých elektronických obvodů a součástek. Program může částečně nahradit nebo spíše efektivně doplnit laboratorní cvičení.

Základní princip simulace a komunikace programů Capture a PSpice A/D je následující:

V programu Capture navrhne schéma, vytvoříme simulační profil, do vhodných uzlů umístíme měřicí sondy a spustíme vlastní výpočty. Ty se provádějí v programu PSpice A/D, který se z programu Capture otevře automaticky spuštěním výpočtů. Po ukončení výpočtů PSpice A/D zobrazí v grafickém okně požadované průběhy. Kdykoliv je možné vrátit se v Capture do schématu, přidat či ubrat některé sondy a PSpice A/D v reálném čase zobrazí odpovídající průběhy. Přidávat či ubírat průběhy a nastavovat jejich osy můžeme přímo v grafickém prostředí programu PSpice A/D.

1.1.6 VÝSTUPY SCHEMATICKEHO NÁVRHU

výstupem návrhu schématu může být tisk na tiskárně, seznam použitých součástek a dále celá řada souborů dat různých formátů, umožňujících další zpracování schématu. Těmto 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 DPS a jiný ten, který je určen jako vstupní soubor pro simulace chování obvodu. Vygenerováním netlistu ve formátu srozumitelném programu pro návrh DPS končí fáze návrhu schématu.



1.2 NÁVRH DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ (DPS)

Návrh DPS spočívá v tvorbě pouzder součástek, nastavení technologických podmínek, načtení netli stu, definici obrysů desky, rozmístění součástek, návrhu vedení spojů, finálních úpravách, kontrole návrhových pravidel a generování technologických dat. V každé fázi návrhu je třeba mít na zřeteli tři hlediska:

1. Vyrábělnost - deska musí být navržena tak, aby byla vyrábělná. Musíme určit počet vrstev DPS, respektovat třídy přesnosti a vůbec mít na zřeteli technologické možnosti výrobců a formáty výrobních technologických dat. Samozřejmě do úvah vstupují ekonomické otázky. Třídy přesnosti by měl návrhář ovládat naprosto brilantně. Jedná se o znalost minimálních šířek spojů, izolačních vzdáleností, průměrů vrtáků atd. z hlediska technologických možností. Přehled rozměrů tříd přesnosti je v tabulce 2.2.
2. Osazování a pájení - způsob osazování navrhované desky ovlivňuje požadavky na definici pouzder součástek a jejich rozmístění na desce plošného spoje. Například při osazování do pájecí pasty a následném pájení pomocí přetavení (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 spoje musí být provedeno správné rozmístění součástek, při návrhu vedení spojů musí být respektována pravidla maximálního proudového a napětového zatížení spojů, otázky přeslechů, impedancí, zpoždění při šíření signálů, způsobu zemnění, odvodu tepla, elektromagnetické kompatibility.

1.2.1 PRINCIP VRSTEV A JEJICH VYUŽITÍ

Program pro návrh DPS umožňuje pracovat v mnoha vrstvách (hladinách), určených pro různé účely (například vrstvy spojů, nepájivých masek, servisního potisku, přilepení součástek na DPS atd.). Do vrstev se potom vkládají různé typy objektů (pájecí plošky, spoje, texty, obrysy součástek, obrysy DPS ...). Následuje výčet nejčastěji používaných vrstev a jejich názvů:

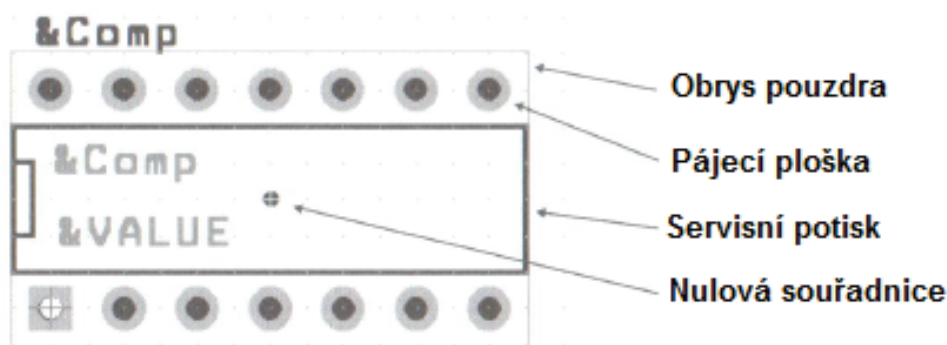
• Vedení spojů	Top, Bottom, GND, PWR, Innerl, Innerž ...
• Nepájivé masky	SolderMask_Top, SolderMask_Bottom
• Pájecí pasta	SolderPaste_Top, SolderPaste_Bottom
• Lepidlo	Glue_Top, Glue_Bottom
• Obrysy plošného spoje	Board Outline
• Obrysy součástky	PlaceBoundary_Top, PlaceBoundary_Bottom
• Servisní potisk	SilkScreen_Top, SilkScreen_Bottom
• Osazovací výkres	Assembly_Top, Assembly_Bottom
• Data pro Ne vrtačku	Drill

1.2.2 KNIHOVNY POUZDER

Před načtením netlistuje nutné zkontrolovat, popřípadě nadefinovat pouzdra pro všechny použité součástky. Kvalitní knihovny představují jedno z největších know-how každého návrháře a jsou vizitkou jeho profesionality. Je nutné dát pozor především na tato pravidla:



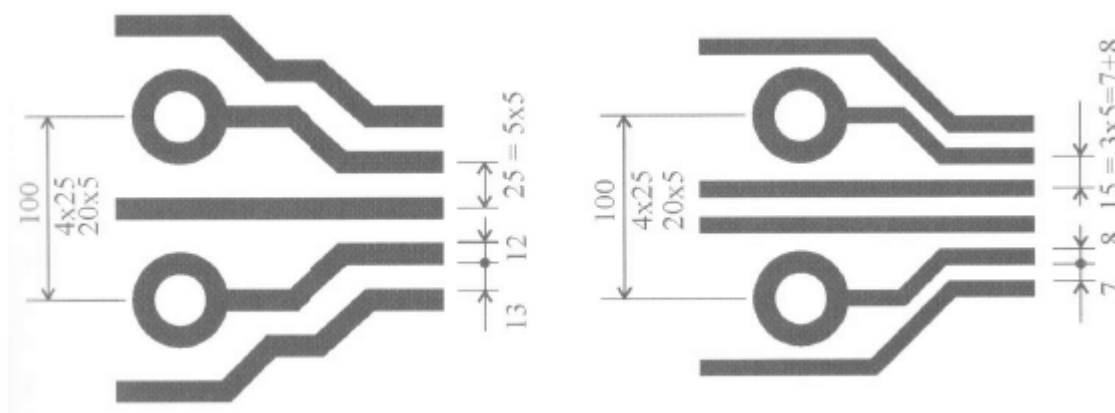
- Třídy přesnosti _ je nutné dodržovat základní parametry tříd přesnosti. Při definici pouzder připadají v úvahu především tyto položky: minimální průměr otvoru, minimální rozdíl velikosti pájecích plošek a jejich otvorů, minimální izolační vzdálenosti pájecích plošek (tabulka 2).
- Správné velikosti pájecích plošek (padstacků) - toto je klíčová položka. Na správné velikosti a tvaru padstacku závisí kvalita pájení a tedy i spolehlivost a životnost osazené desky. Jiné padstacky musíme použít pro pájení přetavením, jiné pro pájení vlnou či ruční pájení. tj kriticky malých součástek a jejich padstacků (např. BGA) je nutné jejich rozměry a tvar předem konzultovat s technologií firmy, která bude tyto součástky osazovat.
- Průměry vrtáků nebo konečných otvorů - v definicích pájecích plošek by se měly používat spíše konečné průměry otvorů.
- Správné průměry otvorů a řady používaných hodnot - otvor pájecí plošky by měl být minimálně o 0,2 až 0,4 mm větší než je průměr nožičky součástky. Zároveň je dobré ujasnit si, jaké průměry otvorů budeme ve svých knihovnách používat. Souřadnicová vrtačka má jednak omezený počet zásobníků a jednak výměna vrtáku trvá až několik desítek sekund. Použití většího počtu průměrů zpomalí a prodraží výrobu.
- Obrisy pouzdra - tím jsou míněny obrisy pouzdra za účelem správného rozmístění součástek. Parametrem obrysů může být minimální a maximální výška součástky. Obrisy 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 obrisy chladiče včetně způsobu jeho uchycení na DPS.
- Servisní potisk - jedná se o motiv, který bude vytištěn na DPS (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 přetavení je nutné definovat ve speciální vrstvě plošky pro nanášení pájecí pasty. Pájecí pasta se totiž na příslušné pájecí plošky DPS nanáší protlačením pájecí pasty přes planžety metodou síťotisku. Vstupními podklady pro výrobu planžet jsou filmy s obrázkem pájecích plošek.
- Nulová souřadnice součástky - při perspektivě strojního osazování je nutné na součástce označit referenční bod, tedy místo, které reprezentuje souřadnice součástky na DPS. Za tento bod bude součástka chycena vakuovou pipetou osazovací ruky automatu (těžiště součástky).



Obr.2 Pouzdro součástky

1.2.3 NAČTENÍ NETLISTU

Při načítání netlistu dochází k postupnému vyvolávání pouzder součástek z knihoven, umísťování na pracovní plochu a nadefinování propojení jejich pinů. Současně se přenášejí



Obr. 3 Rastr pro 4. a 5. třídu přesnosti (rozměry v milech)

- Rastr-jedná se o nastavení kvantování rozměrových jednotek pro různé typy operací při návrhu DPS. Rozlišujeme například rastr pro rozmísťování součástek, pro vedení spojů atd. Samozřejmě návrhové programy umožňují pracovat takzvaně "bezrastrově", což zpravidla šetří místo na DPS. Doporučuji ovšem tuto eventualitu ponechat jako zálohu pro řešení konkrétních jinak nevyřešitelných situací na DPS a většinu času pokud možno pracovat se zapnutým rastrem. Při jeho nastavování je nutné sledovat dva základní aspekty:
- Použitá třída přesnosti z hlediska šířky spojů a izolačních vzdáleností. Z ekonomických důvodů je žádoucí pokládat spoje s co možná největší hustotou na hranici třídy přesnosti.
- Rastr pro rozmístění součástek, respektive rastr umístění jejich pájecích plošek. Při manuálním návrhu spojů je velmi nepraktické a neefektivní, jestliže nebude rastr pro vedení spojů dělitelem rastru rozmístění pájecích plošek. V současné době se zpravidla používá rastr 5 milů (0,127 mm).

Rastr pro rozmísťování součástek tedy volíme 5 milů. Rastr pro vedení spojů musí respektovat šířku spojů a izolační vzdálenosti a zároveň se musíme "trefit" do rastru pájecích plošek součástek. Například ve 4. třídě přesnosti je minimální šířka spojů i izolační vzdálenost 12 milů, Při rastru pájecích plošek 5 milů tedy použijeme rastr pro vedení spojů 5 milů. V 5. třídě přesnosti je minimální šířka spojů a izolační vzdálenost X milů, vhodný rastr



pro vedení spoj II by byl tedy $8 \frac{1}{3}$ t. Pokud program neumí pracovat se zlomky, je možné pro 5. třídu přesnosti nastavit rastr 5 milů s tím, že izolační vzdálenost snížíme z 8 na 7 milů (obr. 4). V 6. třídě přesnosti volíme zpravidla rastr 1 mil respektive pracujeme bezrastrově.

- **Vrstvy** - jedná se především o určení počtu elektrických vrstev a určení jejich významu. Rozlišujeme vrstvy pro **vedení signálových spojů** (*Routing Layer*) a vrstvy s rozlévanou mědí jako napájecí a zemní **plochy** (*Plane Layer*).
- **Izolační vzdálenosti** - u uzlů, kterým nebyla nastavena izolační vzdálenost již ve schématu, je tuto nutné stanovit nyní. Přitom se musejí respektovat jak minimální vzdálenosti vyplývající z použité třídy přesnosti, tak i vzdálenosti vyplývající z elektrické pevnosti.
- **Šířka spojů** - nastavení šířek spojů je opět možné již ve schématu, nicméně zpravidla se tak činí pouze u kritických spojů a u ostatních běžných spojů se šířka nastavuje právě v rámci vlastního návrhu DPS. Přitom je nutné respektovat hledisko použité třídy přesnosti a zároveň podmínky maximální povolené proudové hustoty.
- **Další nastavení uzlů** - uzlům můžeme přiřadit některé další vlastnosti, jako například barvu spojových vektorů neboli takzvaných "gumiček" (= grafické znázornění budoucích spojů - "odkud a kam"), metody vedení spojů (90° , 45° , libovolný úhel, oblé spoje), použité pro kovy, pravidla pro autorouter atd.
- **Prokovy** - jsou to vodivé průchody z jedné spojové vrstvy do druhé. Je nutné nastavit jejich parametry v souladu s použitou třídou přesnosti, jmenovitě průměr průchozího otvoru a velikost plošky.
- **Termální plošky** - pájecí plošky, které mají být připojeny k měděné ploše (rozlité zóně), se připojují pomocí takzvaných termálních plošek, které zabraňují nadměrnému odvodu tepla při pájení. U termálních plošek se definuje šířka a délka jejich paprsků (obr. 4). Šířka by měla korespondovat s minimální šířkou spoje a délka s izolační vzdáleností dle použité třídy přesnosti (tabulka 2).



Obr. 4 Definice termální plošky

1.2.4 OBRYSY DPS, VÝŘEZY A MONTÁŽNÍ OTVORY

Před rozmísťováním součástek je nutné obecně řečeno vymezit plochu, na které se smí vyskytovat součástky a spoje, to znamená stanovit obrysy DPS, výřezy, případně do plošného spoje umístit montážní otvory. Takto definovaný obrys ještě neznámá, že bude použit jako údaj pro výrobce pro oříznutí finálního výrobku. Při finálních úpravách je samozřejmě možné vytvořit speciální ořezové značky dle požadavků 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 hlavičku šroubku, podložku či maticku. Je-li deska určena k zasunutí do drážek, musíme při rozmísťování součástek zohlednit i hloubku těchto drážek.

Výhodou počítačového návrhu DPS v této fázi je, že je možné naimportovat obrys DPS a související mechanický výkres ve formátu DXF z mechanického CAD u (SolidWorks, SolidEdge, okrajově též ještě AutoCAD), ve kterém bývá zpravidla připravován mechanický návrh koncového výrobku. Stejně tak je možné hotový návrh DPS vyexportovat z PCS Editoru do 3D formátu a ten zpětně načíst do mechanického CADu pro kontrolu umístění klíčových součástek (konektory, tlačítka, LED).

1.2.5 ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK

Rozmístění součástek je třeba věnovat zásadní pozornost. Nejdříve je třeba udělat rozvahu o rozmístění jednotlivých skupin obvodu (analogová, digitální část, zdroj) včetně rozložení konektorů, a teprve potom můžeme přistoupit k vlastnímu rozmísťování. Přitom je nutné dodržovat pravidla a zásady, popsané v kapitole NÁVRHOVÁ PRAVIDLA a VLASTNOSTI PLOŠNÝCH SPOJŮ. Zároveň je nutné zohlednit způsob osazování a pájení navrhované desky. Některá další pravidla vyplynou z kapitoly POVRCHOVÁ MONTÁŽ. Mezi formální, ale důležité zásady patří mimo jiné požadavek, aby po osazení desky byl vidět servisní potisk součástek, což znamená, že mezi součástkami musí být dostatečná vzdálenost pro umístění jejich popisů. Dokonce jsem zažil jeden požadavek (vcelku logický), předělat rozmístění součástek tak, aby na desce vznikl dostatečný prostor pro logo firmy a samolepicí štítek s výrobním číslem.

Obecně je možné říci, že na kvalitě a způsobu rozmístění součástek závisí správná funkce "uvrhovaného obvodu. Při návrhu složitých desek se rozmísťování součástek zpravidla věnuje podstatně více času a pozornosti než návrhu vedení spojů. Správné rozmístění součástek totiž usnadňuje návrh spojů.

1.2.6 VEDENÍ SPOJŮ

Teprve po "dokonalém" rozmístění součástek je možné přistoupit k návrhu vedení spojů. Těžko říci, zda existují nějaké obecné rady a tipy, jak správně postupovat. Do návrhu spojů vstupuje příliš mnoho faktorů, které způsobují, že výsledný návrh je jedinečný. Co obvod, to jiná konfigurace problémů, které mohou mít vliv na jeho správnou funkci. Při návrhu spojů je třeba dodržovat určité zásady. Uvedme si tedy výčet nejdůležitějších zásad, které je nutno dodržovat:

- Rozložení spojů v jednotlivých vrstvách - u vícevrstevných desek plošných spojů jsou vrstvy sousedící s rozlitou mědí vhodnější pro návrh kritických spojů.



- Napájení a zemnění - často porušovanými principy jsou nevhodné způsoby návrhu spojů usměrňovačů, blokovacích kondenzátorů, spínaných zdrojů a rozvod napájení a zemí vůbec.
- Délka vodičů a jejich vzájemná vzdálenost - s délkou spojů 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 měď - "nalití" mědi na místa, kde nevedou spoje a její připojení ke společnému vodiči (zpravidla zemi) snižuje impedanci, vliv přeslechů, vyzařování.
- Maximální hustota spojů - návrhář je samozřejmě tlačěn k dosažení co nejnižších nákladů na výrobu DPS.

Tak bychom mohli pokračovat dále. Z uvedeného výčtu je zřejmé, že návrh DPS je velmi náročná inženýrská práce a například využití autorouterů pro správný návrh DPS je přinejmenším diskutabilní. Nechci říci, že vyloučené. Jen to, že jeho používání nezabaví návrháře nutnosti znát výše uvedené zásady. Autorouter je nutné před jeho použitím správně nastavit a výslednou desku potom zkontrolovat a upravit všechny prohřešky proti zásadám správného vedení spojů.

1.2.7 FINÁLNÍ ÚPRAVY

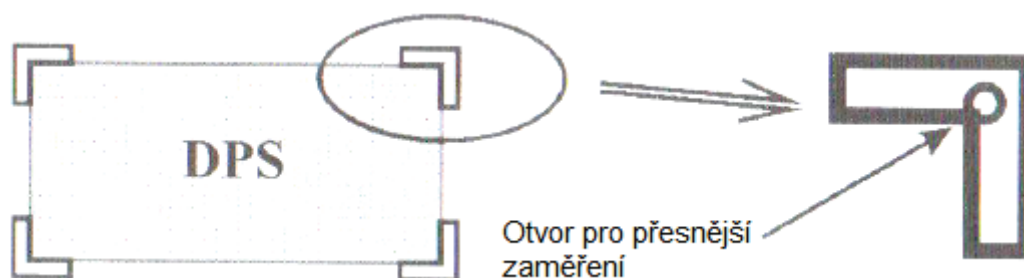
Propojením posledního spoje návrh nekončí. Nastává fáze přípravy pro generování výrobních podkladů, tedy takzvané finální úpravy. Mezi finální úpravy tedy patří například příprava ořezových značek nebo dat pro frézování či drážkování, umístění sesazovacích a zaměřovacích značek, kótování, popisy desky plošného spoje, ošetření zlacených konektorů. Obsah finálních úprav závisí plně na způsobu výroby DPS 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 PODKLADY PRO FORMÁTOVÁNÍ NA VÝSLEDNÝ ROZMĚR

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

- Ostříh na padacích nůžkách - většinou postačí prosté orámování DPS, při vyšších požadavcích na přesnost je dobré v rozích desky umístit ostříhové značky, případně i vrtací otvory, které přispějí k přesnějšímu polohování DPS na nůžkách.



Obr. 5 Příklad ostříhových značek



- Frézování - při malých nárocích na přesnost je možné DPS frézovat podle prostého orámování. Optimální ovšem je dodat výrobcí obrysy ve speciální vrstvě jako samostatný datový soubor v dohodnutém formátu. Z těchto dat je možné vygenerovat data pro CNC frézování. V případě, že deska má z důvodů snadné manipulace při osazování zůstat spojená s technologickým rámem pomocí můstků, je vhodné označit vně obrysu umístění těchto můstků. Umístění můstků je vhodné konzultovat s technologem firmy, která bude desku osazovat, způsob označení můstků zase zkonzultujeme s technologem výrobce DPS.
- Drážkování - platí stejná pravidla jako pro frézování.

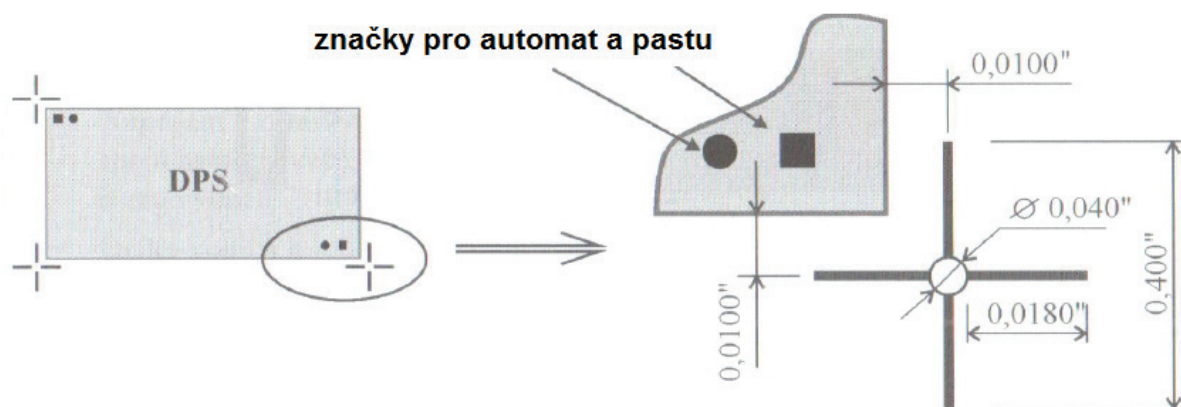
V případě požadavku velmi přesného oříznutí nebo frézování je nutné určit, zda má být tato operace provedena na střed, vnější okraj nebo vnitřní okraj obrysové čáry nebo ostříhové značky. Při frézování je vhodné dodat navíc okótovaný výkres obrysů i všech výřezů včetně tolerancí rozměrů.

1.2.9 SESAZOVACÍ A NÁMĚRNÉ 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 tedy být ve vrstvách Top, Bottom, SolderMask_Top, SolderMask_Bottom, SilkScreen_Top a SilkScreen_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 výrobcí dodávat sami přímo filmy, je nutné tyto značky navrhnout, a budeme-li výrobcí dodávat data v elektronické podobě, udělá si je výrobce většinou sám.

Pro výrobu jednoduchých a malých desek postačí 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 čarou. Takovou značku je možné vytvořit jako pouzdro součástky do knihovny. Sesazovací značky se zpravidla umísťují vně plošného spoje ve třech rozích desky tak, aby navzájem tvořily pravý úhel. Šířka čáry kříže by měla být 8 až 12 milů.



Obr. 6 Příklad sesazovacích značek a jejich umístění.

Při návrhu vícevrstvých spojů (4 a více) musí být filmy s motivy jednotlivých vrstev mědi navíc opatřeny speciálními značkami pro správné sesazení dílčích plátů v laminátoru a pro

ZLACENÉ KONEKTORY

Nanášeli-li se na měděné plošky galvanicky nikl a zlato, je nutné všechny plošky, které se mají poniklovat a pozlatit, vzájemně vodivě propojit a toto propojení vyvést k protějšímu okraji desky plošného spoje. Propojení se provádí vně obrysů DPS a závěrečným oříznutím desky se potom jejich zkratování odstraní (obr. 8).



Obr. 8 Propojení plošek zlaceného konektoru

KONTROLA NÁVRHOVÝCH PRAVIDEL

Po dokončení návrhu, finálních úpravách a před generováním technologických dat pro výrobu a osazování je vhodné provést kontrolu návrhových pravidel DPS. Spočívá v ověření dodržení předem nastavených podmínek, především izolačních vzdáleností spojů, prokovů II pájecích plošek, šířky spojů. Je možné kontrolovat též pravidla rozmístění součástek. Výčet možností kontroly závislosti na použitém návrhovém programu.

1.2.11 GENEROVÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH DAT

Technologická data jsou podklady pro výrobu DPS, 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 předlohy (klišé) v určité kvalitě:

- Papír, fólie - postačí pro amatérskou výrobu jednostranných vzorků (rozměrová nestálost nosného materiálu).
- Filmy z osvitky - vhodné pro amatérskou výrobu jednostranných a dvoustranných DPS (pozor na rozměrovou chybu - nestálost filmu zhruba 0,1 %).
- Filmy z fotoplotru - rozměrově stálá čirá podložka s motivem, který má velmi dobré krytí. *Určeno pro profesionální výrobu DPS.* Upozorňuji, že v profesionální výrobě DPS nesmí filmy opustit klimatizované prostředí výroby, jelikož by díky změnám teploty a vlhkosti mohlo dojít k nevratným rozměrovým změnám. Uvědomme si, že už ve třídě přesnosti 5 je pro destičku o rozměru 10 x 10 cm nutná rozměrová stálost filmu lepší než 0,05%!

1. Podklady pro výrobu vícevrstevných DPS

Pro výrobu čtyřvrstvého plošného spoje s nepájivou maskou a servisním potiskem je nutné vygenerovat následující data.



- Motivy jednotlivých vrstev vodivých spojů _ strana součástek (Top), strana spojů (Bot) a obě vnitřní vrstvy.
- Motivy pro nepájkivé masky ze strany součástek a strany spojů (SolderMask_Top a SolderMask_Bottom).
- Předlohy pro servisní potisk ze strany součástek a strany spojů (SilkScreen _ Top a SilkScreen _ Bottom).
- Data pro frézování.
- Data pro souřadnicové vrtání.

Vrstvy motivů spojů, nepájkivých 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. Z těchto dat se na fotoplotru vykreslí filmové matrice.

Filmy musí být vyrobeny tak, aby byl motiv v přímém kontaktu s fotocitlivým rezistem na DPS. V případě kusové výroby (zhruba do 10 kusů) se filmy používají přímo a proto musí mít motiv zdola. Pro sériovou výrobu je nutné nejdříve vyrobít předlohy, ze kterých se potom fotocestou vyrobí pracovní masky. V takovém případě se předlohy 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 textů ve spodních vrstvách (vodivé spoje, nepájkivá maska a servisní potisk ze strany spojů).

Základním pravidlem u motivů vodivých spojů pro výrobu DPS semiaditivní metodou je, že pájecí plošky musí být vygenerovány bez vrtacích otvorů, tedy zaslepené.

Data pro souřadnicové 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-V souřadnice vrtání. Příklad souboru je v tabulce 1. Výčet použitých nástrojů by neměl obsahovat příliš mnoho průměrů, protože výměna vrtáku trvá značně dlouho (cca sekun). Bude-li použito více vrtáků, než je počet zásobníků souřadnicové vrtačky, bude nutné v průběhu vrtání zaměnit některé vrtáky v zásobníku, což samozřejmě prodraží výrobu.

Nemělo by se tedy stát, že v definici otvorů (tabulka 1.) budou existovat nástroje s rozdílem průměrů menším, než je škála průměrů vrtáků (0,1 až 0,05 mm). Velmi důležité je potom výrobci v objednávce sdělit, zda jsou v seznamu průměrů uvedeny průměry vrtáků nebo konečné průměry otvorů!!! Vhodnější je zadávat koncové průměry otvorů a nechat na výrobci, kolik si musí připočítat na jejich průměru vzhledem k technologii výroby, kterou používá.

Příklad datových souborů Extended Gerber 3.4 a Excellon 3.4 (v palcích) Excellon 3.4



Extended Gerber 3.4	Excellon 3.4
<pre>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*</pre>	<pre>INCH,TZ T1C0.0300 T2C0.0310 T3C0.0400 T4C0.0450 T5C0.1400 % G05 T1 X0222000Y0131000 X0222000Y0152500 X0124000Y0176600 X0135000Y0192500 T2 X0182000Y0145000 X0212000Y0155000 X0212000Y0145000 T3 X0089000Y0103500 X0258000Y0266000 X0089000Y0103500 T4 X0152500Y0176000 X0152500Y0186000 X0152500Y0196000 T5 X0182000Y0120000 X0222000Y0120000 X0124500Y0176600 X0135500Y0192500 T0 M30</pre>
Definice clonek Vykreslování motivu	Definice otvorů X-Y souřadnice vrtání

Tab. 1 Ukázka dat ve formátu *Extended Gerber 3.4*

1.2.12 PODKLADY PRO OSAZOVÁNÍ

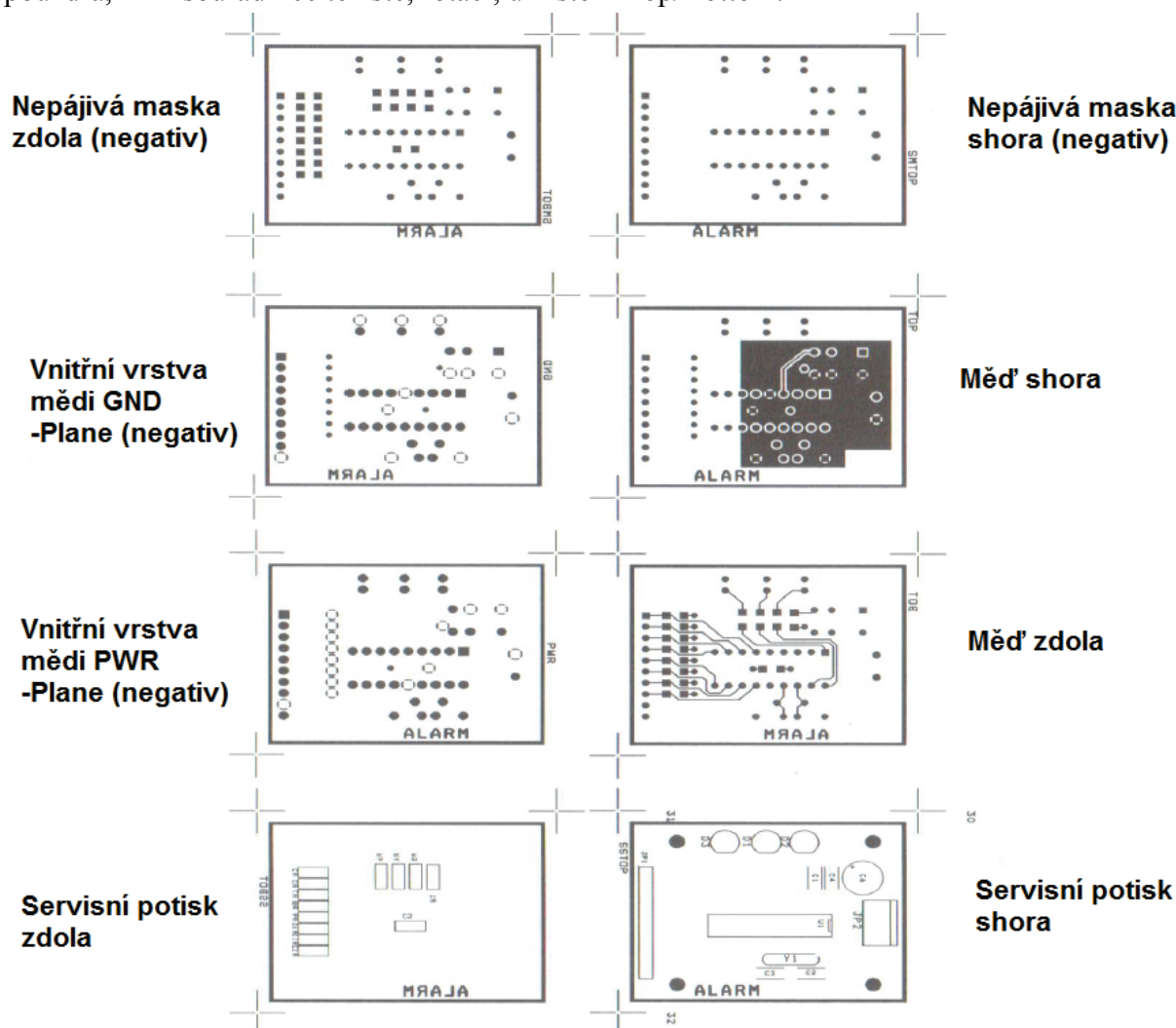
Pro osazování součástek na DPS je nutné připravit náležitou dokumentaci, případně vygenerovat datové soubory v určitém formátu. Při ručním osazování postačí připravit a vytisknout schéma, osazovací výkres, případně vygenerovat seznam použitých součástek (Bi/l of Materials). Data pro osazovací výkres jsou v OrCADu definována v samostatných vrstvách Assembly_Top a Assembly_Bottom. Obsahují obrysy a popisy součástek, případně jejich pájecí plošky pro snadnější orientaci.

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

- Osazování do pájecí pasty s následným přetavením - při pájení pomocí přetavení (reflow) je nutné na pájecí plošky před osazováním součástek nanést pájecí pastu. Tato se nanáší zpravidla síťotiskem. Proto je nutné vygenerovat data, na kterých budou obrazce pájecích plošek (formát Gerber). Z nich se potom laserem vyřežou kovové planžety pro síťotisk. Data pro tyto motivy jsou ve vrstvách PasteMask Top a PasteMask Bottom.
- Osazování do lepidla a pájení na vlně - při pájení na vlně musí být součástky na DPS předem přilepeny. Lepidlo se nanáší buď metodou síťotisku, nebo dispenzerem (dávkovacem). Pro síťotisk je nutné vygenerovat data pro filmy. Pro souřadnicové dávkování je třeba 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 DPS. 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 DPS a tato dále upravit do vhodného formátu. Obecně musí taková data obsahovat následující údaje: Reference, typ pouzdra, X-Y souřadnice těžiště, rotaci, umístění Top/Bottom.



Obr. 9 Příklad motivů, potřebných pro výrobu čtyřvrstvé DPS s nepájivou maskou a servisním potiskem. Generování motivů vnitřních vrstev negativně není podmínkou.

2 LITERATURA

doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D. a kolektiv. *ZÁKLADY KONSTRUKČNÍCH TECHNOLOGIÍ V ELEKTRONICE - Výroba DPS v laboratořích VŠB TU Ostrava*, učební text a návody do cvičení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, FEI, KAT 450. 2012 [30.6.2013]. Interní document.

Vít Záhlava. *Návrh a konstrukce DPS, Principy a pravidla praktického návrhu*. Nakladatelství BEN – technická literatura, Praha 2010 [29.6.2013]. ISBN 978-80-7300-266-4

Kristýna Friedrischková. *Příprava výukových textů v projektu MOST-TECH, Technologie propojení součástek v systému, plošné spoje – materiály, konstrukce, výroba*. VŠB TU Ostrava, učební text a návody do cvičení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, FEI, KAT 450. 2012 [30.6.2013]. Dostupné z

< http://mostech.vsb.cz/source/dokumenty/4_Plosne%20spojce.pdf >.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ



NAVRHOVÁNÍ A TECHNOLOGIE DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

VLASTNOSTI PLOŠNÝCH SPOJŮ

Ing. David Vala
Ing. Kristýna Friedrischková
Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D.
Ing. Bohumil Horák, ml.
Ing. Ondřej Balák

Ostrava 2013

© Ing. David Vala, Ing. Kristýna Friedrischková, Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D., Ing. Bohumil Horák, ml., Ing. Ondřej Balák

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3062-9



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

1	VLASTNOSTI PLOŠNÝCH SPOJŮ	3
1.1	Úvod	4
1.1.1	Odpor.....	4
1.1.2	Skin efekt.....	4
1.1.3	Kapacita	5
1.1.4	Indukčnost.....	7
1.1.5	Impedance	8
1.1.6	Rychlost šíření signálu	9
1.1.7	Vliv kapacitní zátěže.....	10
1.1.8	Přeslechy.....	10
1.1.9	Kapacitní vazba	11
1.1.10	Induktivní vazba	11
1.2	Zatížení vodičů na DPS	12
1.2.1	Proudové zatížení.....	13
1.2.2	Napět'ové zatížení	14
2	LITERATURA	17



1 VLASTNOSTI PLOŠNÝCH SPOJŮ



OBSAH KAPITOLY:

Obsahem této krátké kapitoly je seznámení čtenáře s vlastnostmi plošného spoje jeho odporem, skin efektem, kapacitou, Indukčností, Impedancí a jinými důležitými parametry. Dále je zde uvedena zatížitelnost vodičů a to jak proudově tak napěťově.



MOTIVACE:

Aby bylo možné navrhnout kvalitní plošný spoj je třeba zvolit vhodný materiál. Po nastudování tohoto textu by měl být každý schopen si vypočítat vlastnosti plošného spoje.



CÍL:

Cílem je prohloubit si informace o problematice návrhu plošných spojů.

1.1 ÚVOD

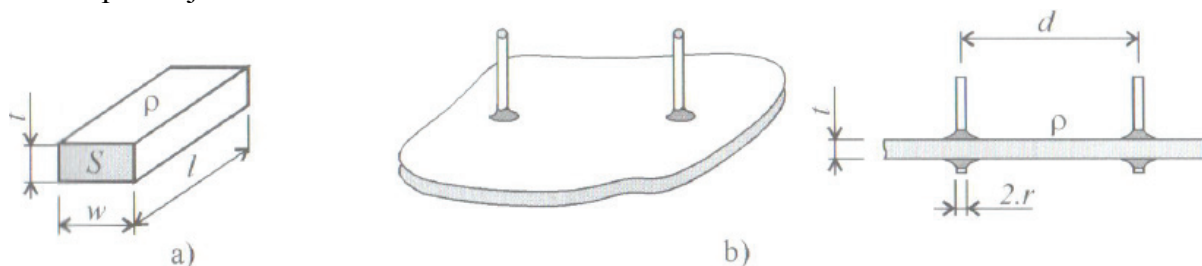
Ke správnému návrhu layoutu je třeba znát některé důležité vlastnosti plošných spojů. Jedná se především o odpor, kapacitu, indukčnost a impedanci různých geometrických konfigurací vodičů a plošných spojů. Znalosti těchto vlastností jsou vstupní podmínkou pro úvahy o některých parazitních jevech na deskách plošných spojů u jejich eliminaci při návrhu (zpoždění průchodu signálu, odrazy na vedení, přeslechy).

1.1.1 ODPOR

Pro odpor vodiče platí základní vztah:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{l}{t \cdot w} [\Omega]$$

kde ρ je měrný elektrický odpor [$\Omega \cdot m$], l je délka vodiče [m] a S jeho průřez [m^2]. Symboly t a w odpovídají kótování z obr. 1 a.



Obr. 1 Znázornění odporu a) vodiče, b) vodivé plochy

Odpor vodivé plochy mezi dvěma vodiči o průměru $2 \cdot r$ [m] vzdálených od sebe d [m] je potom (obr. 1b):

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot t} \cdot \ln\left(\frac{d}{r}\right) [\Omega]$$

Měrný elektrický odpor ρ je pro měď $\rho_{Cu} = 17,8 \cdot 10^{-9} \Omega m$, pro cín $\rho_{Sn} = 170 \cdot 10^{-9} \Omega m$, atd...

POZOR - vypočtený odpor vodivé dráhy odpovídá měděnému spoji zakrytému nepájkivou maskou. Je třeba si uvědomit, že budou-li spoje povrchově upraveny pocínováním, vznikne na zhruba 50 průřezu spoje slitina Cu-Sn, která bude mít vysoký měrný odpor. Odpor vodivé dráhy pocínovaného spoje bude dvojnásobný oproti odporu měděného spoje pokrytého pouze nepájkivou maskou!!!

1.1.2 SKIN EFEKT

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

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f}} = K \cdot \sqrt{\frac{1}{f}} [m]$$

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



Vztah je tedy pro páskový vodič při vysokých kmitočtech a pro hodnoty $2\delta \leq t$ nutné korigovat na:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{\delta \cdot 2(\omega + t)} \quad [\Omega]$$

Pro odpor vodivé plochy můžeme při vysokých kmitočtech použít zjednodušený vztah

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

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

Opět připomínám, že výsledný odpor může být zdvojnásoben pocínováním povrchu mědi.

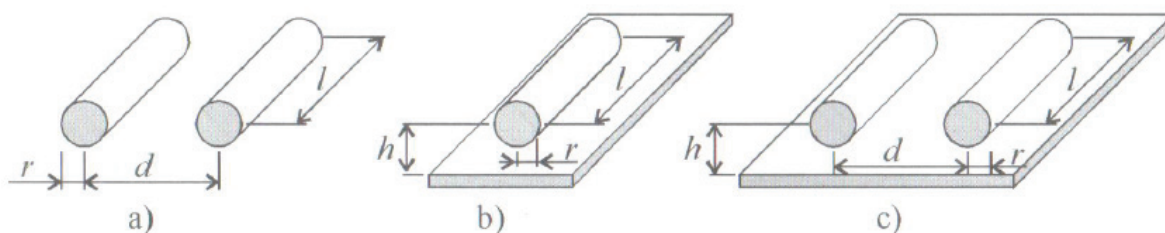
1.1.3 KAPACITA

Kapacitu dvou deskových elektrod můžeme vypočítat ze vztahu:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{h} \quad [F]$$

kde ε_0 je permitivita vakua ($8,8 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$), ε_r je relativní permitivita (pro nosné jádro plošných spojů typu FR4 je $\varepsilon_r = 4,7$), S je plocha desek [m^2] a h jejich vzdálenost [m].

Velmi důležité je znát kapacitu různých geometrických konfigurací vodičů, plošných spojů a vodivých ploch (obr. 2, 3 a 4).



Obr. 2 Kapacita vodičů kruhového průřezu

Mezi dvěma vodiči kruhového průřezu (obr. 2a) je kapacita:

$$\frac{C}{l} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)} \quad [F/m]$$

Uvedený vztah platí pro $r \ll d$.

Vodič kruhového průřezu nad vodivou plochou (obr. 2b) má při $r \ll h$ kapacitu:

$$\frac{C}{l} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{\ln\left(\frac{2 \cdot h}{r}\right)} \quad [F/m]$$

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

$$\frac{C}{l} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{2 \cdot h}{d}\right)^2\right]}{\left[\ln\left(\frac{2 \cdot h}{r}\right)\right]^2} \quad [F/m]$$

Dva plošné vodiče nad sebou (obr. 3a) mají vztah pro kapacitu:

$$\frac{C}{l} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot K_{C1} \cdot \frac{w}{h} \quad [F/m]$$

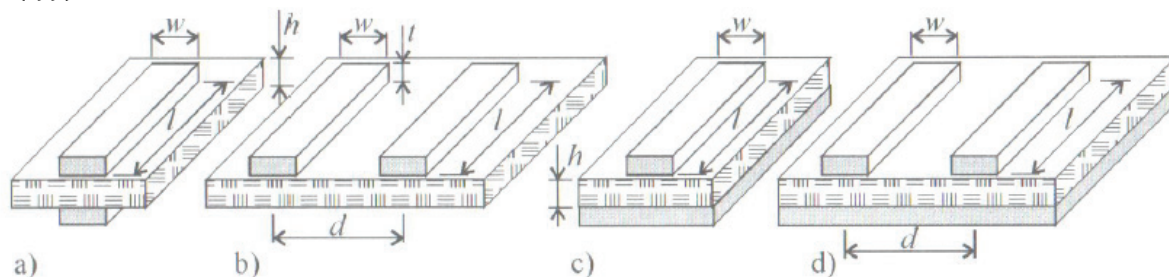


Koeficient K_{C1} zohledňuje vliv nehomogenity elektrického pole na okrajích plošných spojů. $K_{C1} \approx 1 + h/2 \cdot w$ a pro $\frac{h}{w} \ll 1$ je $K_{C1} = 1$. Pro nosný materiál FR4 je $\epsilon_r = 4,7$.

Dva plošné vodiče vedle sebe (obr. 3b) mají kapacitu:

$$\frac{C}{l} = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r(\text{eff})}{\ln\left(\frac{2\pi \cdot (d-w)}{rw+t} + 1\right)} [F/m]$$

Jelikož se plošné vodiče nacházejí na rozhraní dvou prostředí s odlišnou permitivitou ϵ_r (vzduch $\epsilon_r = 1$ a laminátu $\epsilon_r = 4,7$), je ve vztahu použita takzvaná efektivní permitivita $\epsilon_r(\text{eff}) \approx (\epsilon_r + 1)$.



Obr. 3 Kapacita plošných vodičů

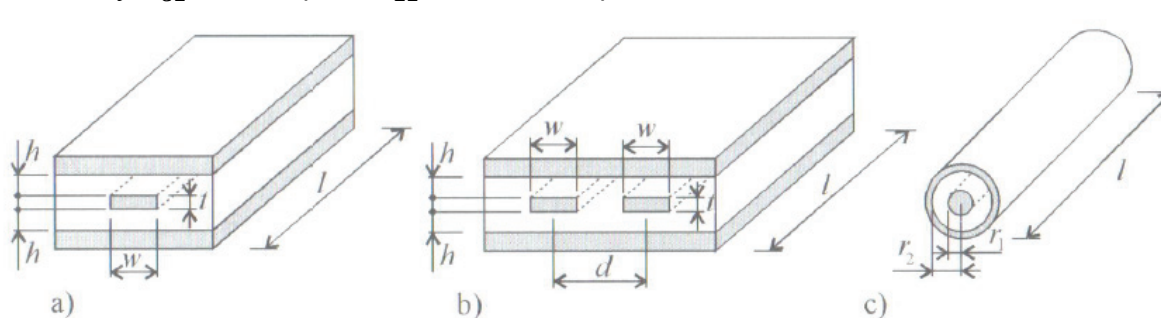
Plošný vodič nad vodivou plochou (obr. 3c) má vztah pro kapacitu odvozený opět ze základní rovnice. Koeficient K_{C2} , zohledňující vliv nehomogenity elektrického pole na okrajích plošného spoje $K_{C2} \approx 1 + h/w$ a pro $h/w \ll 1$ je $K_{C2} \approx 1$.

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

Dva plošné vodiče nad vodivou plochou (obr. 3d) mají vzájemnou kapacitu:

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

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



Obr. 4 Kapacita plošných vodičů ve vnitřních vrstvách a kapacita koaxiálního kabelu

Plošný vodič mezi dvěma vodivými plochami - spoj ve vnitřní vrstvě vícevrstvé desky (obr. 4a) má kapacitu:

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

kde $K_{C2} \approx 1 + h/w$ Ze vztahuje vidět, že kapacita bude dvojnásobkem kapacity konfigurace I obrázku 3c).

Dva plošné vodiče mezi dvěma vodivými plochami (obr. 4b) mají vzájemnou kapacitu ($K_{C2} \approx 1 + d/w$):



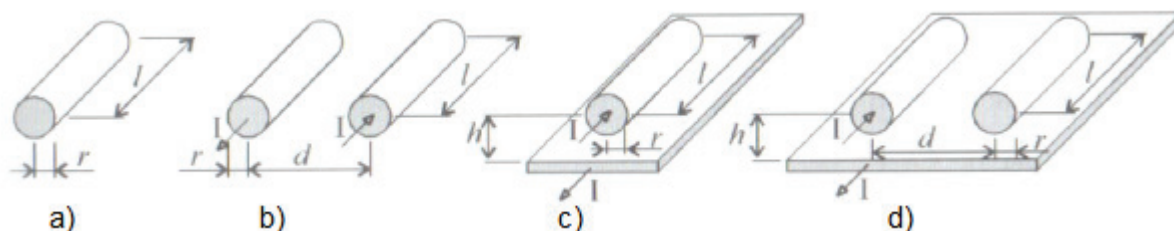
$$\frac{C_m}{l} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{\pi} \cdot (K_{C2})^2 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^2 \quad [F/m]$$

Kapacita koaxiálního kabelu (obr. 4 c) je:

$$\frac{C}{l} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad [F/m]$$

1.1.4 INDUKČNOST

V následující části budou uvedeny vztahy pro indukčnosti různých geometrických konfigurací vodičů, plošných spojů a vodivých ploch (obr. 5, 6 a 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 měď je $\mu_r=1$).



Obr. 5 Indukčnost vodičů kruhového průřezu

Indukčnost přímého vodiče kruhového průřezu (obr. 5a) je:

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

Proudová smyčka dvou vodičů kruhového průřezu z obr. 5b, tvořících dvouvodičové vedení, má indukčnost:

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

Dva vodiče kruhového průřezu z obr. 5b, netvořících dvouvodičové vedení (při $r \ll d$), má vzájemnou indukčnost:

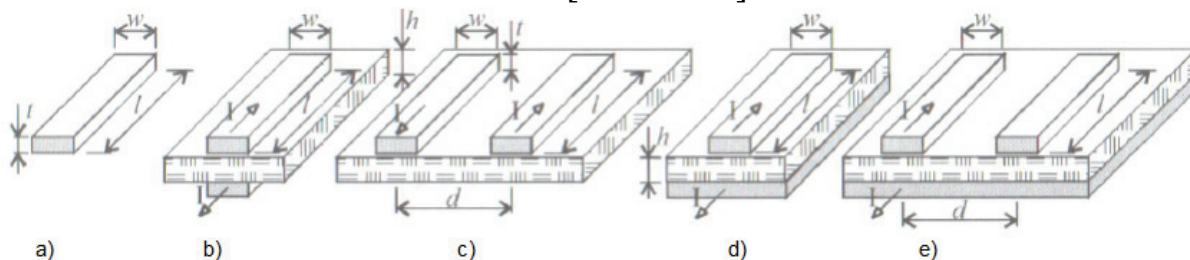
$$L_m = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot l}{r}\right) - 1 + \frac{d}{l} \right] \quad [H]$$

Vodič kruhového průřezu nad vodivou plochou (obr. 5c) má indukčnost:

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

Dva vodiče nad vodivou plochou (obr. 5d) mají vzájemnou indukčnost ($r \ll d$):

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



Obr. 6 Indukčnost plošných vodičů

Indukčnost přímého plošného vodiče (obr. 6a) je:



$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot \pi} \cdot l \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{t + w} \right) + 0,5 + 0,22235 \cdot \frac{t + w}{l} \right] [H]$$

Dva plošné vodiče nad sebou dle obr. 6b) mají indukčnost:

$$\frac{L}{l} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{K_{L1}} \cdot \left(\frac{h}{w} \right) [H/m]$$

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

Dva plošné vodiče vedle sebe (obr. 6c) mají indukčnost:

$$\frac{L}{l} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{\pi(d - w)}{w + t} + 1 \right) [H/m]$$

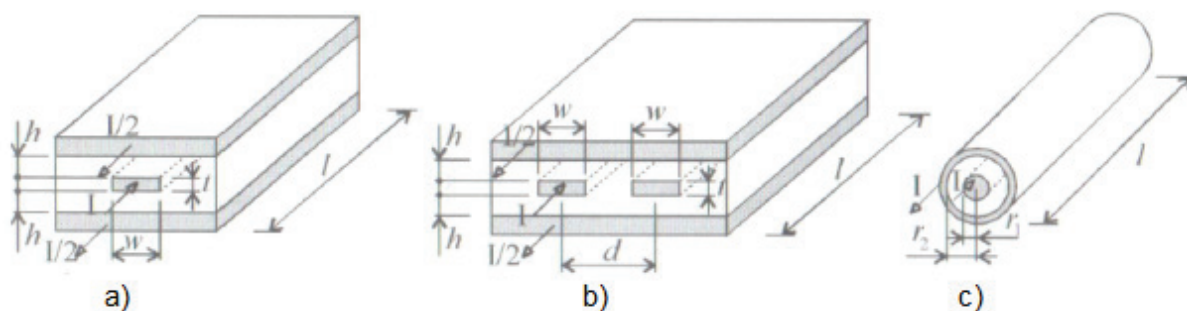
Indukčnost plošného vodiče nad vodivou plochou (obr. 6d) je:

$$\frac{L}{l} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{K_{L2}} \cdot \left(\frac{h}{w} \right) [H/m]$$

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

Vzájemná indukčnost dvou vodičů nad vodivou plochou (obr. 6e) je:

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



Obr. 7 Indukčnost vodičů ve vnitřních vrstvách a indukčnost koaxiálního kabelu

Plošný vodič mezi dvěma vodivými plochami - spoj ve vnitřní vrstvě vícevrstvé desky (obr. 7a) má indukčnost:

$$\frac{L}{l} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot K_{L2}} \cdot \left(\frac{h}{w} \right) [H/m]$$

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

Dva plošné vodiče mezi dvěma vodivými plochami (obr. 7b) mají vzájemnou indukčnost:

$$\frac{L_m}{l} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{4 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{h}{d} \right)^2 [H/m]$$

Indukčnost koaxiálního kabelu (obr. 7c) je:

$$\frac{L}{l} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{r_2}{r_1} \right) [H/m]$$

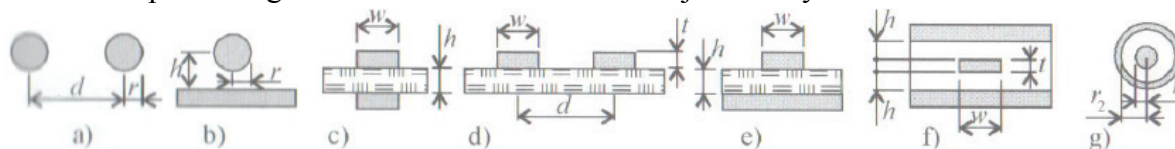
1.1.5 IMPEDANCE

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

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L/l}{C/l}} [\Omega]$$



kde za L/l a C/l je možno dosadit vztahy z předchozích kapitol. Po matematických úpravách dostaneme pro konfigurace vodičů dle obr. 8 následující vztahy.



Obr. 8 Impedance

Impedance dvou vodičů kruhového průřezu (obr. 8a) je při $r \ll d$:

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

Vodič kruhového průřezu nad vodivou plochou (obr. 8b) má impedanci:

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

Vztah platí při $r \ll h$.

Dva plošné vodiče nad sebou (obr. 8c) mají impedanci:

$$Z_0 = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{K_{L1} + K_{C1}} \sqrt{\epsilon_r}} \cdot \left(\frac{h}{w}\right) \quad [\Omega]$$

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

Dva plošné vodiče vedle sebe (obr. 8d) mají impedanci:

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

kde efektivní permitivita $\epsilon_{r(eff)} \approx (\epsilon_r + 1)/2$.

Plošný vodič nad vodivou plochou (obr. 8e) má impedanci

$$Z_0 = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{K_{L2} + K_{C2}} \sqrt{\epsilon_r}} \cdot \left(\frac{h}{w}\right) \quad [\Omega]$$

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

Plošný vodič mezi dvěma vodivými plochami (obr. 8f) má impedanci:

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

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

Impedance koaxiálního kabelu z obr. 8g je:

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

1.1.6 RYCHLOST ŠÍŘENÍ SIGNÁLU

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

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} \quad [\text{m/s}]$$

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

Rychlost šíření signálu na DPS určíme ze vztahu:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{L/l}{C/l}}} \quad [\text{m/s}]$$



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

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

kde za L/l a C/l je možno dosadit vztahy z předchozích kapitol. Po matematických úpravách dostaneme dle obr. 8 následující zpoždění pro různé konfigurace vodičů:

Konfigurace z obr. 8 a, b, f, g:

$$t_{pd} = \sqrt{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} = \frac{1}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon_r} = 3,33 \cdot 10^{-9} \cdot \varepsilon_r \quad [\text{s/m}]$$

Dva plošné vodiče nad sebou (obr. 8c):

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

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

Dva plošné vodiče vedle sebe (obr. 8d):

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

kde efektivní permitivita $\varepsilon_{r(eff)} \approx (\varepsilon_r + 1)/2$.

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

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

1.1.7 VLIV KAPACITNÍ ZÁTĚŽE

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

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

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

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

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

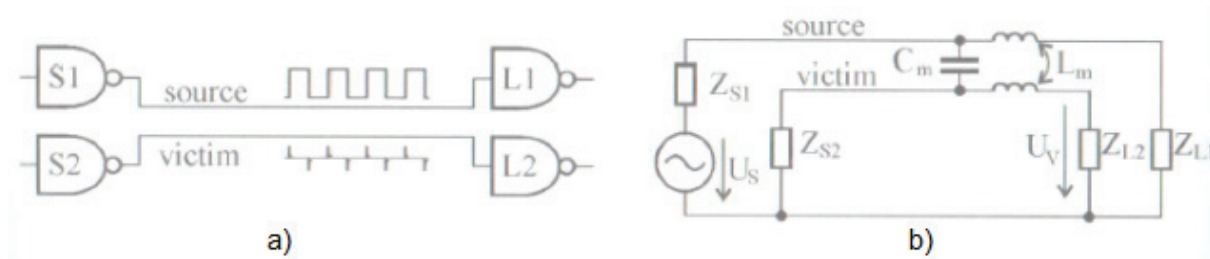
1.1.8 PŘESLECHY

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

$$X_{talk} = 20 \cdot \log \left| \frac{U_V}{U_S} \right|$$



Na obr. 9 je znázorněn typický případ přeslechu na plošném spoji. Je zřejmé, že přeslechy způsobuje vzájemná kapacitní (C_m) a induktivní vazba (L_m). U kapacitní vazby způsobují rušení změny napětí, u induktivní vazby změny proudu.



Obr. 9 Typický příklad přeslechu na plošném spoji

1.1.9 KAPACITNÍ VAZBA

V obr. 9 zanedbáme vzájemnou indukčnost L_m . Budeme-li předpokládat, že průběh napětí U_S je v praxi to napětí, které bychom naměřili na rušícím spoji, můžeme impedanci Z_{S1} nahradit zkratem a impedanci Z_{L1} rozpojit (obr. 10a). Dále v impedancích Z_{S2} a Z_{L2} zanedbáme induktivní složky. Kapacita C_{WG} je parazitní kapacita vedení (plošného spoje).

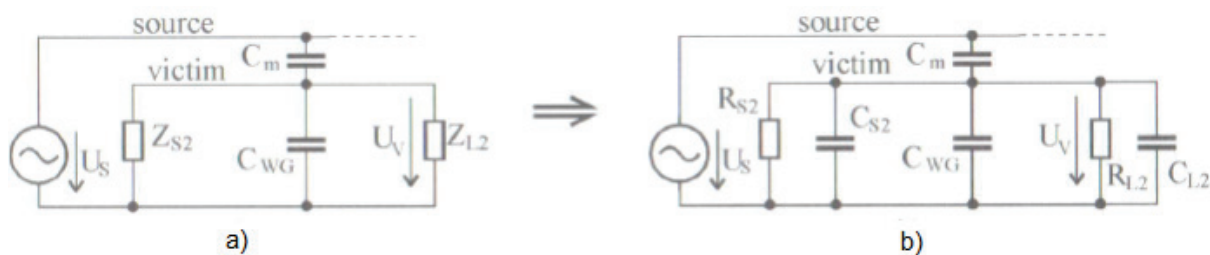
Pro výsledné zjednodušené schéma (obr. 10b) můžeme odvodit vztah pro poměr napětí

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

Omezíme-li se na řešení kapacitní vazby vedení, v němž dochází ke skokovým změnám napětí (tedy například číslicové obvody), dostaneme pro náhradní zapojení z obr. 10b poměr:

$$\text{Kde } \tau = (C_m + C_{WG} + C_{L2} + C_{S2}) \cdot (R_{L2} \parallel R_{S2})$$

Kladné znaménko v čitateli 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 pro $t = 0_+$.



Obr. 10 Kapacitní vazba

1.1.10 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 .

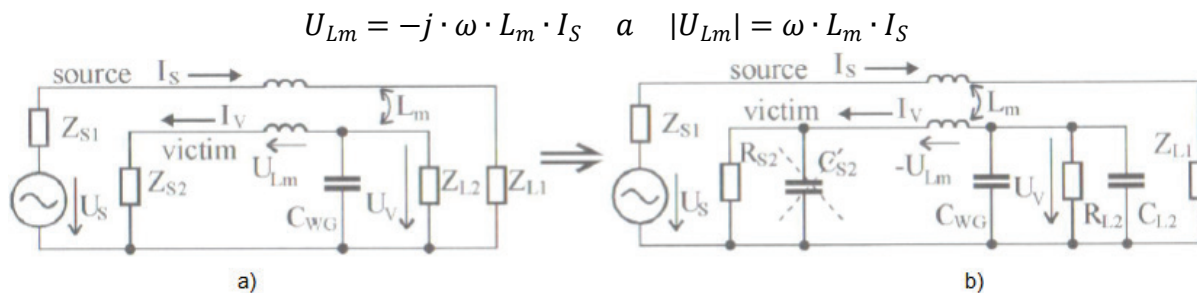
$$U_{lm} = I_V \cdot (Z_{S2} + Z_{L2})$$

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

$$U_V = I_V \cdot Z_{L2}$$

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





Obr. 11 Induktivní vazba

Pro napětí U_v dostaneme vztah:

$$|U_v| = \frac{|U_{Lm}|}{1 + \frac{Z_{S2}}{Z_{S1}}} = \frac{\omega \cdot L_m \cdot I_S}{1 + \frac{Z_{S2}}{Z_{S1}}}$$

kde za Z_{S2} a Z_{L2} dosadíme parametry dle vlastností příslušných obvodů. Pro většinu běžných obvodů stačí 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 obr. 11 b) je možné odvodit vztah pro napětí U_v :

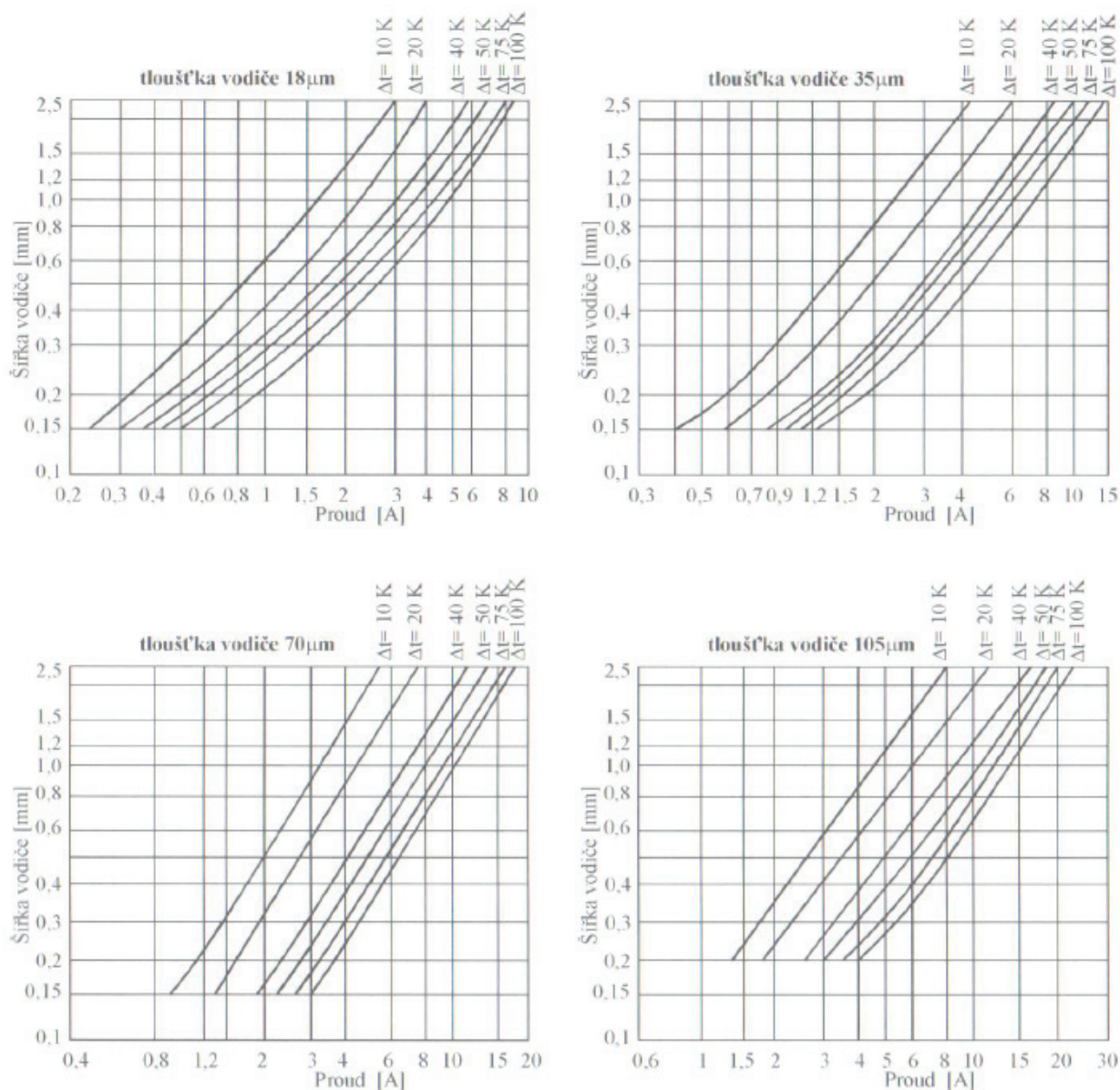
$$|U_v| = \frac{\omega \cdot L_m \cdot I_S}{\sqrt{\left(1 + \frac{Z_{S2}}{Z_{S1}}\right)^2 + [\omega \cdot (C_{L2} + C_{WG}) \cdot R_{S2}]^2}}$$

Při řešení induktivní vazby vedení, v němž dochází ke skokovým změnám proudů, dostaneme pro maximální hodnotu napětí U_v dle náhradního zapojení z obr. 11 výraz:

$$u_{Lm} = -L_m \cdot \frac{di_S}{dt} \quad a \quad u_{vmax} = \frac{-L_m \cdot \frac{di_S}{dt}}{1 + \frac{Z_{S2}}{Z_{S1}}}$$

1.2 ZATÍŽENÍ VODIČŮ NA DPS

Při návrhu DPS je nutné znát jejich proudovou a napěťovou zatížitelnost. Při vysokém proudovém zatížení může dojít vlivem ztrátového výkonu na odporu plošného vodiče k jeho nadměrnému zahřátí a dokonce až k přetavení. Napěťová zatížitelnost souvisí s elektrickou pevností izolačních mezer mezi vodiči na DPS.



Obr. 12 Proudová zatížitelnost plošných vodičů (nosný materiál FR4)

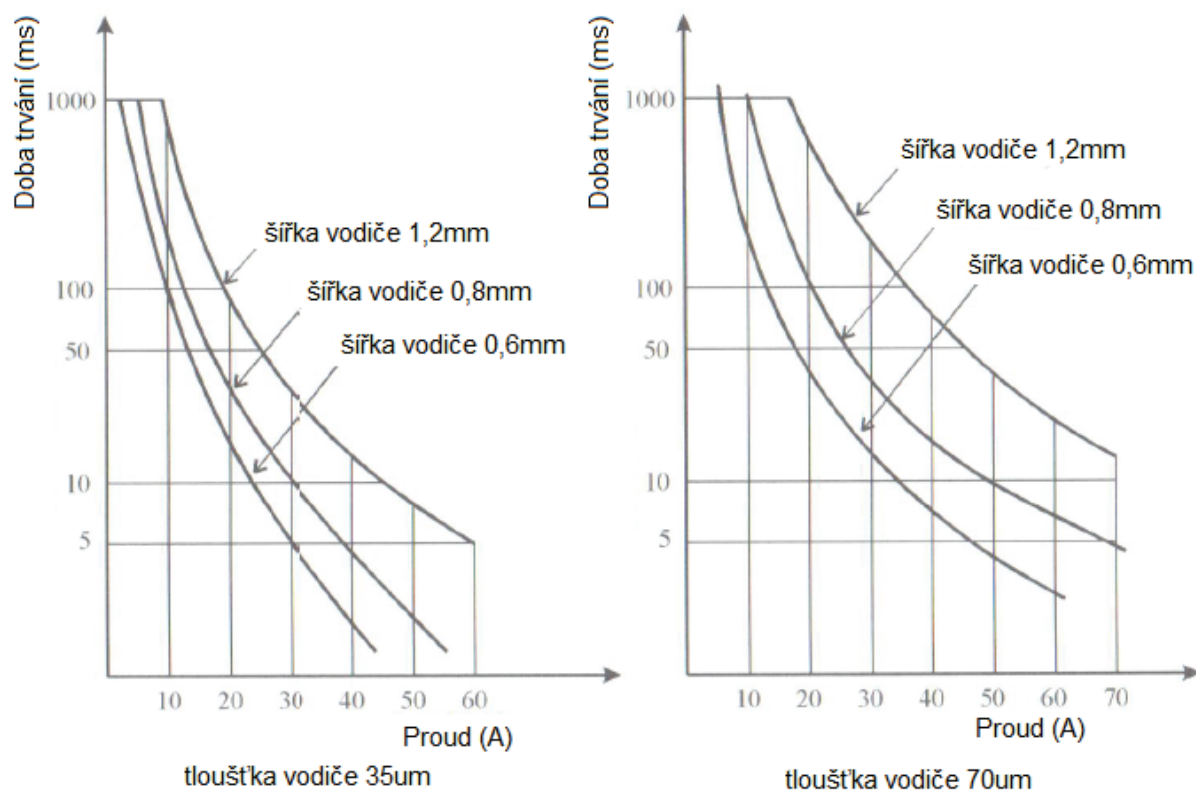
1.2.1 PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ

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 1,5 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 obr. 12 jsou křivky závislosti stejnosměrné proudové zatížitelnosti na šířce vodiče pro různé změny teploty. Při přepočtu na proudové hustoty potom vychází trvalá provozní zatížitelnost v řádu 100 A/mm^2 . Maximální provozní teplota je dána takzvaným bodem měknutí základního materiálu, který pro FR4 představuje teplota 125°C .

Stupeň 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 obr. 13



jsou uvedeny informativní grafy, které mají sloužit jako pomůcka pro odhad přípustných zkratových impulzních proudů a jejich trvání, pro tři šířky a dvě tloušťky plošného vodiče.

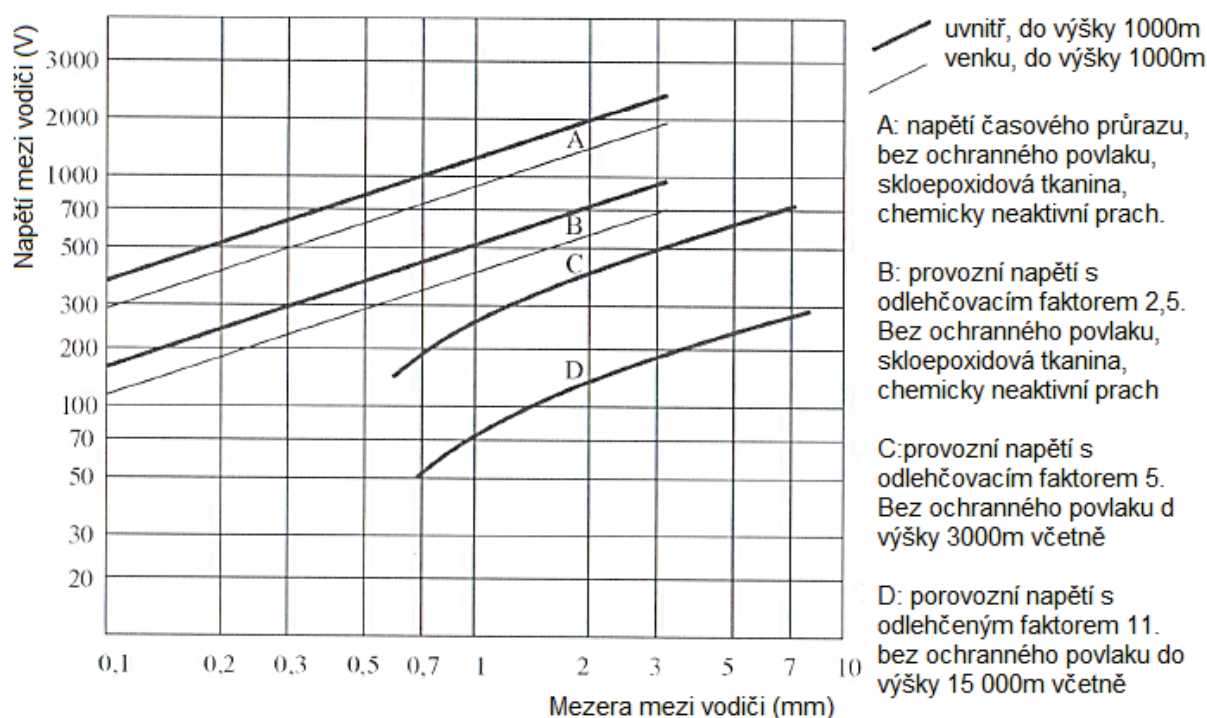


Obr. 13 Přípustné jednorázové přetížení proudem

1.2.2 NAPĚŤOVÉ ZATÍŽENÍ

Velikost přípustného napětí mezi vodiči závisí na mnoha faktorech. Jsou to například velikost mezery, druh základního materiálu, ochranný povlak (nepájivá 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 průrazné napětí a maximální provozní napětí. Velikosti těchto napětí a způsoby jejich zkoušení jsou předmětem norem. Na obr. 14 je uvedena závislost průrazného a pracovního napětí na velikosti izolační mezery mezi plošnými vodiči podle normy IEE 512-2.

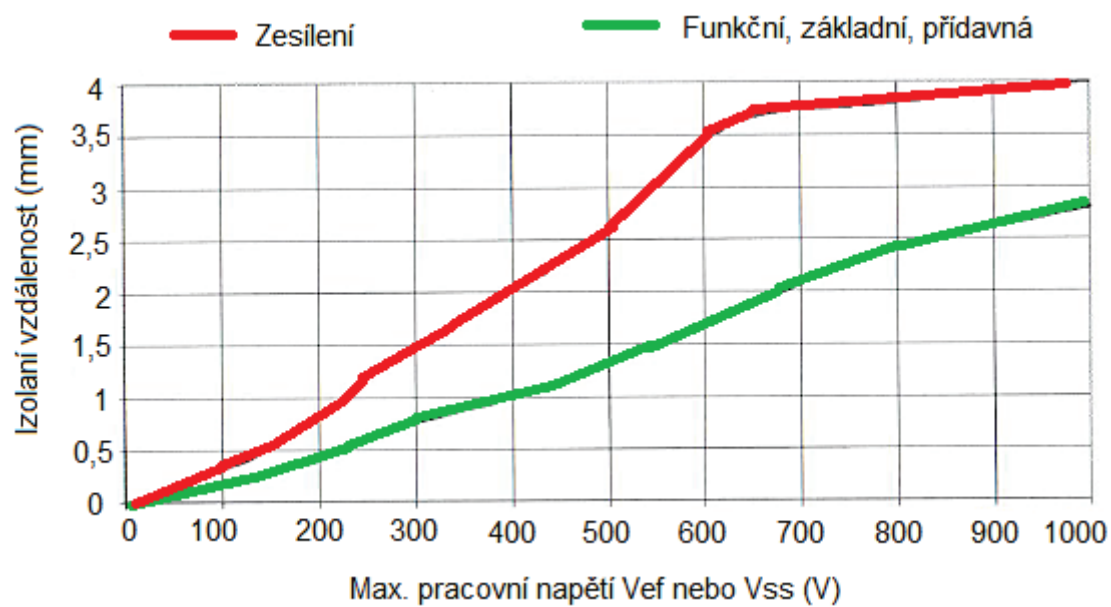
V České republice určují izolační vzdálenosti normy, které specifikují bezpečnostní požadavky na různé druhy zařízení - například ČSN EN 60960 - "Bezpečnost zařízení informační techniky včetně elektrických kancelářských zařízení" a ČSN EN 610 1 0-1 - "Bezpečnostní požadavky na elektrická měřicí, řídicí a laboratorní zařízení" atd. Na obr. 15 je uveden příklad minimálních izolačních vzdáleností na DPS s nepájivou maskou podle normy ČSN EN 60950.



Obr. 14 Elektrická pevnost izolačních mezer (IEC 512-2)

- 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 většiny spojů. S výjimkou těch, u kterých může dojít k dotyku člověka.
- Přídavná 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 = tato hodnota je určující pro návrh těch spojů, u kterých může dojít k dotyku člověka (konektor, potenciometr, tlačítko, přepínač).

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



Obr. 15 Příklad minimálních vzdáleností podle normy ČSN EN 60950

2 LITERATURA

doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D. a kolektiv. *ZÁKLADY KONSTRUKČNÍCH TECHNOLOGIÍ V ELEKTRONICE -Výroba DPS v laboratořích VŠB TU Ostrava*, učební text a návody do cvičení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, FEI, KAT 450. 2012 [30.6.2013]. Interní document.

Vít Záhlava. *Návrh a konstrukce DPS, Principy a pravidla praktického návrhu*. Nakladatelství BEN – technická literatura, Praha 2010 [29.6.2013]. ISBN 978-80-7300-266-4

Kristýna Friedrischková. *Příprava výukových textů v projektu MOST-TECH, Technologie propojení součástek v systému, plošné spoje – materiály, konstrukce, výroba*. VŠB TU Ostrava, učební text a návody do cvičení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, FEI, KAT 450. 2012 [30.6.2013]. Dostupné z

< http://mostech.vsb.cz/source/dokumenty/4_Plosne%20spoje.pdf >.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ**



NAVRHOVÁNÍ A TECHNOLOGIE DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPABILITA (EMC)

Ing. David Vala
Ing. Kristýna Friedrischková
Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D.
Ing. Bohumil Horák, ml.
Ing. Ondřej Balák

Ostrava 2013

© Ing. David Vala, Ing. Kristýna Friedrischková, Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D., Ing. Bohumil Horák, ml., Ing. Ondřej Balák

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3062-9



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

1	ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA (EMC)	3
1.1	Úvod	4
1.1.1	Základní pojmy a definice	4
1.1.2	Legislativní rámec v České republice	5
1.1.3	Zákon č.22/1997 Sb. a Nařízení vlády č.169/1997 Sb.	5
1.2	Normy EMC - odolnost a vyzařování.....	7
1.2.1	Požadavky na zkoušky - vyzařování:.....	8
1.3	Elektromagnetická kompatibilita a DPS	10
1.4	Rušení.....	10
1.4.1	Elektromagnetické pole vyzařované proudovou smyčkou	11
1.5	Návrh desek plošných spojů z hlediska EMC	14
1.5.1	Součástky a EMC	15
2	LITERATURA	18



1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA (EMC)



OBSAH KAPITOLY:

Obsahem této kapitoly jsou základní informace o elektromagnetické kompatibilitě (EMC). Krátké shrnutí požadavků na DPS z hlediska norem na bezpečnost a rušení.



MOTIVACE:

Chceme-li se zabývat návrhem desky plošného spoje na profesionální úrovni, je třeba znát veškeré vnější a vnitřní jevy, které působí na daný subjekt a jeho zákonitosti při schvalování a měření z hlediska norem daných zákonem v ČR.



CÍL:

Cíle pochopení vnějších i vnitřních vlivů působících na desku plošného spoje, které ovlivňují celkový výsledek a funkčnost desky plošného spoje.

1.1 ÚVOD

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, měničů atd. Bezvýznamné není ani rušení elektronických zařízení navzájem. Rušivý vliv prostředí, projevující se nežádoucími vazbami, interferenčním šumem, rezonančními a přechodovými jevy, může vyvolat nejen nesprávnou funkci elektronických zařízení nebo zkreslení 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 slučitelnosti) 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 slučitelnosti 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. V tomto skriptu se budeme zabývat především souvislostmi elektromagnetické kompatibility s návrhem plošného spoje a elektronického zařízení vůbec. Nejprve ale přece jen několik základních pojmů a vysvětlení legislativního rámce EMC v České republice.

1.1.1 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE

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

- Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - schopnost zařízení nebo systému fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřipustného elektromagnetického rušení čehokoliv 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, spínače, relé, stykače, měniče, 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, vyzařováním elektromagnetického pole).
3. Přijímač rušení - číslicová technika, počítače, měřicí přístroje, telekomunikační prostředky, systémy přenosu dat, automatizační prostředky, střelivo a munice, rozhlasové a televizní přijímače, živí tvorové

1.1.2 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. 179/1 997 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.

Připomínám, že tento text necituje žádný z výše uvedených dokumentů ani jejich částí doslovně, cílem je pouze informovat čtenáře o nejzávažnějších myšlenkách těchto dokumentů.

1.1.3 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 výrobců, dovozců a distributorů při uvádění výrobků 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 výrobků,

a tak dále. V Nařízení 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 Nařízení 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 výrobků 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 (opět č.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 uváděných 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 nezavazuje výrobce a dovozce odpovědnosti za vady výrobků ani za škody jimi 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).

1.2 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, jimi způsobené, nepřesáhlo přípustnou úroveň, a aby měly odpovídající odolnost vůči elektromagnetickému rušení. Český normalizační institut proto vydává normy, které se týkají elektromagnetické kompatibility, rušení i a odolnosti a tyto jsou harmonizované s evropskými a mezinárodními normami. Nás budou při návrhu DPS 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 nejdříve 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.



1.2.1 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.

- ČSN EN 50081-1 EMC - všeobecná norma týkající se vyzařování
Část I: Prostory obytné, obchodní a lehkého průmyslu.
- ČSN 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 ději, šířenému jak po vodičích, tak i vyzařováním elektromagnetického pole, včetně elektrostatických výbojů.

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

Měření a zkušební uspořádání - vyzařování:

Měří 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(μ V/m). Rušivé napětí na svorkách nesmí překročit 46 až 66 dB(μ V) 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.

- ČSN EN 55022 Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení zařízením informační techniky.
- ČSN EN 55014 Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení způsobeného zařízením s elektrickým pohonem, tepelným zařízením pro domácnosti a podobné účely, elektrickým nářadím a podobnými elektrickými přístroji.
- ČSN EN 55015 Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení způsobeného elektrickými svítilnami a podobným zařízením.
- ČSN EN 550 II 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 řady 61 000-4-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 DPS. 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.



- ČSN 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, mezi harmonické, krátkodobé poklesy a přerušení, 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 šířená 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).
- ČSN 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 předmětů 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.
- ČSN EN 61000-4-3 Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole - zkouška odolnosti. Účelem zkoušky je ověření odolnosti zařízení proti elektromagnetickým polím generovaným rozhlasovými vysílači nebo jakýmkoliv jiným přístrojem vyzařujícím spojitě elektromagnetickou energii (ruční vysílačky, 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.
- ČSN EN 61000-4-4 Rychlé elektrické přechodové jevy/skupiny impulzů - zkouška odolnosti. Účelem zkoušky je ověření odolnosti zařízení proti skupinám impulzů velmi krátkých přechodových jevů generovaných například spínáním malých indukčních zatížení a odsakováním kontaktů relé, spínáním vysokonapětových vypínačů. Zkouška se provádí na napájecích přívodech a na přívodech ovládání a signálů ke zkoušenému zařízení. Používají se opakující se skupiny impulzů 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 přivádí na vstupy zařízení pomocí vazebního členu o kapacitě 50 až 200 pF.
- ČSN EN 61000-4-5 Rázový impulz - zkouška odolnosti. Účelem zkoušky je ověření odolnosti zařízení proti jednosměrnému přechodovému jevu způsobenému spínacími jevy nebo poruchami v rozvodné síti, přímými nebo nepřímými údery blesku. Zkouška se provádí napětovým 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.

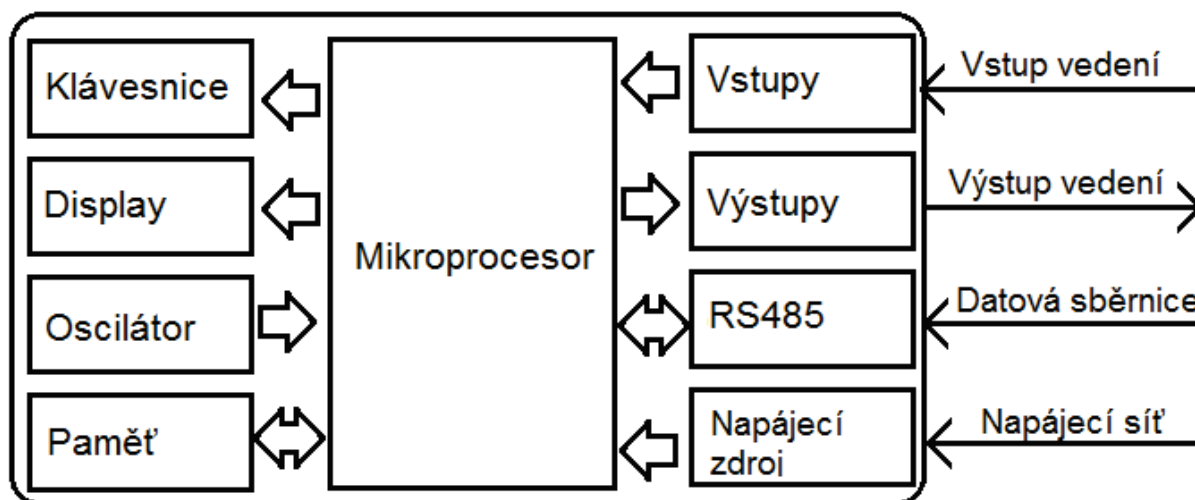


- ČSN EN 61000-4-6 Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli - zkouška odolnosti. Účelem zkoušky je ověření odolnosti zařízení proti elektromagnetickým rušením šířeným vedením, jejichž zdrojem jsou úmyslné vysokofrekvenční vysílače v kmitočtovém rozsahu 9 kHz až 80 MHz. Měření se provádí napětím 1 až 10 V v rozsahu ISO 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 ...

1.3 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA A DPS

Nejdříve si v krátkosti shrňme 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 vědeckotechnickými 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 DPS - 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 II odporově vázané analogové vstupy a tranzistorové a reléové výstupy (obr. 1).



Obr. 1 Blokové schéma zařízení

1.4 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 (obr. 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 po vedení (vstupy, výstupy, napájení) a vyzařováním do prostoru.

Úplné potlačení 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 samotné DPS.

V zásadě každý rušivý zdroj šíří rušivou energii dvěma způsoby:

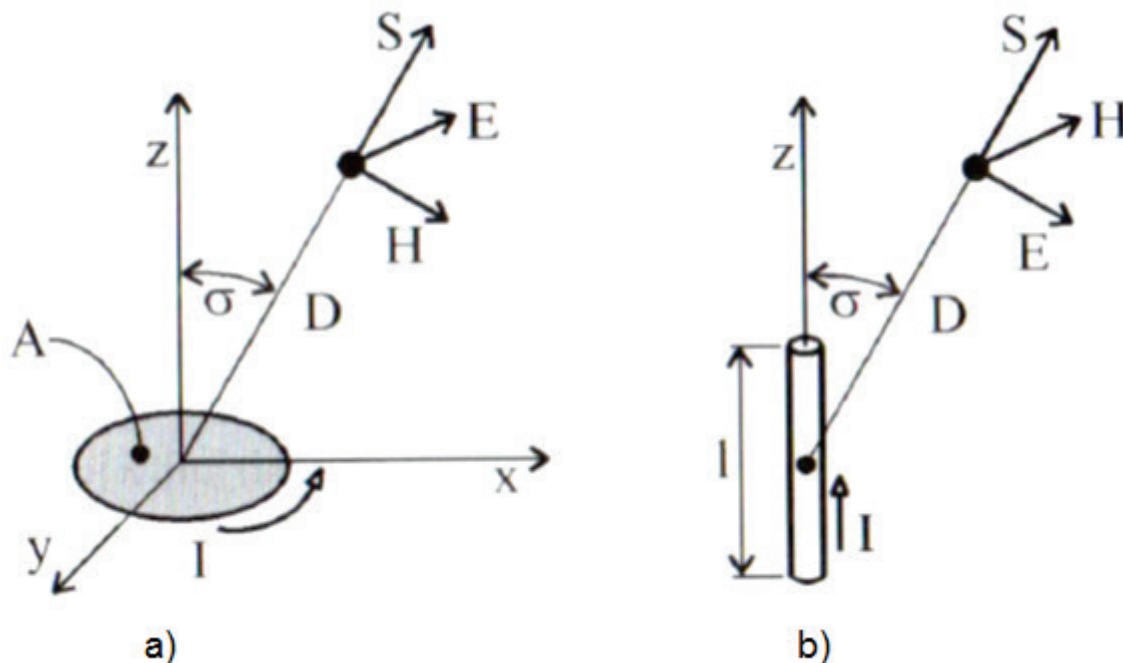
1. po vedeních ve formě rušivých proudů a jimi vyvolaných rušivých napětí na impedancích sítě a zátěže,
2. vyzařováním ve formě elektromagnetického pole.

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 nebo 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 rušení je nutné znát alespoň základní principy vytváření a šíření elektromagnetického pole.

1.4.1 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 (obr. 2). Jeho velikost udává hustotu vyzařované energie na jednotku plochy v daném místě. Pro elektromagnetické pole, vytvořené proudovou smyčkou o ploše A, platí vztahy (obr. 2a):



Obr. 2 Vyzařování proudové smyčky a dipólu

$$|H| = \frac{\pi \cdot I \cdot A}{\lambda^2 \cdot D} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot D}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot D}\right)^4} \cdot \sin \sigma \quad [A/m]$$



$$|E| = \frac{Z_0 \cdot \pi \cdot I \cdot A}{\lambda^2 \cdot D} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot D}\right)^2} \cdot \sin \sigma \quad [V/m]$$

kde I je proud smyčkou [A], A je plocha smyčky [m²], λ 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 ($\frac{\lambda}{2} \cdot \pi \cdot D > 1$) budou intenzity E a H záviset na:

$$H \approx \frac{I \cdot A}{4 \cdot \pi \cdot D} \quad [A/m]$$

$$E \approx \frac{Z_0 \cdot I \cdot A}{2 \cdot \lambda \cdot D^2} \quad [V/m]$$

V oblasti vzdáleného pole ($\frac{\lambda}{2} \cdot \pi \cdot D < 1$) budou intenzity E a H záviset na:

$$H \approx \frac{\pi \cdot I \cdot A}{\lambda^2 \cdot D} \quad [A/m]$$

$$E = \frac{Z_0 \cdot \pi \cdot I \cdot A}{\lambda^2 \cdot D} \quad [V/m]$$

ELEKTROMAGNETICKÉ POLE VYZAŘOVANÉ PŘÍMÝM VODIČEM

Podle platí pro elektrické a magnetické pole, vytvořené přímým vodičem (obr. 2b), následující vztahy:

$$|H| = \frac{I \cdot A}{2 \cdot \lambda \cdot D} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot D}\right)^2} \cdot \sin \sigma \quad [A/m]$$

$$|E| = \frac{Z_0 \cdot I \cdot A}{2 \cdot \lambda \cdot D} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot D}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot D}\right)^4} \cdot \sin \sigma \quad [V/m]$$

kde I je proud protékající smyčkou [A], l je délka vodiče (dipólu) [m], λ 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 ($\frac{\lambda}{2} \cdot \pi \cdot D > 1$) budou intenzity E a H záviset na:

$$H \approx \frac{I \cdot l}{4 \cdot \pi \cdot D^2} \quad [A/m]$$

$$E \approx \frac{Z_0 \cdot I \cdot l \cdot \lambda}{8 \cdot \pi^2 \cdot D^3} \quad [V/m]$$

V oblasti vzdáleného pole ($\frac{\lambda}{2} \cdot \pi \cdot D < 1$) budou intenzity E a H záviset na:

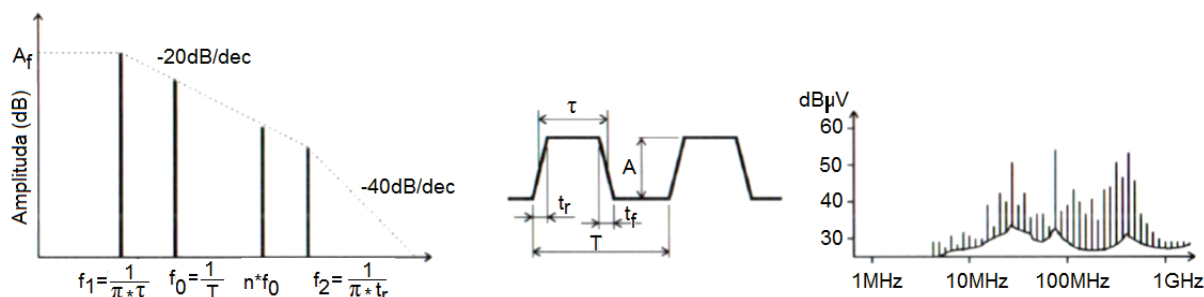
$$H \approx \frac{I \cdot l}{2 \cdot \lambda \cdot D} \quad [A/m]$$

$$E = \frac{Z_0 \cdot I \cdot l}{2 \cdot \lambda \cdot D} \quad [V/m]$$



KMITOČTOVÉ SPEKTRUM LICHOBĚŽNÍKOVÉHO PRŮBĚHU

Každý periodický signál je reprezentován v časové i kmitočtové oblasti. Převod mezi časovou a kmitočtovou oblastí provádíme pomocí Fourierovy transformace. Na obr. 3a) vidíme vyjádření lichoběžníkového průběhu v kmitočtové oblasti. Toto kmitočtové 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 impulzů τ a náběžné a sestupné hrany t_r a t_f . Právě kmitočty, odpovídající délce impulzu a náběžné respektive sestupné hraně, představují zpravidla složku rušení s největší amplitudou. Proto je velmi důležité při návrhu elektronického obvodu pečlivě zvážit typ použitých obvodů právě z hlediska velikostí parametrů τ a t_r (tabulka 1). Zároveň je vhodné zvážit potřebnou délku impulzů, která je zpravidla odvozena od kmitočtu řídicího oscilátoru, nebo je možné ji upravit programově. Pro amplitudy spektrálních čar platí následující vztahy (za předpokladu $t_r = t_f$) :

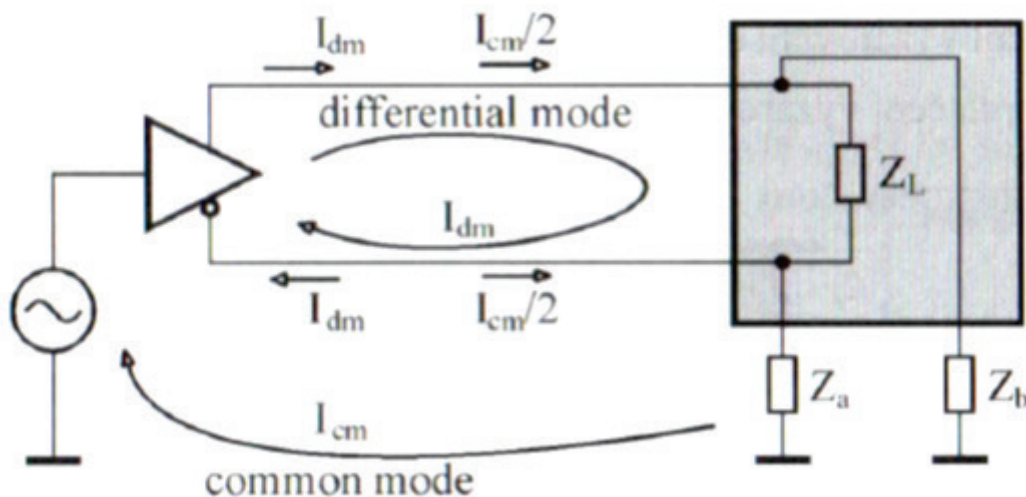


Obr. 3 Spektrální analýza periodického průběhu, a příklad naměřeného spektra

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

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

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



Obr. 4 Souhlasné a nesouhlasné rušení

Na DPS ovšem najednou pracuje více obvodů, jejichž frekvence, délka impulzů i náběžné a sestupné hrany nejsou totožné, a tedy jejich kmitočtové spektrum je poněkud bohatší. Na obr 3c) je vidět praktický příklad spektra, které bylo naměřeno spektrálním analyzátozem s kalibrovanou anténou při měření vyzářování podle norem EMC. Například špička na

frekvenci 90 MHz odpovídá náběžné a sestupné hraně 3,5 ns. Tuto složku rušení tedy způsobuje pravděpodobně nějaká součástka vyrobená v technologii HCMOS (tabulka 1)

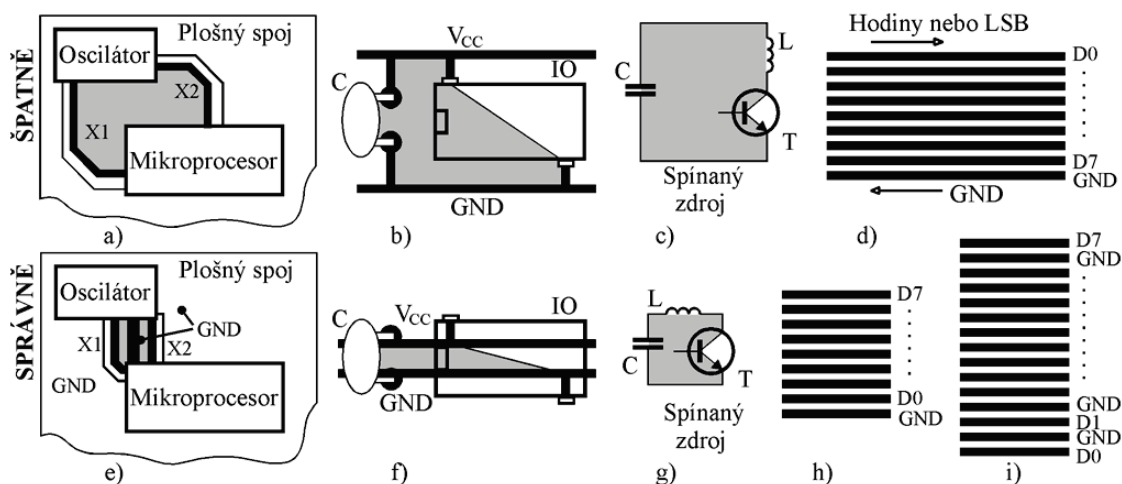
Souhlasné a nesouhlasné rušení

Odlišnost souhlasného rušení (common mode) a nesouhlasného rušení (differential mode) je nejlépe patrná z obr. 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).

1.5 NÁVRH DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ Z HLEDISKA EMC

Jak již bylo řečeno, elektronická zařízení, a tedy i jejich DPS, musí být odolné proti rušení a samy nesmí vyzařovat rušení nad přípustnou mez. Oddělit 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 DPS je z hlediska vyzařování a odolnosti třeba chápat jako komplexní činnost, která začíná již při ideovém či blokovém návrhu schématu každého zařízení. Z obsahu předchozích kapitol lze snadno vyvodit, že mezi základní pravidla návrhu DPS z hlediska elektromagnetické kompatibility patří především:

- Minimalizace hodnot proudů = volba vhodných typů obvodů, výběr obvodů z hlediska vstupních impedancí, správné impedance vůbec.
- Minimalizace proudových smyček respektive délek spojů = vhodné rozmísťování součástek a vedení spojů, zemnění, rozlévaná měď, správná konfigurace napájecí, vstupní i výstupní kabeláže, správné blokování napájení pomocí kondenzátorů. 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 přechodovými jevy, omezení vyzařování do vedení.
- Stínění = potlačení vyzařování a zároveň zvýšení odolnosti.



Obr. 5 Typické chyby na DPS [12] a jejich řešení

Na obr. 5a) až d) vidíme typické návrhářské chyby. Všechny čtyři konfigurace mají jednu chybu společnou, a tou je příliš 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 obr. 5b) je vhodné vést blízko sebe pod integrovaným obvodem, u spínaných zdrojů je nutné součástky C, L a T umístit tak blízko sebe, aby plocha proudové smyčky byla minimální. Případ 5d) je typickou chybou nevhodně navržené konfigurace sběrnice, a to jak na DPS, tak i v případě kabeláže. Tato chyba zpravidla způsobuje, že celé zařízení nevyhoví požadavkům EMC na vyzařování! Vodič s nejrychlejšími změnami logických úrovní by měl bezprostředně sousedit se společným vodičem. Jelikož ovšem vyzařované 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 pro ložení společných vodičů (GND) mezi každý signálový vodič, což sice téměř zdvojnásobí počet vodičů, ale z vlastních zkušeností vím, že taková konfigurace sníží úroveň vyzařování sběrnice až o 20 dB! Na vícevrstvé DPS je možné tuto situaci vyřešit také tím, že pod všemi signálovými vodiči bude v bezprostřední sousední vrstvě rozlita měď, která bude připojena na obou koncích sběrnice ke společnému vodiči (GND).

1.5.1 SOUČÁSTKY A EMC

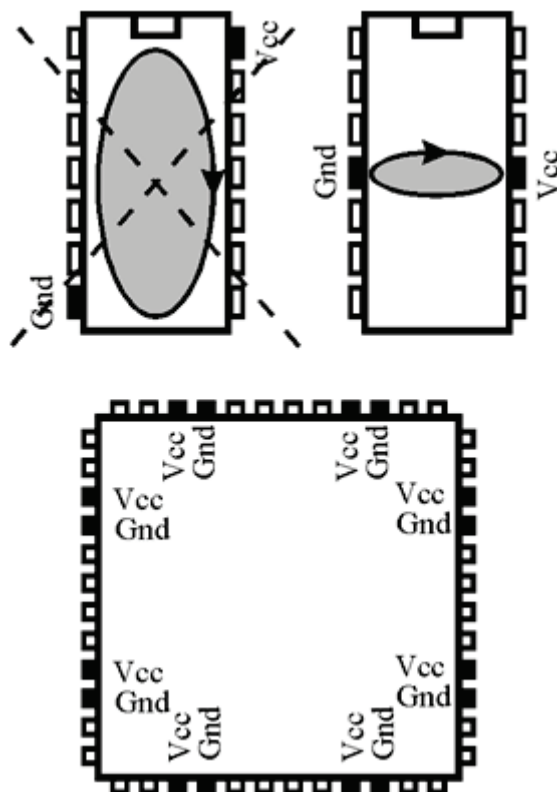
Problematika elektromagneticky kompatibilních součástek je velmi široká a začíná již při návrhu layoutu čipu a jeho pouzdrění. Nově vyvíjené součástky již nemají například napájecí vývody v úhlopříčce pouzdra, ale proti sobě, složitější součástky musí mít napájecích vývodů více s tím, že VCC a GND budou vždy ve dvojici bezprostředně vedle sebe (obr. 6). Z důvodů omezení vyzařování se používají oscilátory s co nejnižším kmitočtem a pomocí fázových závěsů se provede jeho vynásobení až na čipu mikroprocesoru. Snahou je samozřejmě také omezení proudové impulzní spotřeby, zvýšení odolnosti proti proudové injekci, zvýšení šumové imunity atd.

Jako návrháři DPS se budeme orientovat spíše aplikačně, 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 1 a obr. 7) a s napájecími vývody umístěnými tak, aby umožňovaly návrh proudových smyček s co nejmenší plochou (obr. 6).
- Nepoužívat zbytečně rychlé obvody (náběžné a sestupné hrany). Přehled vlastností základních logických řad je uveden v tabulce 1.
- Maximální využití součástek SMO - menší rozměry a tedy i příznivější parazitní vlastnosti (parazitní indukčnost přívodů se oproti součástkám se standardními přívody sníží až o 50 %).
- Bezpodmínečné propojení chladičů se společným vodičem (GND) u součástek s pracovním kmitočtem nad 75 MHz. Na chladič se kapacitní vazbou přenáší příslušné kmitočtové spektrum z čipu, které je v případě, že chladič není uzemněn, vyzářeno do prostoru jako elektromagnetické rušení.
- Volba vhodných blokovacích kondenzátorů, filtračních tlumivek, indukčností a ochranných prvků (bude popsáno dále).



- Výběr izolačních prvků (transformátorků, optronů, DC/DC měničů) s co nejnižšími parazitními vazebními kapacitami a indukčnostmi.

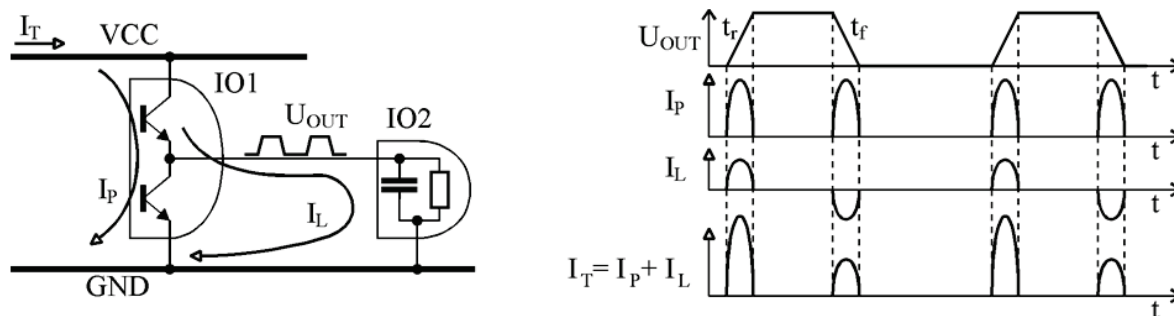


Obr. 6 Konfigurace napájecích vodičů

typ logiky	napět'ový rozkmit [V]	tr/tf [ns]	kritický kmitočet [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 překlápění logické úrovně (I_p z obrázku 7) **) vstupní odpor- je větší než 100kΩ

Tab.1 Přehled vlastností logických řad



Obr. 7 Impulzní spotřeba číslicových obvodů

2 LITERATURA

doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D. a kolektiv. *ZÁKLADY KONSTRUKČNÍCH TECHNOLOGIÍ V ELEKTRONICE - Výroba DPS v laboratořích VŠB TU Ostrava*, učební text a návody do cvičení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, FEI, KAT 450. 2012 [30.6.2013]. Interní document.

Vít Záhlava. *Návrh a konstrukce DPS, Principy a pravidla praktického návrhu*. Nakladatelství BEN – technická literatura, Praha 2010 [29.6.2013]. ISBN 978-80-7300-266-4

Kristýna Friedrischková. *Příprava výukových textů v projektu MOST-TECH, Technologie propojení součástek v systému, plošné spoje – materiály, konstrukce, výroba*. VŠB TU Ostrava, učební text a návody do cvičení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, FEI, KAT 450. 2012 [30.6.2013]. Dostupné z

< http://mostech.vsb.cz/source/dokumenty/4_Plosne%20spojce.pdf >.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ**



NAVRHOVÁNÍ A TECHNOLOGIE DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

NÁVRHOVÁ PRAVIDLA DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

Ing. David Vala
Ing. Kristýna Friedrischková
Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D.
Ing. Bohumil Horák, ml.
Ing. Ondřej Balák

Ostrava 2013

© Ing. David Vala, Ing. Kristýna Friedrischková, Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D., Ing.
Bohumil Horák, ml., Ing. Ondřej Balák

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3062-9



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

1	ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA (EMC)	3
1.1	Úvod	4
1.1.1	Rozmístění součástek.....	4
1.2	Řazení vrstev DPS.....	5
1.2.1	Zemnění.....	6
1.2.2	Blokování napájení.....	8
1.2.3	Napájecí zdroje	14
1.2.4	Spínané zdroje	16
1.2.5	Číslicové obvody	17
1.2.6	Obvody hodinových impulzů.....	19
1.2.7	Analogové obvody.....	23
1.2.8	A/D převodníky.....	24
1.2.9	Vstupně/výstupní obvody.....	27
1.2.10	Rychlé číslicové obvody.....	30
2	LITERATURA	31



1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA (EMC)



OBSAH KAPITOLY:

Obsahem této kapitoly jsou návrhová pravidla desky plošného spoje. Jsou zde popsány pravidla rozmístění elektronických součástek, řazení vrstev a jednotlivé hlavní bloky (blokovací napájení, napájecí zdroje, číslíkové obvody, analogové obvody, A/D převodníky, vstup/výstupní obvody a jiné).



MOTIVACE:

Po prostudování této kapitoly budete znát zákonitosti návrhu plošného spoje.



CÍL:

Cílem této kapitoly je vytvořit komplexní náhled na požadavky plošného spoje.



1.1 ÚVOD

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

- Správná obvodová funkce.
- Vytvořitelnost 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).

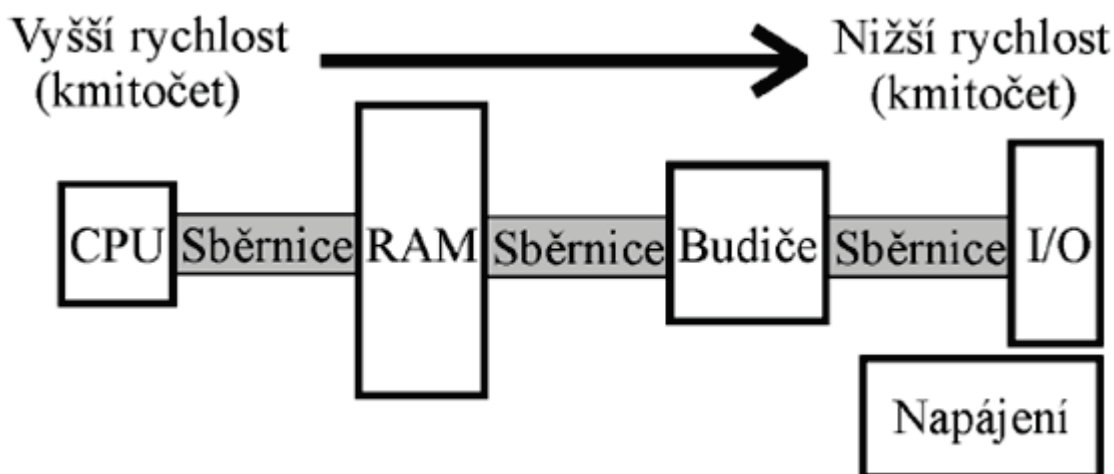
V dalších kapitolách si postupně popíšeme některá nejdůležitější konkrétní návrhová pravidla, spadající do oblasti správné obvodové funkce a EMC.

1.1.1 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:

- Rozmístění součástek směrem od vyšší k nižší šířce pásma (obr. 1).
- Vzájemná fyzická separace jednotlivých funkčních bloků (analogový, číslicový, oscilátor, I/O obvody, napájení atd.).
- Minimalizace vzdáleností za účelem minimalizace proudových smyček.



Obr. 1 Rozmístění součástek

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

1.2 ŘAZENÍ VRSTEV DPS

Mezi první otázky, které si musíme položit při návrhu DPS, patří počet vrstev DPS.

Počet vrstev je určen především hustotou součástek, počtem uzlů, systémem sběrnic, šumovou imunitou a systémem napájení, nutností vzájemné separace signálových spojů, impedancí. Význam vrstev, neboli přiřazení konkrétních signálových spojů a napájení do jednotlivých vrstev vyplývá z obecných vlastností těchto vrstev. Při návrhu vícevrstevných desek plošných spojů se používají tři druhy vrstev: Vnější signálové vrstvy (microstrip), vnitřní signálové vrstvy sousedící s vodivými plochami (stripline) a vodivé plochy určené pro nízko impedanční rozvod napájení (plane). Vrstvy typu „microstrip“ (obr. 3c) mají nižší parazitní kapacitu a tím i nižší přenosové zpoždění než vrstvy typu „stripline“ (obr. 4a). Díky stínění plochami mědi mají spoje typu „stripline“ vyšší odolnost vůči rušení a samozřejmě nezpůsobují vyzařování. Pro řazení vrstev DPS platí následující pravidlo:

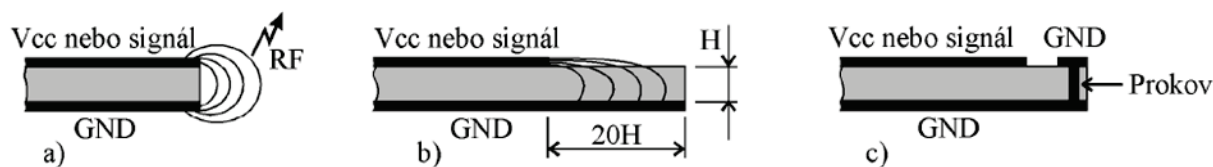
Každá signálová vrstva musí sousedit s vodivou plochou, nejlépe se společným vodičem.

Tabulku 1 není možné považovat za dogma. Každý návrh je svým způsobem specifický a podle náročnosti obvodového zapojení, systému napájení a druhů signálů je nutné vymyslet správné řazení vrstev pro každý konkrétní případ zvlášť. Jiné řazení vrstev může mít deska, na které jsou pouze číslicové obvody s jedním napájením, a jiné deska, na které je kromě číslicové části zároveň také řízení třífázových motorů, analogová jednotka se symetrickým napájením a spínané zdroje. Důležitá je též konzultace řazení vrstev s výrobcem DPS, neboť při silné středové asymetrii měděných ploch (například u 6 vrstvé DPS se třemi spojovými vrstvami z tabulky 1) může docházet k nadměrnému až nepřijatelnému prohnutí DPS vlivem teplotního zatížení při pájení.

Vrstvy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	komentář
2 vrstvy	S1	S2									pouze pro návrh nenáročných a pomalých aplikací
	G	P									
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 (6SPOJENÝCH)	S1	G	S2	S3	G	P	S4	S5	G	S6	doporučeno pro EMC
S=signálová soustava P=pájení G=společný vodič (zem)											

Tab.1. Příklad správného řazení vrstev pro vícevrstvé desky plošných spojů



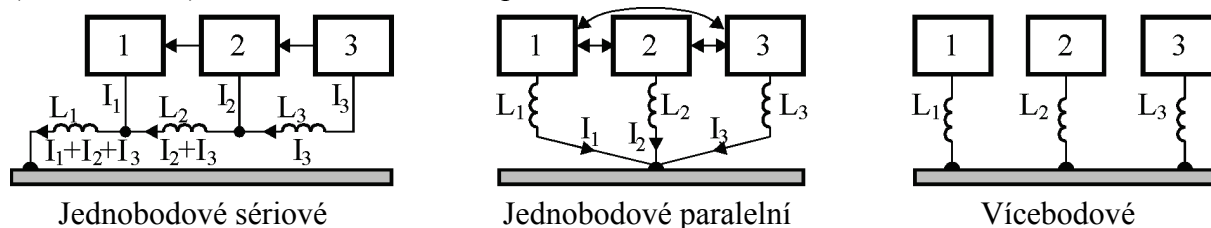


Obr. 2 Pravidlo 20H

Velmi důležitým pravidlem je takzvané pravidlo 20H, které říká, že na okrajích DPS musí vodivá plocha GND přesahovat napájecí plochu nebo signálové spoje o dvacetinásobek jejich vzájemné vzdálenosti (obl: 2b). Důvodem je potlačení vyzařování do boku DPS (až 70%). U dvoustranné DPS, jejíž tloušťka je 1,5 mm by ovšem tento přesah představoval 3 cm, což je příliš mnoho a tak se používá úpravy podle obr. 2c), kde celá DPS se obemkne zhruba 1 mm širokým prstencem, pravidelně propojovaným pomocí prokův do vrstvy GND. Viz též obr. 28b).

1.2.1 ZEMNĚNÍ

Někde na přelomu fází rozmísťování součástek a návrhu spojů je nutné zvolit správnou metodu zemnění. Rozlišujeme dva druhy zemnění - jednobodové a vícebodové, přičemž u jednobodového ještě rozlišujeme sériové a paralelní zapojení (obr. 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 a úmyslné použité součástky!!! Je nutné si uvědomit, že například spoj ve 4. třídě přesnosti (šířka 0,3 mm) a o tloušťce 45 um má parazitní indukčnost zhruba 10 nH/cm.



Obr. 3 Způsoby zemnění

JEDNOBODOVÉ ZEMNĚNÍ

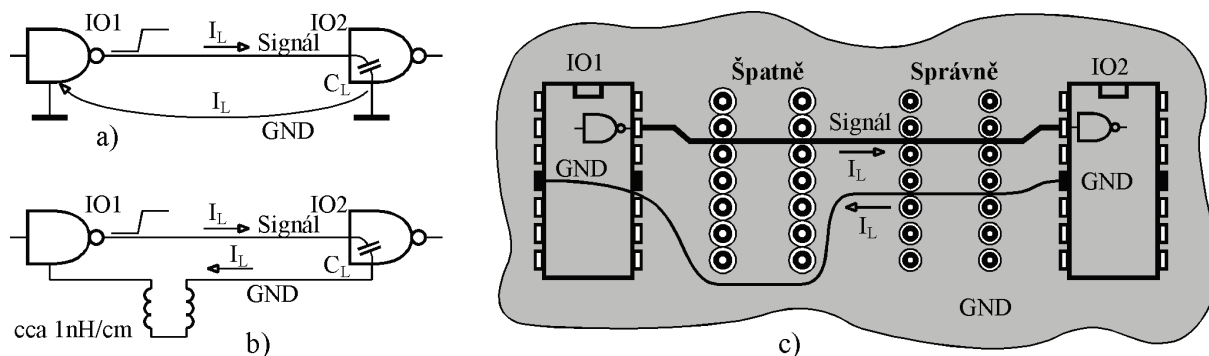
Jednobodové zemnění je vhodné především pro propojování obvodů se součástkami, jejichž kmitočtové spektrum nepřesahuje 1 MHz a neprojevuje se tak příliš významně parazitní indukčnost vodičů. Je tedy vhodné pro audio aplikace, napájecí zdroje pracující se síťovým kmitočtem, stejnosměrné aplikace atd. Pro výběr mezi sériovým a paralelním zapojením musíme dobře znát princip funkce celého obvodu včetně toků 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 $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$, přičemž úroveň signálu je vzestupná (například 3 = předzesilovač, 2 = korekce, 1 = koncový stupeň) a též proudy $I_1 > I_2 > I_3$.



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 měď v samostatné vrstvě DPS (GND).

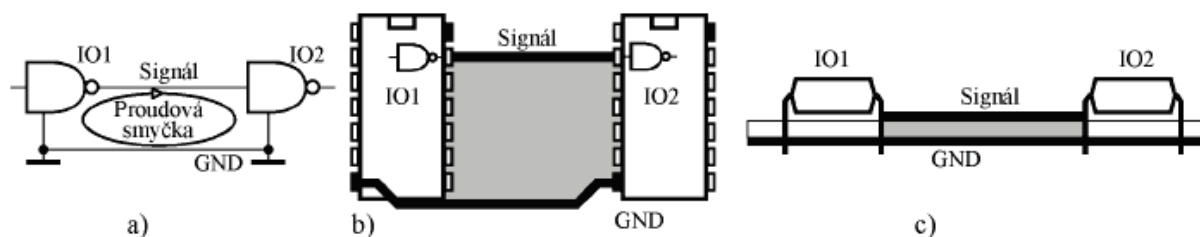
Vícebodové zemnění někdy bývá posíleno kostřením k šasi přístroje podle pravidla $\lambda/20$, které říká, že zařízení s hodinovým kmitočtem nad 50 MHz by měla mít vodivou plochu GND desky plošného spoje pravidelně ve vzdálenostech $\lambda/20$ vodivě spojovanou s kovovým šasi přístroje (vlnová délka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



Obr.4 Syndrom švýcarského sýra

Jak bylo řečeno, vícebodové zemnění na DPS předpokládá existenci souvislé vodivé plochy GND alespoň v jedné samostatné vrstvě DPS. Zdůrazňuji, že souvislé. Při návrhu DPS často dochází k chybě, která se v literatuře nazývá syndrom švýcarského sýra. Lapidárně řečeno - vodivá plocha GND je jako řeseto. To je způsobeno pájecími ploškami a prokovy, které procházejí celou deskou, tedy i vrstvou GND. Od nich musí GND ustoupit o určitou izolační vzdálenost. Uvažujme typickou situaci na obr. 4. Mějme dva integrované obvody, z nichž IO1 překlápí 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 (obr. 6.4a). Při realizaci na plošném spoji (obr. 4c) 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 měď a vratná cesta proudu I_L musí tuto oblast obejít. Tato "objížďka" představuje podle navýšení parazitní indukčnosti zhruba 1 nH/cm. Na obr. 4b) je znázorněn tomuto odpovídající náhradní obvod. Obdobná situace může nastat při příliš těsném umístění prokovů. Musíme tedy vždy pamatovat na to, aby mezi pájecími ploškami a prokovy bylo dostatek místa na rozliti měděné 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 obl: 5b) je znázorněna plocha smyčky pro případ, že GND je vedena pouze jako spoj a na obr. 5c) je vidět drastické snížení plochy smyčky při použití vodivé plochy (obrázky jsou pouze schematické, protože plochy smyček nezahrnují umístění čipů v integrovaných obvodech).



Obr. 5 Vliv vodivé plochy na velikost proudové smyčky

Pomocí vztahů 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 podložen vodivou plochou, a stejného vodiče, který se nachází $h = 1,5$ mm nad vodivou plochou, dostaneme pro samostatný vodič indukčnost 137 nH a pro vodič nad vodivou plochou 73 nH.

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

1.2.2 BLOKOVÁNÍ NAPÁJENÍ

Blokování napájení pomocí kondenzátorů patří spolu se zemněním k nejdůležitějším pravidlům, kterým je třeba věnovat pozornost u všech desek plošných spojů. Nutnost použití blokovacích kondenzátorů vyplývá z faktu, že zpoždění průchodu signálu (a tedy i napájení) není nulové a tím pádem každý jiný napájecí zdroj se nachází elektricky příliš daleko od spotřebiče.

Představíme-li si například, že:

- impulzní spotřeba běžného hradla HCMOS je podle tabulky 1 15 mA po dobu 3,5 ns,
- zpoždění průchodu signálu na plošném spoji (a tedy i napájecího proudu) 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.

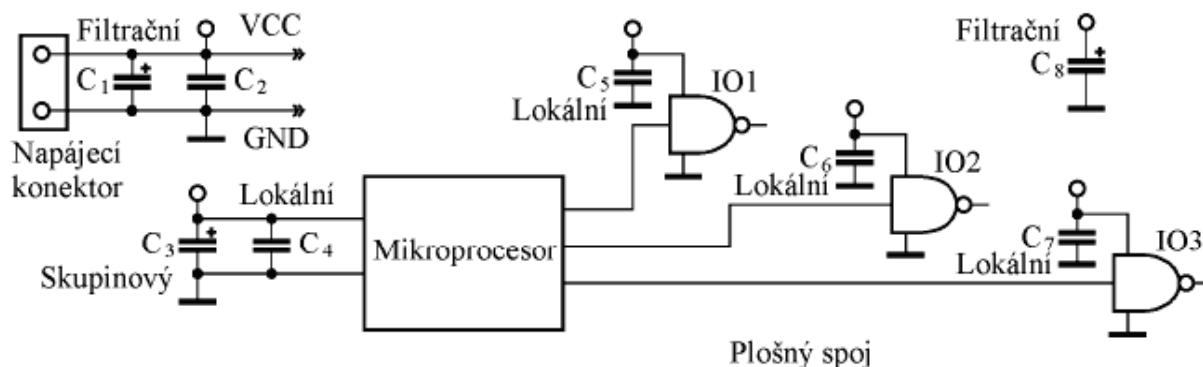
Navíc napájení po elektricky dlouhých vodičích vytváří na jejich parazitních indukčnostech nežádoucí úbytky napětí, způsobuje nadměrné vyzařování elektromagnetické energie díky velkým plochám smyček a tím vším drasticky snižuje odolnost zařízení. Velmi často dokonce zařízení bez blokovacích kondenzátorů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

Podle funkce rozlišujeme tři druhy blokovacích kondenzátorů:

1. Filtrační (bypassing) - slouží jako širokopásmový filtr pro napájení celé desky nebo její části, eliminuje vliv indukčností přívodů od napájecího zdroje, kontaktních přechodových odporů napájecích konektorů 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 obr. 7).
3. Skupinový (bulk) - slouží jako zdroj energie pro současné nabíjení několika kapacitních zátěží (například impulzní proud I_L z obr. 7).

Na modelové desce, napájené ze vzdáleného adaptéru a obsahující mikroprocesor s podpůrnými logickými obvody, budeme tedy mít konfiguraci všech tří druhů blokovacích kondenzátorů (obr. 6). Upozorňuji, že hodnoty kapacit uvedené v dalším popisu jsou pouze orientační. Návrh konkrétních hodnot kapacit vychází ze vztahů, uvedených dále



Obr. 6 Příklad blokování

Ad 1: Vstupní konektor musí být opatřen filtračním 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 řádech C_1 a $C_8 \approx 10..1000\mu F$, přičemž $C_1 > C_8$, keramický kondenzátor $C_2 \approx 0,01..0,1\mu F$.

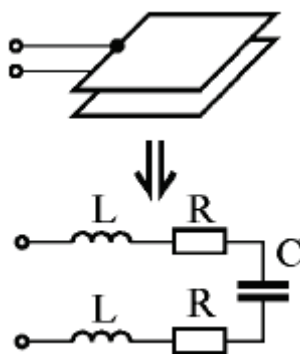
Ad 2: Každý integrovaný obvod nebo obecně každé dílčí zapojení, které se vyznačuje impulzní spotřebou (např., tranzistor + relátko, klopný obvod, zesilovací stupeň) musí mít svůj lokální kondenzátor (C_4 až C_7). Na tyto kondenzátory jsou kladeny náročné požadavky co do vysokofrekvenčních vlastností.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

Upozornění: Použití vývodového kondenzátoru 100 nF (M1) pro blokování číslicových obvodů může být HRUBÁ NÁ VRHÁŘSKÁ CHYBA.

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

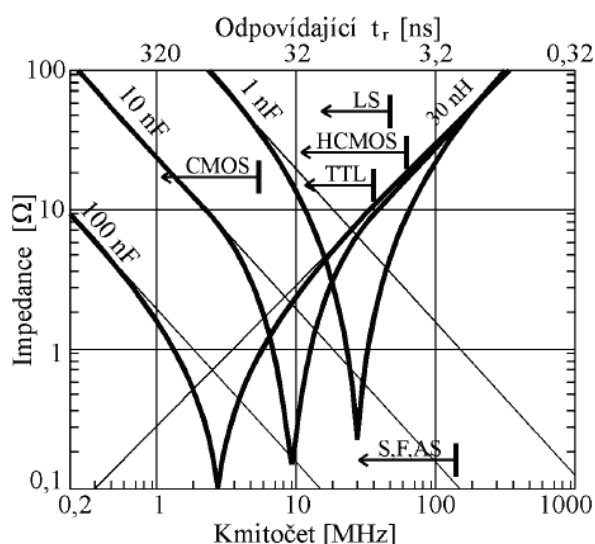
REÁLNÝ KONDENZÁTOR

Náhradní obvod reálného kondenzátoru (obr 7) se neskládá pouze z kapacity, nýbrž má navíc svoji parazitní indukčnost a odpor (přívodů). Znamená to tedy, že se jedná o RLC obvod, který bude mít vlastní rezonanční kmitočet (selfresonance) $\omega = 1/\sqrt{LC}$. Pro kmitočty pod vlastní rezonancí bude v impedanci kondenzátoru převládat kapacitní složka a pro kmitočty nad vlastní rezonancí potom induktivní složka. Při výběru vhodných blokových kondenzátorů tedy musíme sledovat právě katalogový údaj vlastní rezonance a používat vždy kondenzátory, jejichž vlastní rezonance je vyšší než nejvyšší kmitočet na DPS, přičemž rozhodující není délka trvání impulsu či jeho perioda, nýbrž jejich násobky a dále kmitočty, odpovídající náběžným ($1/\pi\tau_r$) a sestupným hranám ($1/\pi\tau_f$)

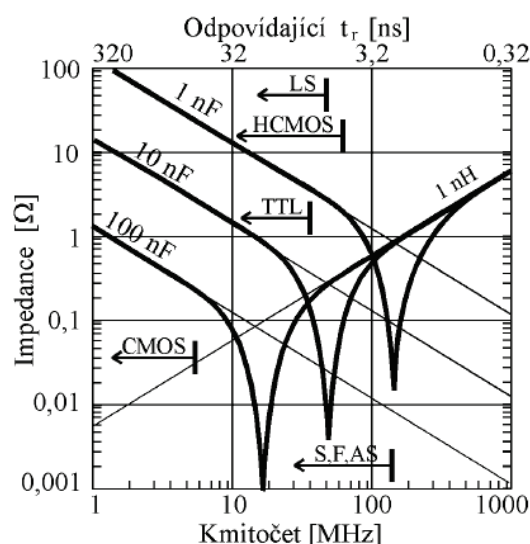


Obr. 7 Reálný kondenzátor

Na obr. 8 je znázorněna kmitočtová závislost impedance (minimum = vlastní rezonanční kmitočet) pro typické lokální blokové kondenzátory v provedení s vývody a SMD. Z obrázku je vidět, že vývodový keramický kondenzátor 100 nF má rezonanční kmitočet tak nízký, že jej nelze použít ani k blokování nejpomalejšího typu číslicového obvodu (CMOS). Uvedené grafy ovšem neuvažují parazitní indukčnost plošných spojů mezi příslušnou součástkou a jejím kondenzátorem, která rezonanční kmitočet ještě dále sníží !!!



Keramické kondenzátory s vývody 0,25"



Keramické kondenzátory SMD 0805

Obr.8 Vlastní rezonanční kmitočet a oblast použití jako lokální kondenzátor



DPS jako blokovací kondenzátor

Jestliže budeme potřebovat zároveň vysokou hodnotu kapacity i rezonančního kmitočtu, můžeme spojit paralelně několik kondenzátorů. Blokovací kondenzátor můžeme vytvořit též na vícevrstvé DPS, budou-li v jeho vnitřních vrstvách vedle sebe umístěny vodivé plochy napájení a společného vodiče (GND). Kapacita takového kondenzátoru se dá vypočítat podle vztahu a pohybuje se v řádu jednotek nF na 1 dm². Taková velikost kapacity nebývá dostatečná, a proto se používá pouze jako doplněk ke kondenzátorům za účelem snížení impedance díky svému velmi vysokému rezonančnímu kmitočtu, který se podle pro materiál FR4 pohybuje v rozmezí 200-400 MHz. Pozor na dodržení pravidla 20H (obr. 2).

Vytvoření "rozprostřeného" lokálního blokovacího kondenzátoru na DPS řeší najednou tyto problémy návrhu:

- Minimalizace plochy proudové smyčky napájení a ostatních spojů.
- Vysoký rezonanční kmitočet blokovacích kondenzátorů.
- Nízká parazitní indukčnost přívodů napájení mezi integrovaným obvodem a jeho lokálním kondenzátorem.

NÁVRH LOKÁLNÍHO BLOKOVACÍHO KONDENZÁTORU

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

$$C = \frac{1}{\frac{\Delta U}{\Delta t}} [F]$$

kde

- I představuje impulzní proudovou spotřebu obvodu I_p (obr. 7 a tabulka 1),
 ΔU je změna napětí, kterou připustíme po dobu proudového impulsu I_p (zpravidla maximálně 10-20 šumové imunity obvodů),
 Δt je doba trvání proudového impulsu (odpovídá náběžné nebo sestupné hraně t_r a t_f)

typ logiky	impulzní spotřeba [mA]	doba překlápění [ns]	šumová imunita [V]	kapacita na 1 hradlo [nF]
DL	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

Tab. 2 Kapacita lokálního kondenzátoru na jedno hradlo vybraných logických řad



Renomovaní výrobci v katalogových nebo aplikačních listech svých součástek uvádějí doporučený způsob blokování napájení (včetně velikostí kapacit kondenzátorů a vhodných materiálů jejich dielektrik).

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 přebíjení 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 s tím rozdílem, že za I musíme dosadit proud, potřebný pro nabití vstupních kapacit (I_L z obr. 7). Tento proud můžeme orientačně zjistit ze vztahu:

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

Kde

C_L je celková zatěžovací kapacita, která sestává jednak ze vstupních kapacit řízených obvodů a jednak z parazitní kapacity plošného spoje,

ΔU_{CL} je napěťový rozkmit na kapacitní zátěži C_L (zpravidla se za ΔU_{CL} dosazuje napájecí napětí),

Δt je doba překlápění (náběžná nebo sestupná hrana t_r a t_f).

NÁVRH FILTRAČNÍHO KONDENZÁTORU

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

1. Základním problémem je určení velikosti proudového odběru ΔI_{CC} . Zpravidla se postupuje tak, že se sečtou všechny proudy typu I_p a I_L , tedy odhadne se vlastní impulzní spotřeba všech obvodů na DPS a přičte se k nim proud, tekoucí do obvodů mimo navrhovanou DPS.
2. Dále je nutné určit přípustné zvlnění (šum) napájení ΔU_{CC} , které u číslicových obvodů představuje část šumové imunity (například 10%), u analogových obvodů 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:

$$Z_{PWR} \frac{\Delta U_{CC}}{\Delta I_{CC}} \quad [\Omega]$$

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

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

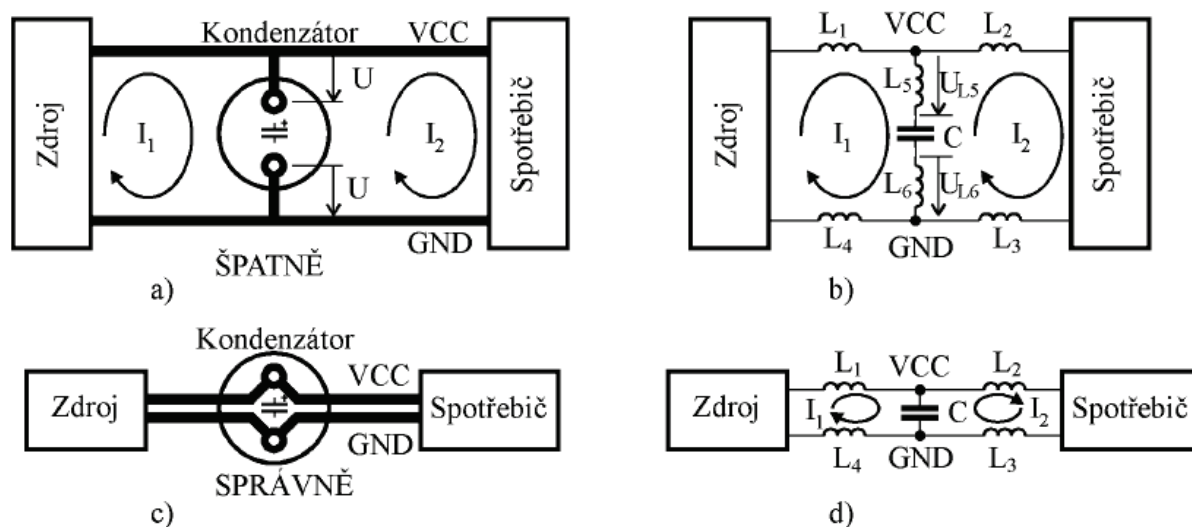


Indukčnosti přívodů napájení mezi zdrojem a DPS L_{PSW} se ve většině běžných případů se tato indukčnost pohybuje v řádu 10 nH/cm.

Výše uvedená konstrukce výpočtu slouží pouze pro určení řádové 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 typů kapacit, potvrdit zkušebním měřením zvlnění napájení a ověřením správné funkce zařízení.

UMÍSTĚNÍ BLOKOVACÍCH KONDENZÁTORŮ NA DPS

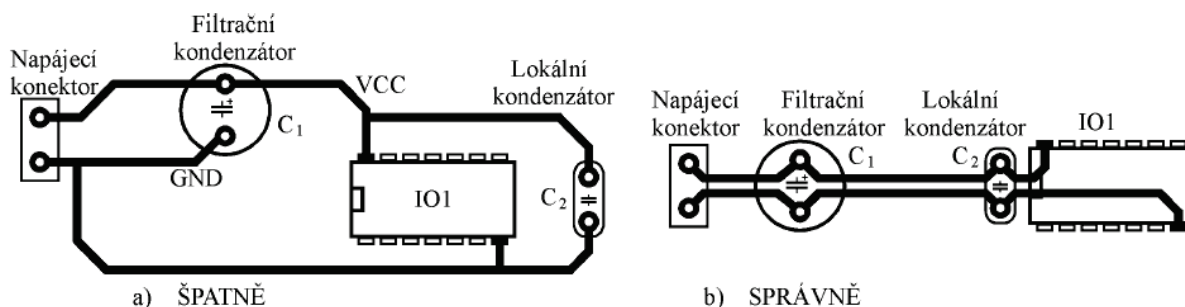


Obr. 9 Typické problémy umístění blokovacích kondenzátorů

Pro všechny typy blokovacích kondenzátorů platí srovnatelná pravidla pro jejich správné umístění a s tím související vedení spojů (obr. 9 a 10).

- Kondenzátor musí být umístěn vždy na cestě mezi zdrojem a spotřebičem.
- Veškeré spoje musí být navrženy tak, aby plocha proudových smyček byla co nejmenší.
- Minimalizace impedancí spojů (především parazitních indukčností L_1 , až L_4 dle obr. 9c) ad) = co nejkratší spoje, použití vodivých ploch.
- Proudové smyčky zdroj - kondenzátor (I_1) a kondenzátor- spotřebič (I_2) by měly mít minimální společnou spojovou dráhu. Chybně navržené vedení spojů na obr. 9a) způsobí rušivé úbytky napětí na parazitních indukčnostech L_5 a L_6 .

Na obr. 1a) jsou vidět nejčastější chyby při návrhu blokování. Především je zde chybně umístěný lokální kondenzátor C_2 , všechny plochy proudových smyček jsou extrémně velké a uzel GND má chybně vedený spoj mezi $C1$ a $IO1$.



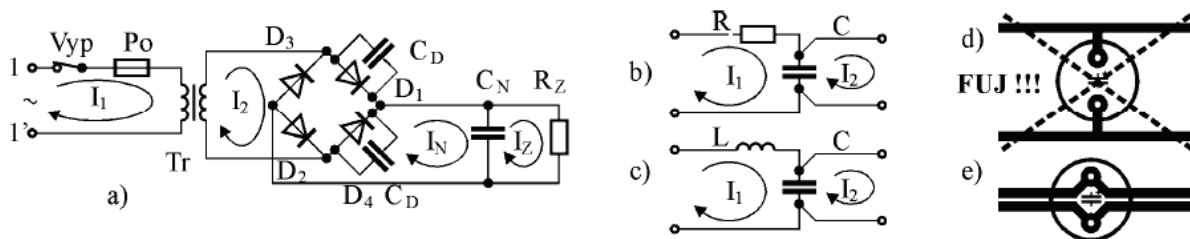
Obr.10 Nejčastější chyby při návrhu blokování

1.2.3 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 konvertorů atd. To je velmi rozsáhlá problematika, hodná samostatné publikace. V následující části si proto všimneme především návrhu DPS usměrňovačů, filtrů 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 obr. 11a) je nakresleno jeho základní schéma. Z hlediska správného návrhu DPS je důležité dodržet následující pravidla:

- Plochy smyček jednotlivých proudů I_1, I_2, I_N a I_Z musí být co nejmenší.
- Síťové svorky 1 a 1' vypínač, pojistka a svorky primárního vinutí transformátoru by měly být fyzicky lokalizovány v jedné části přístroje blízko sebe. Varianta, kdy svorky, pojistka a transformátor jsou v zadní části přístroje a vypínač na předním panelu, není vhodná. Všimněte si, že "elektromagneticky tichý" přístroj nikdy nemá hlavní síťový vypínač na čelním panelu, nýbrž na zadním panelu společně v jednom bloku se síťovým přívodním konektorem, pojistkou a filtrem.
- Pozor na izolační vzdálenosti všech spojů primárního obvodu a též na vzdálenosti mezi prvky primárního a sekundárního obvodu.
- Layout spojů kondenzátoru C_N musí být navržen podle obr. 11e). Mějme na paměti, že proud I_N je impulzní povahy a jeho amplituda několikanásobně převyšuje hodnotu stejnosměrného I_Z . Stejná pravidla platí i pro kondenzátory RC a LC filtrů z obr. 11b)ac).
- Kondenzátory C_D , přemostňující 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 krátké (= s vysokofrekvenčními složkami) a mohly by způsobovat nežádoucí rušení. Kondenzátor C_D snižuje velikost impulzu I_N a prodlouží dobu jeho trvání (pozor, musí platit $C_D \ll C_N$).

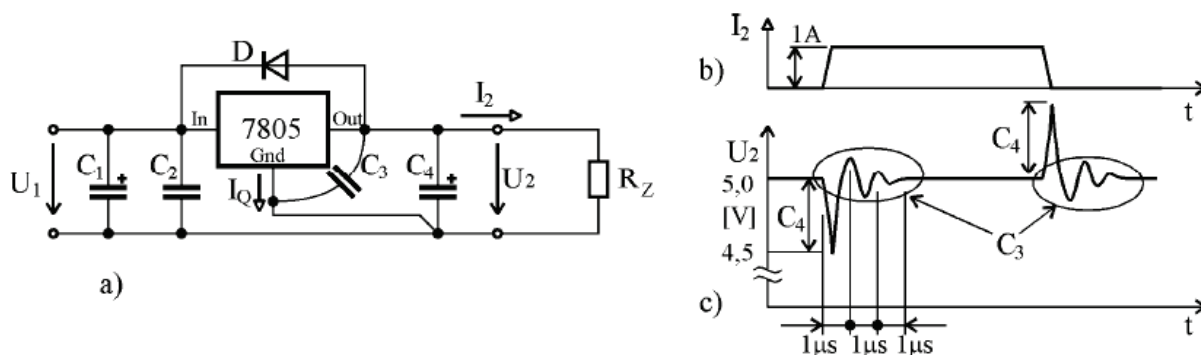


Obr.11 Usměrňovač, filtry a layout přívodu spojů ke kondenzátoru

ANALOGOVÉ STABILIZÁTORY

Typickým představitelem analogového stabilizátoru je obvod 7805 - tří svorkový stabilizátor napětí 5V / 1 A a L200 - pěti svorkový stabilizátor, který je obdobou 7805 s možností regulace napětí a proudového omezení. U všech obvodů tohoto typu platí, že se musí patřičně "ověsit" kondenzátory. Zároveň je nutné dodržet správný layout spojů.

Na obr. 12a) 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 C1 je možné v případě krátké vzdálenosti vstupních svorek od usměrňovače s filtračním kondenzátorem C_N vypustit (do cca 20cm). Kondenzátor C2 eliminuje parazitní impedanci přívodů (100 .. 330 nF). Prakticky nejdůležitější součástí je C3. Úkolem tohoto kondenzátoru je kmitočtová kompenzace výstupu stabilizátoru. Velikost jeho kapacity má vliv na amplitudu i kmitočet zámků při impulzním zatížení (obr. 12c). Proto je velmi důležité umístit jej bezprostředně k vývodům stabilizátoru. Výrobci doporučují jeho kapacitu zpravidla 100 nF. Kondenzátor C4 zásobuje zatěžovací obvod energií vždy v okamžiku, kdy zpětná vazba stabilizátoru teprve začíná reagovat na změnu výstupního napětí, způsobenou změnou odběru proudu I₂. Jeho hodnota se dá určit ze vztahu , kde za I dosadíme velikost odběru, za ΔU velikost zvlnění, které připustíme, a za Δt dobu odezvy stabilizátoru na změnu odběru (obr. 12c). Například pro impulzní odběr 1 A při požadovaném zvlnění 10 mV a při Δt=3μs bude $C_4 = I \cdot \frac{\Delta t}{\Delta U} = 330 \mu F$



Obr. 12 Zapojení stabilizátoru a vliv kondenzátorů na stabilizaci napětí při impulzní zátěži

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 (obr. 12a).

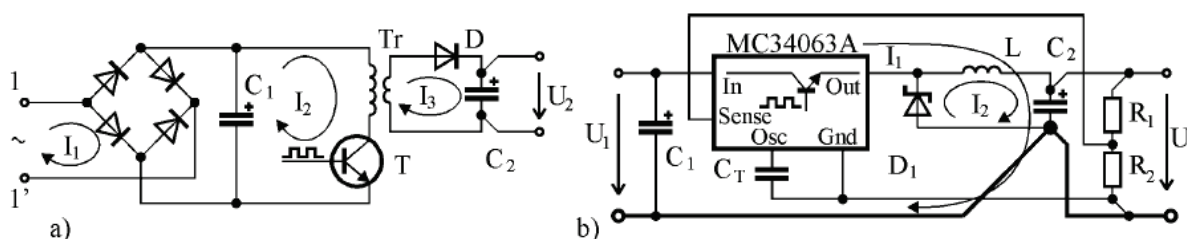


Dioda D chrání stabilizátor pro případ, že při zkratu na vstupu (U_1) bude $U_2 > U_1$, což je pro stabilizátor nepřijatelný režim. Z hlediska návrhu DPS ovšem nejsou pro zapojení této součástky kladeny žádné závažné požadavky.

U analogových stabilizátorů obecně platí dobře prostudovat jejich katalogové a aplikační listy. Doporučuji striktně dodržovat doporučené zapojení včetně hodnot a typů součástek a vzít si inspiraci pro návrh layoutu a chlazení podle katalogových listů výrobce. Z vlastních zkušeností vím, že jakékoliv významné změny v zapojení i doporučeném layoutu se vymstí v podobě nesprávné funkce stabilizátoru (záškvy, nesprávná regulace). Je vhodné věnovat pozornost jeho vnitřnímu zapojení. Mnohdy mají stabilizátory integrovaný kondenzátor typu C_3 případně i diodu D z obr. 12a). Je-li například v katalogovém listu 3,3 V stabilizátoru uvedeno, že v zapojení ekvivalentním obr. 12a) není použit kondenzátor typu C_3 a na místě C_4 je doporučen tantalový kondenzátor „jen“ 10 μF , neexperimentujme a udělejme, co katalog doporučuje. Doplnění o C_3 100nF může znamenat rozkmitání stabilizátoru a například výstupní napětí 6 V na místo požadovaných 3,3 V. To je má vlastní zkušenost.

1.2.4 SPÍNANÉ ZDROJE

S rozvojem spínacích součástek se rozšiřují možnosti využití spínaných zdrojů. Při jejich realizaci je ovšem nutné věnovat maximální pozornost právě návrhu plošných spojů. Na obr.13 jsou uvedeny dva nejrozšířenější principy spínaných zdrojů s transformátorem a indukčností. Pracovní kmitočet se pohybuje zhruba okolo 100 kHz a jednotlivými proudovými smyčkami tečou značné proudy. Při chybném návrhu může docházet k nepřijatelnému vyzařování elektromagnetického rušení a k nadměrnému zvlnění výstupního napětí.



Obr. 13 Pravidla pro návrh spínaných zdrojů

Při návrhu rozmístění součástek a vedení spojů spínaného zdroje s transformátorem (obr. 13a) je nutné dodržovat především tyto zásady:

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

Při návrhu rozmístění součástek a vedení spojů spínaného zdroje s indukčností (obr. 13b) je nutné dodržovat především tyto zásady:

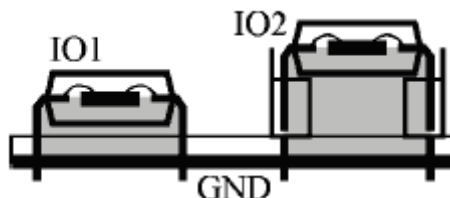
- Minimalizace plochy proudové smyčky I_2 správným rozmístěním součástek i vedením spojů. Při sepnutí tranzistoru v integrovaném obvodu začne protékat obvodem L - C_2 proud I_2 . Po vypnutí tranzistoru převezme tento proud dioda $D1$ (smyčka I_2) v původní výši. To znamená, že v okamžiku vypnutí tranzistoru dochází k proudovému skoku I_2 z nulové hodnoty na maximální.
- Výstupní napětí U_2 má být opět vyvedeno z bodů, které se nacházejí bezprostředně u vývodů kondenzátoru C_2 . I zde se často používá paralelní zapojení většího počtu kondenzátorů.
- Společný vodič GND integrovaného obvodu včetně všech podpůrných obvodů (C_T), snímací svorku Sense a dělič $R_1 - R_2$ je nutné zapojit co nejbližší k výstupním svorkám, respektive k zátěži. Jejich propojení je nutné provést v souladu s obr. 13b).
- V okamžiku sepnutí tranzistoru v integrovaném obvodu dojde ke skokové změně napětí na vstupu do L z téměř nuly (U_{FDI}) na U_1 . Proto musí být citlivé spoje (například zpětná vazba do pinu Sense) vedeny dále od spoje, vedoucího do vstupu indukčnosti L .
- 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 $1\mu\text{H}$, $100\mu\text{F}$) s návrhem layoutu ve smyslu obr. 13c).

1.2.5 ČÍSLICOVÉ OBVODY

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

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



Obr. 14 Vliv patie



PRAVIDLA SOUVISEJÍCÍ S NÁVRHEM SCHÉMATU MINIMALIZACE IMPULZNÍCH PROUDŮ:

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

Minimalizace ploch proudových smyček:

- Vhodná koncepce sběrnic a napájení (včetně rozložení pinů na konektorech).
- Využití SMD součástek (jsou menší než součástky s průchozími vývody).
- Výběr součástek s napájecími vývody proti sobě (obr. 6) - možnost blokování napájení SMD kondenzátorem zdola přímo v místě napájecích vývodů.
- Výběr vhodných typů blokovacích kondenzátorů z hlediska možnosti jejich umístění u mateřských součástek a způsobu jejich vzájemného propojení.
- Nepoužívat patice u velmi rychlých součástek (obr. 14).

Minimalizace vyšších složek kmitočtového spektra:

- Nepoužívat zbytečně rychlé součástky a řady logických obvodů (tabulka 1).
- Návrh vhodného systému přenosu dat (sériový, paralelní, rychlost přenosu).

Zachování co nejvyšší šumové imunity:

- Impedanční přizpůsobení dlouhých spojů.
- Blokování napájení za účelem udržet co nejmenší zvlnění napájení.
- Nepoužívat zbytečně rychlé součástky a řady logických obvodů (tabulka 1).
- Nezpracovávat vstupně/výstupní signály s jinými, nesouvisejícími (například hodinami), v jednom integrovaném obvodu (není-li k tomu určen).

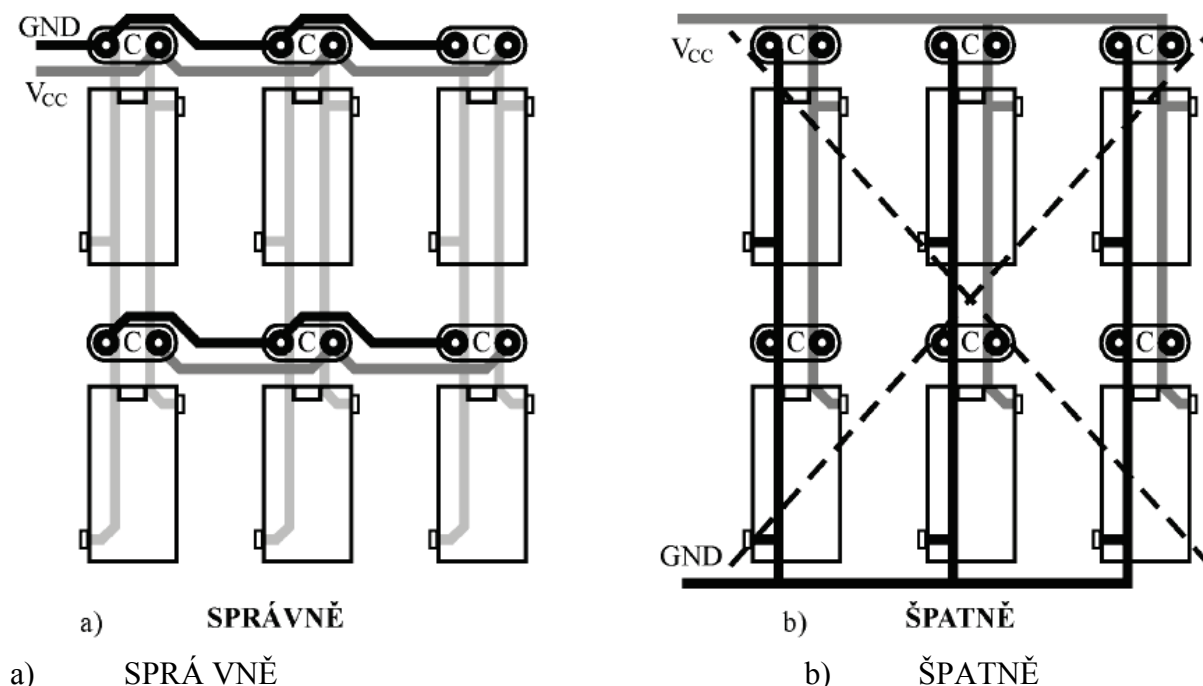
PRAVIDLA SOUVISEJÍCÍ S NÁVRHEM ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK A VEDENÍ SPOJŮ

Správné řazení vrstev DPS - pro číslicové obvody je vhodné použít vícevrstvé desky plošných spojů (tabulka 1). Vnitřní vodivé plochy GND a Vcc vytvářejí blokovací kondenzátor s vysokým rezonančním kmitočtem, snižují parazitní indukčnost signálových spojů a vůbec představují nízko impedanční rozvod napájení i společného vodiče. Tyto plochy zároveň automaticky významně snižují plochy proudových smyček na DPS. Pozor na pravidlo 20H a syndrom "švýcarského sýra"!

Při použití pouze dvoustranné DPS je nutné zvolit optimální způsob zemnění a s tím související rozvod napájení. Je-li to alespoň trochu možné, je vhodné při SMD montáži využít stranu součástek (TOP) pro vedení všech spojů a kladného napájení. Stranu BOTTOM potom použít pro vodivou plochu připojenou ke společnému vodiči (GND) a občasné krátké



signálové můstky. U klasické montáže v zastaralých konstrukcích je nouzově doporučen návrh rozmístění součástek a vedení napájení dle obr. 16a). V jedné vrstvě napájení a signálové spoje vedeno vodorovně a ve druhé svisle, čímž neutrpí propojitelnost signálových spojů. Ovšem rozhodně je nutné se vyvarovat systému napájení z obr. 15b)!!! (= velké plochy napájecích proudových smyček).



Obr. 15 Zastaralé nouzové řešení napájení číslicových obvodů při absenci vodivé plochy GND

- Rozmístění součástek je nutné provést tak, aby signálové spoje byly co nejkratší.
- Při dlouhých paralelních signálových spojkách je nutné mít na paměti nebezpečí přeslechů. Maximální délka paralelně vedených signálových spojů (ve třídě přesnosti 4) pro obvody řady TTL a LS 25 cm, S, F, AS 15 cm, HCMOS 13 cm, přičemž ze vztahů pro vzájemné kapacity a indukčnosti vyplývá, že tato vzdálenost může být vyšší v případě větší vzájemné vzdálenosti signálových spojů, podložení signálových spojů vodivou plochou společného vodiče, případně po vřazení společného vodiče přímo mezi signálové spoje.
- Všechny spoje by měly být vedeny pod úhlem 45°. Při vedení pod úhlem 90° dochází k podleptání rohů, což má za následek změnu impedance, která může být příčinou vzniku odrazů.

1.2.6 OBVODY HODINOVÝCH IMPULZŮ

Obvody hodinových impulzů generují zpravidla průběhy napětí (resp. proudů) s nejvyšším kmitočtem i nejstrmějšími náběžnými i sestupnými hranami z celého elektronického obvodu. Dá se tedy říci, že mohou být největším zdrojem rušení na celé DPS. Proto je třeba těmto obvodům věnovat maximální pozornost. Nejdůležitější zásadou je minimalizace plochy proudových smyček.

- Součástky musí být rozmístěny tak, aby spoje mezi nimi byly co nejkratší.



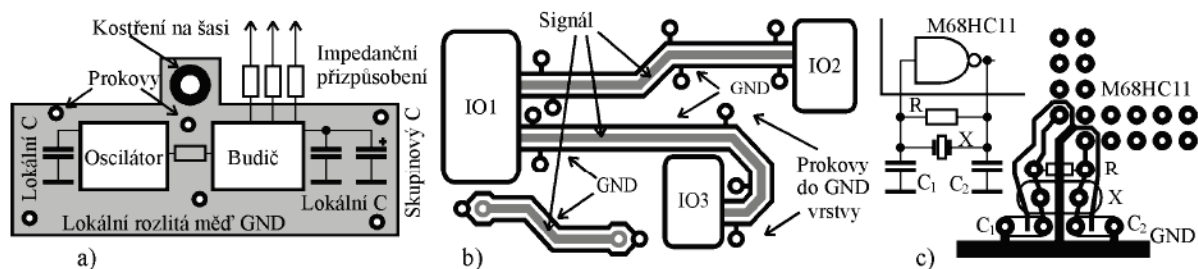
- Zároveň platí pravidlo důsledné fyzické separace těchto součástek a jejich spojů od ostatních obvodů, především od vstupně/výstupních. Hrozí totiž možnost jejich vzájemné elektromagnetické vazby, a tedy nepřipustné vyzařování do kabeláže, případně naopak - rušení, které přichází po vstupně/výstupních vodičích může způsobit špatnou funkci rychlých obvodů hodin.
- Součástky mají být vkládány přímo do DPS bez patic (obr. 14).
- Na DPS 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 prokůvů ke společné napájecí zemi ve vnitřní vrstvě DPS, případně pomocí šroubku kontaktována na šasi přístroje (obr. 16a).
- Lokální plochou GND nesmí vést žádné signálové spoje.
- Všechna kovová pouzdra součástek musí být připojena k lokální GND.
- Signálové spoje se potom vedou v nejbližší další spojové vrstvě. U4 a 2vrstevných desek tedy až ze strany spojů (zdola).
- Oblastí hodinových obvodů nesmí v žádné vrstvě procházet nesouvisející spoje.
- Při propojování je třeba udržovat nízkou a hlavně konstantní impedanci spojů. Toho lze docílit jednak vedením spojů pod úhlem 45° , a to pouze nad lokální vodivou plochou, připojenou ke společnému vodiči, a dále pomocí takzvaných ochranných paralelních spojů (bude popsáno dále).
- Při návrhu spojů je nutné zohlednit konečnou rychlost šíření signálu plošným spojem, včetně vlivu kapacitní zátěže.
- Velkou pozornost je třeba věnovat filtraci a blokování napájení.
- U konektorů, vedoucích signál hodin mimo desku plošného spoje, je nutné zakončit hodinový spoj příslušnou impedancí.

OCHRANNÉ PARALELNÍ SPOJE

Jedná se o spoje, kterými se obklopí kritické signálové spoje a které jsou na několika místech připojeny pomocí prokůvů do vrstvy GND (obr. 16b). Takové obklopení se částečně chová jako koaxiální kabel, tedy sníží riziko přeslechů, sníží 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 bezprostředně nejbližší vrstvě DPS.

Konkrétní příklad návrhu spojů hodin pro běžný mikroprocesor je na obr. 16c. Je vidět, že oba signálové spoje tvoří minimální plochu proudové smyčky. U vyšších kmitočtů je vhodné v nejbližší sousední vrstvě vytvořit ničím nepřerušovanou vodivou plochu GND.





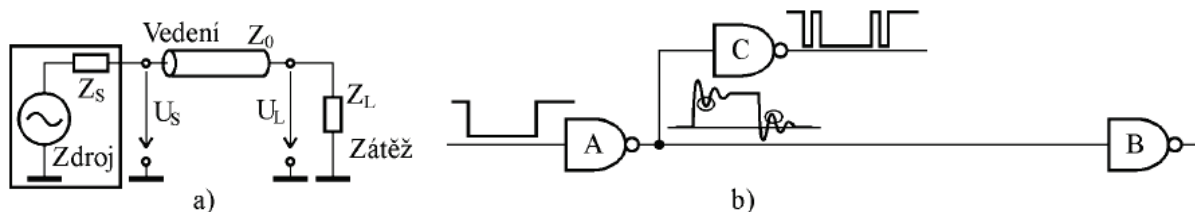
Obr. 16 a) Uspořádání lokální země; b) ochranné paralelní spoje, c) příklad návrhu

ODRAZY NA VEDENÍ A JEJICH POTLAČENÍ

Plošné spoje, stejně jako každé jiné elektrické vodiče, 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 průchodu 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 hovoříme o elektricky dlouhých spojích.

Systém přenosu signálu můžeme nakreslit jako soustavu, která má zdroj signálu s výstupní impedancí Z_S , vedení má impedanci Z_0 a zátěž Z_L (obr. 17 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 těm totiž dochází v místech se změnou impedance. Z toho plynou pro návrh plošných spojů dvě základní myšlenky:

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



Obr. 17 Typická přenosová soustava a odrazy na vedení

Impedance plošného spoje je víceméně dána technologickými možnostmi výroby a máme možnost ji při běžných návrzích na materiálu FR4 nastavit vhodnou konfigurací rozměrů a vrstev v rozmezí 50 až 200 n. To tedy znamená, že při návrhu schématu je nutné pro elektricky dlouhé spoje navrhnout impedanční přizpůsobení, a to jak na straně zdroje, tak na straně zátěže.

Nebezpečí odrazů na nepřizpůsobeném vedení je vidět z obr. 8b). 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



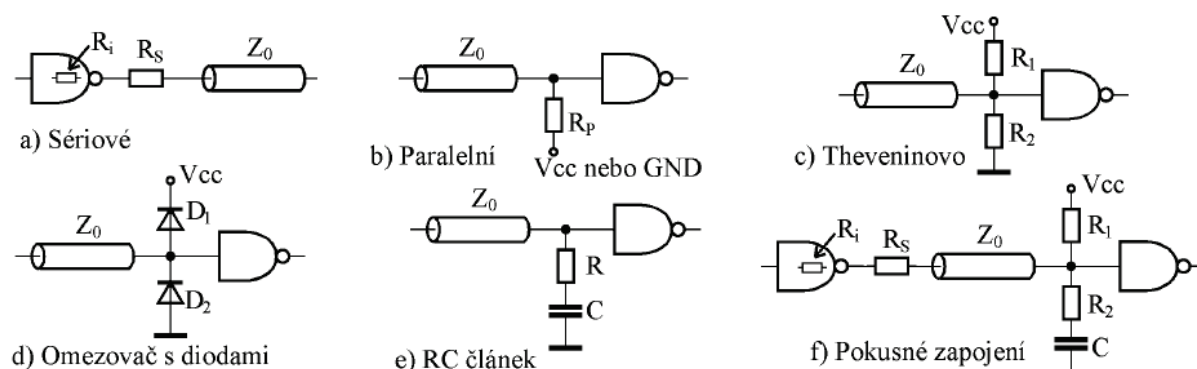
situace lze jednoduše určit pravidlo pro určení délky spoje, který musí být impedančně přizpůsobený:

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

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

$$L_{max} = \frac{t_s}{2 \cdot t'_{pd}}$$

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



Obr. 18 Metody impedančního přizpůsobování

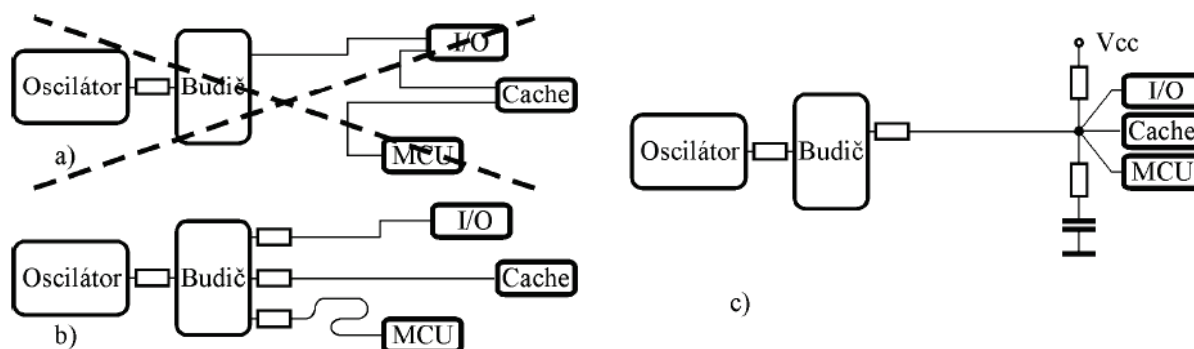
Na obr. 18 jsou uvedeny základní metody impedančního přizpůsobování výstupů i vstupů číslicových obvodů za předpokladu, že jejich výstupní odpor je menší a naopak vstupní odpor je větší než impedance vedení Z_0 .

- Sériové přizpůsobení (obl: 18a) 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 přizpůsobení (obr. 18b) se používá ke snížení vstupní impedance. Zanedbáme-li velikost vstupního odporu hradla, bude $R_p = Z_0$. Podle požadavků 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 přizpůsobení (obr. 15c) je obdobou paralelního zapojení. Hodnoty odporů rezistorů R_1 a R_2 se volí tak, aby $R_1 \parallel R_2 = Z_0$. Výhoda tohoto zapojení proti paralelnímu je v tom, že je možno nastavit poměr odporů podle zatížitelnosti budícího obvodu, který může být jiný při logické nule a jiný při logické jedničce.
- RC článek (obr. 18e) je z hlediska zatížení budícího obvodu nejvhodnější zapojení paralelního přizpůsobení. Hodnota odporu rezistoru R se volí shodná s impedancí Z_0 a velikost kapacity kondenzátoru C se určí tak, aby časová konstanta $\tau = R \cdot C \geq 2 \cdot t'$. Znamená to tedy, že pro rychlé přechodové děje se bude RC článek chovat jako dokonalé impedanční přizpůsobení a v ustáleném stavu bude jeho impedance vysoká a nebude tedy zatěžovat budící obvod.



- Omezovač s diodami (obr. 18d) není impedančním přizpůsobením v pravém slova smyslu. Toto zapojení pouze omezí napět'ové překmitý vyšší než je napájecí napětí (D_1) a nižší než je nulový potenciál společného vodiče (D_2).

Zvolit při návrhu schématu správný způsob přizpůsobení a určit přesné hodnoty jeho součástek je zpravidla obtížné, a proto se u pokusných a vývojových zařízení používá zapojení z obr. 18f, které je průnikem předchozích zapojení, a jednotlivé součástky se osadí podle potřeby až při ožívování obvodu



Obr. 19 Přizpůsobování a princip vedení spojů hodin

Na obr. 19 je znázorněn způsob vedení spojů hodin mezi jednotlivými funkčními bloky. Jsou-li jednotlivé bloky rozptýleny po DPS, je nutné volit variantu b) a snažit se dodržet stejnou délku spojů k jednotlivým blokům. V případě těsné blízkosti bloků je možno použít variantu c). Rozhodně je třeba se vyvarovat varianty a), která mimo jiné díky konečné rychlosti šíření signálu představuje nestejné časování jednotlivých bloků. Předpokládá se, že spoje budou po celé své délce podloženy vodivou plochou GND, případně dále obklopeny ochrannými paralelními spoji.

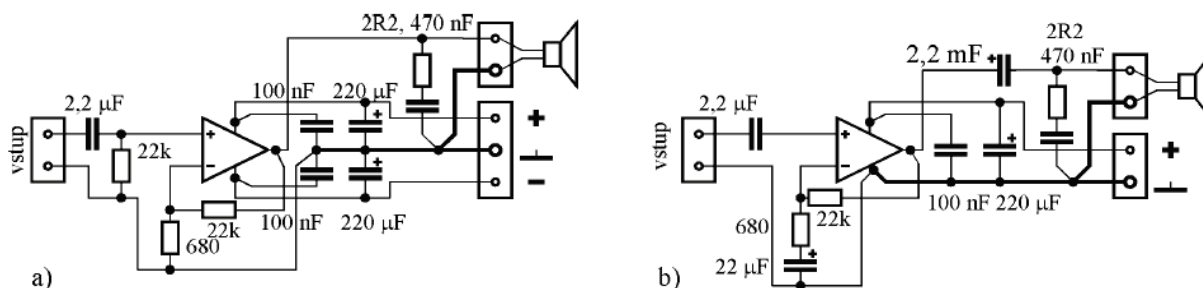
1.2.7 ANALGOVÉ OBVODY

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

Při návrhu rozmístění součástek a jejich propojování je třeba věnovat velkou pozornost otázce přeslechů. Ty mohou vznikat nejen kapacitní a induktivní vazbou, ale i galvanickou vazbou při chybném návrhu spojů napájení a hlavně společného vodiče (země). Proto právě zemnění je u obvodů tohoto typu velmi choulostivá záležitost. Na obr. 20 jsou uvedeny dva nejčastější příklady výkonových zesilovačů se symetrickým a nesymetrickým napájením. Schémata jsou na první pohled nepřehledná a neuspořádaná, ale to je tím, že je na nich znázorněn způsob zemnění a připojení napájení včetně správného zapojení blokovacích kondenzátorů. Tučnou čarou je znázorněna výkonová zem a je velmi důležité najít správné místo, kde k ní bude připojena nízko výkonová (vstupní) zem. Mělo by to být takové místo, kde se nemůže stát, že se úbytek napětí na výkonovém zemním spoji sečte se vstupním signálem a projeví se tak jako rušení (galvanická vazba). Upozorňuji, že i když záporná zpětná vazba zesilovače vychází z výkonového výstupu zesilovače, musí být zemněna do vstupní části země. V případě, že bude vstupní část napájena z dodatečně filtrovaného napájení, je nutné provést



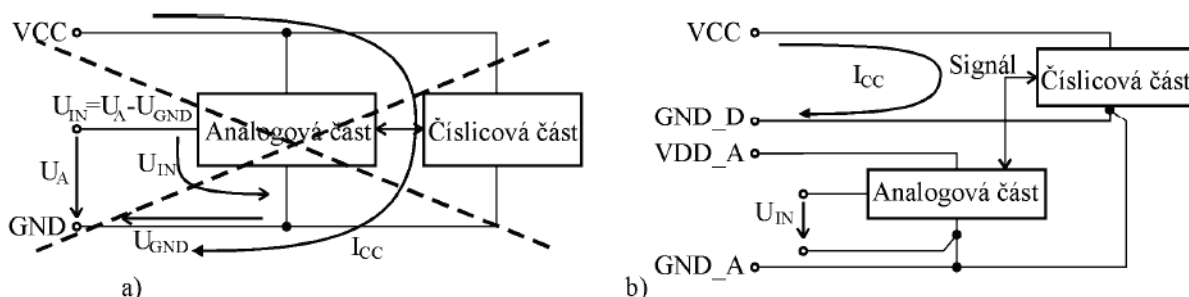
layout spoju dle pravidel z obr. 20b), c), e). Velmi důležité je též vhodně navrhnout rozmístění součástek tak, aby se v žádném případě nenacházely vstupní části obvodu vedle výkonových (přeslechy). Znamená to tedy, že je dobré při návrhu rozmístění součástek na plošném spoji a umístění konektorů na hotovém zařízení dodržet geometrii odpovídající schématu - vstupní citlivá část na jedné straně a výkonový výstup a napájení na straně protější.



Obr. 20 Propojování zesilovačů a) se symetrickým, b) s nesymetrickým napájením

1.2.8 A/D PŘEVODNÍKY

A/D převodníky, jak vyplývá z jejich názvu, převádějí analogový signál na číslicový. To znamená, že na jedné desce plošného spoje se nachází jak citlivá analogová část, tak i silně rušící číslicová část. Proto je nutné věnovat pozornost jejich vzájemnému propojení. Na obr. 21a) je vyznačen jeden z velkých problémů koexistence analogového a číslicového obvodu na jedné desce. Tím je napájení a zemnění. Je vidět, že při nevhodném propojení se bude úbytek napětí U_{GND} , vzniklý průtokem zpravidla impulzního napájecího proudu I_{CC} odečítat od vstupního napětí U_A , a tím způsobovat nezanedbatelné rušení. Bude-li v analogové části například 12 bitový převodník, může taková chyba v zapojení představovat snížení přesnosti převodu o několik bitů. Na obr. 21b) je navržen správný způsob propojení. Jakýkoliv úbytek napětí na číslicové zemi GND_D již neovlivňuje analogový vstupní signál, neboť proud I_{CC} již neprochází analogovou vstupní smyčkou.



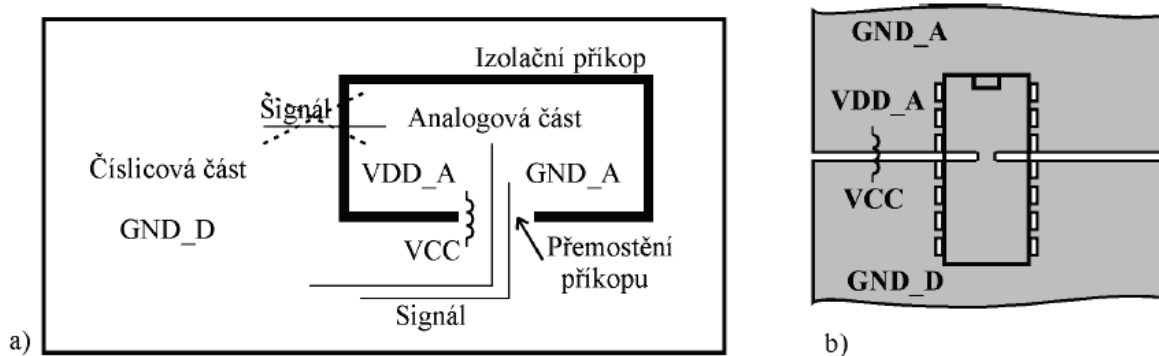
Obr. 21 Propojování analogové a číslicové části obvodu

Pozornost musíme věnovat i rozmístění součástek na DPS. Základní princip realizace analogové a digitální části na jedné desce je znázorněn na obr. 22a). Předpokládejme, že jedna vrstva DPS je vyhrazena pouze společnému vodiči (zemi) jako vodivé ploše. Všechny analogové součástky musí být lokalizovány do jedné oblasti a elektricky separovány od číslicové části pomocí izolačního příkopu. V místě izolačního příkopu nesmí být v žádné vrstvě DPS veden žádný vodič. Pouze v jednom místě je možno (nutno) propojit analogovou (GND_A) a číslicovou (GND_D) zem. Tomuto místu se říká přemostění izolačního příkopu. Jedná se vlastně o praktickou realizaci zapojení z obr. 21b).



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

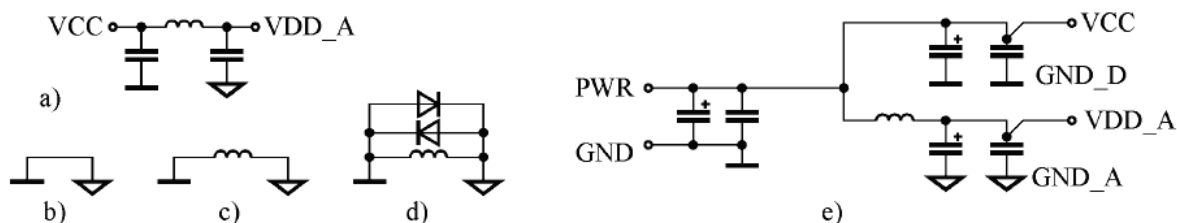
Na obr. 22b) je uveden příklad propojení analogové a číslicové země, je-li analogová i číslicová část tvořena pouze jedním integrovaným obvodem. Integrované A/D převodníky mají totiž vývody analogové a číslicové části uspořádané tak, aby je bylo možné jednoduše elektricky separovat. V takovém případě je vhodné dbát doporučení výrobce integrovaného obvodu, který obvykle v aplikačních listech uvádí správný způsob zemnění.



Obr. 22 Rozmístění součástek A/D převodníků a způsob zemnění na DPS

Z předchozích obrázků je patrné, že je velmi důležitá též otázka napájení převodníku a provedení propojení společného vodiče (země). 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.

Na obr. 23 jsou vyobrazeny některé možnosti filtrace a propojení. Zapojení a) znázorňuje nejpoužívanější princip filtrace napájení. Někdy (například u 8bitových převodníků) se tlumivka nahrazuje rezistorem. Části b), c) a d) znázorňují způsoby propojení číslicové a analogové země. Příklad b) se používá tehdy, mají-li být obě země 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 země nesmí překročit určitou mez, přemostí se tato tlumivka například antiparalelním zapojením dvou rychlých, nejlépe Schottkyho diod d). Případně e) potom znázorňuje příklad doporučeného zapojení filtrace napájení. Za zmínku stojí, že výstupní napětí VDD_Ai VCC je nutné odebírat z místa, které se nachází co nejbližže svorkám kondenzátorů. Opět platí pravidlo, že konkrétní zapojení a hodnoty součástek je vhodné zjistit z katalogových a aplikačních listů použitých součástek.



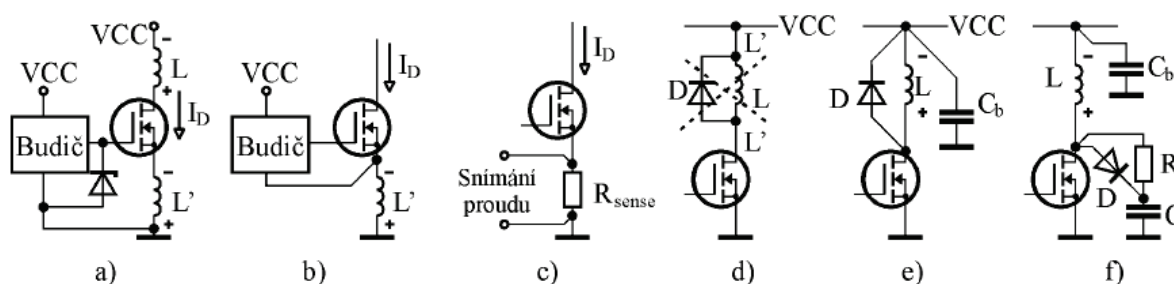
Obr. 23 Příklady propojení společného vodiče (země) a napájení u A/D převodníků



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 DPS. Parazitní indukčnosti součástek můžeme ošetřit ochrannými prvky (diody, RCD ochrana atd.), ale parazitní indukčnosti spojů můžeme omezit pouze správným návrhem desky. A to není vůbec jednoduché. Musíme si uvědomit, že již při spínání proudů 10 až 100 A a vypínacích dobách tranzistorů 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 spojů využít všech technik, směřujících ke snížení parazitních indukčností plošných spojů (široké spoje, vodivé plochy, minimální plochy smyček).

Na obr. 24a) a b) jsou nakresleny dva způsoby propojení budiče 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 budiče. Bude-li toto napětí vyšší než prahové (2V), dojde ke krátkodobému pootevření tranzistoru. A nyní otázka: "Je 10 žádoucí?" Nedivme se, ale někdy ano! Jedná se totiž o způsob ochrany tranzistoru před překmitem, způsobeným zatěžovací indukčností L . Tranzistor při onom pootevření odčerpá přebytečnou energii z induktivní zátěže L , která by se jinak projevila jako napěťový překmit. Zapojení může pracovat pouze za přítomnosti ochranné Zenerovy diody (15 V). Ve většině případů ovšem budeme používat variantu z obr. 24b) a společný vodič budiče zapojovat co nejblíže tranzistoru. Některé výkonové součástky mají dokonce tento bod vyvedený na samostatnou svorku. Ochranu proti napěťovému překmitu budeme potom řešit jiným způsobem, například pomocí diody nebo RCD obvodem.



Obr. 24 Buzení MOSFETu, snímání proudu a zapojení ochran

Parazitní indukčnosti přívodů L_g a L_g' z obr. 624b) musí být co nejmenší - při vypínání tranzistoru by jinak mohla parazitní zpětnovazební kapacita C_{GD} způsobit chvilkové zvýšení napětí V_{gs} a tedy i částečné a nedokonalé sepnutí tranzistoru vedoucí k jeho přetížení a destrukci. V praxi to znamená vzdálenost budiče a výkonového tranzistoru maximálně 1" až 2"!

Snímání proudu dle obr. 24c) je nutné na DPS provést tak, že vodiče C_a a C' musí být vedené jako diferenční pár k rozdílovému zesilovači. Vodič C' , byť je to vlastně GND, musí být připojen ke společnému vodiči pouze a jen v místě R_{sense} .

Ochranné obvody je nutné také správně propojit. Chceme-li chránit tranzistor, nesmíme dopustit, aby docházelo k napěťovým překmitům ani na parazitních indukčnostech plošného spoje L' (obr. 24d). Správné zapojení je tedy na obr. 24e) a f). Předpokládám, že není nutné

připomínat snahu o dosažení co nejmenších ploch proudových smyček L-D v obr. 24e) a dále L-D-C a C-R-tranzistor v zapojení obr. 24f).

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 s přijatelným nárůstem napětí. Bude-li indukčnost 20 nH, proud 1 A a povolený nárůst napětí 0,1 V, vyjde hodnota kapacity $C_b = L \cdot \frac{I^2}{U^2} = 2\mu F$. Použijeme vyšší hodnotu, například 22 μF , nejlépe v provedení tantalový elektrolyt, nebo paralelní kombinaci keramického kondenzátoru 100 nF a hliníkového elektrolytického kondenzátoru 220 μF . Toto je také způsob blokování většího množství relé. Je-li na DPS umístěno najednou například 8 relétek, používá se k jejich blokování jeden společný elektrolytický kondenzátor (například 220 μF) a pro každé relé zvlášť (nebo pro dvě dohromady) keramický kondenzátor vhodné kapacity (například 100 nF).

1.2.9 VSTUPNĚ/VÝSTUPNÍ OBVODY

Za vstupně/výstupní obvody (I/O obvody) budeme pro účely problematiky EMC považovat všechny obvody, zabezpečující styk základní desky plošného spoje s okolím, tedy například porty, napájení, klávesnice, čelní panely, čidla atd. I/O jsou bránou pro rušení, a to oběma směry - dovnitř i ven. Jednak se mohou chovat jako anténa a vyzařovat rušení, které vzniká na plošném spoji, a jednak mohou přijímat vnější rušení a toto zavést na DPS. Hlavním úkolem při jejich návrhu tedy bude zabránit emisi rušení. Mezi základní návrhová pravidla pro I/O obvody tedy budou patřit především fyzická a elektrická separace I/O obvodů od ostatních obvodů na desce plošného spoje, filtrace, zemnění, stínění, minimalizace délky spojů a velikostí ploch proudových smyček, ochrana před ESD (elektrostatickými výboji), jištění proti zkratu a přetížení.

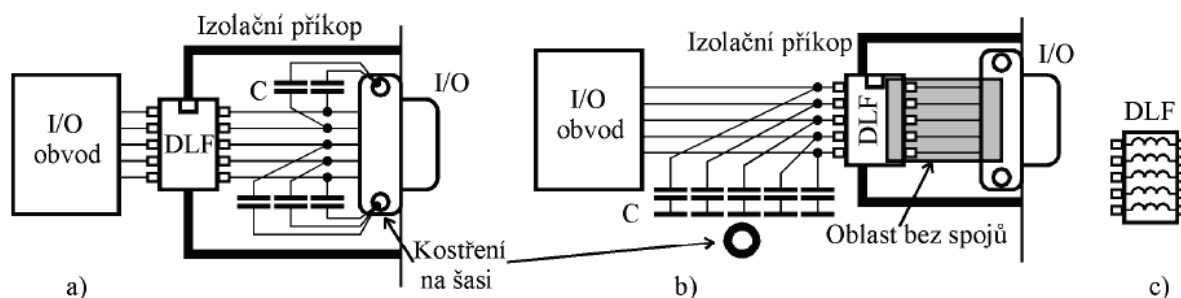
IZOLACE A SEPARACE VSTUPNĚ/VÝSTUPNÍCH OBVODŮ

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

Filtrace vstupů a výstupů na DPS

Na obr. 25 je znázorněna technika filtrace vstupů a výstupů. 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 DPS. Hodnota kapacity kondenzátorů se pohybuje v řádu 100 pF až 1 nF. Nevýhoda tohoto zapojení spočívá v tom, že je nutné tyto kondenzátory pro případ elektrostatických výbojů (ESD) dimenzovat na vysoké napětí - minimálně 1500 V, ale podle podmínek okolního prostředí se toto napětí může zvýšit na 6000 až 8000 V!





Obr. 25 I/O filtrace

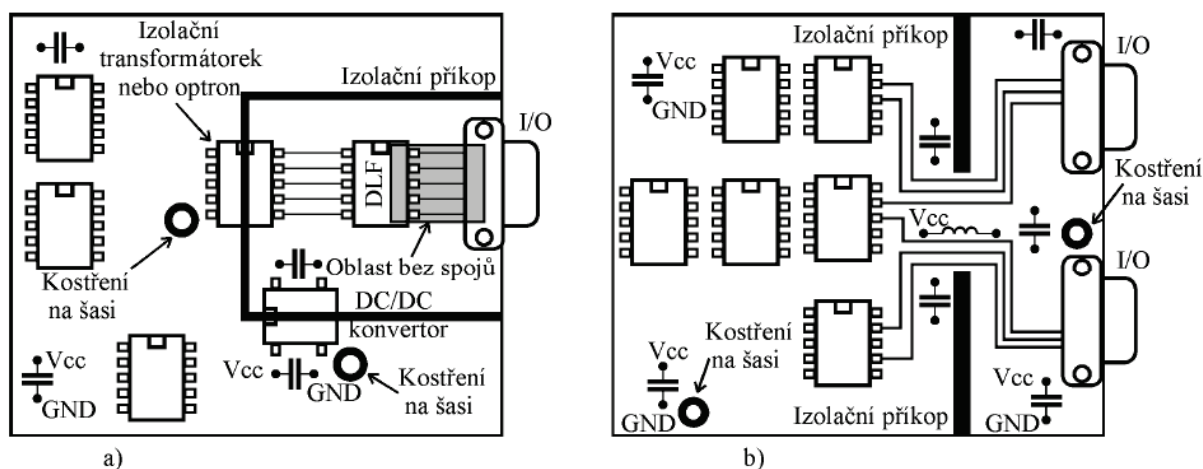
Tuto nevýhodu odstraňuje varianta b). Bezprostředně u I/O konektoru se nachází soustava tlumivek DLF, která přemostňuje izolační příkop a bezprostředně následují filtrační kondenzátory. Společný vodič kondenzátorů by měl být připojen přímo do vodivé plochy GND, která by zároveň měla být v bezprostřední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

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

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

Galvanické oddělení a přemostění

Galvanické oddělení vstupů a výstupů pomocí transformátorů nebo optronů od ostatních částí elektronického obvodu představuje nejúčinnější ochranu navrhovaného zařízení. Technické provedení na DPS je znázorněno na obr. 26a). I/O konektor je spolu s filtrem umístěn v oblasti, která je od ostatních částí DPS oddělena izolačním příkopem. Propojení signálu je provedeno pomocí transformátoru nebo optronů. 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 optronu 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. 26 Galvanické oddělení a), přemostění b)



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

Ochrana před ESD

Elektrostatický výboj (ESD = ElectroStatic Discharge) může být generován elektricky nabitými předměty (papír, plastové fólie, nábytek, člověk). Trvá řádově 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 OPS před dotykem. Je nutné si uvědomit, že elektrostatický výboj je velmi rychlý přechodový děj. Nebude-li proudový impulz výboje odveden nízkou impedancí do uzemnění, projeví se nám jako vysokonapěťová vlna, která se bude šířit po DPS, a v lepším případě dojde k výpadku funkce zařízení.

Ochrana I/O svorek

Cílem ochrany I/O svorek před ESO je jakýmkoliv korektním způsobem proudový impulz odvést pryč z DPS 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 spojů.

Jednou z možností je použití filtrů z obr. 25, 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.

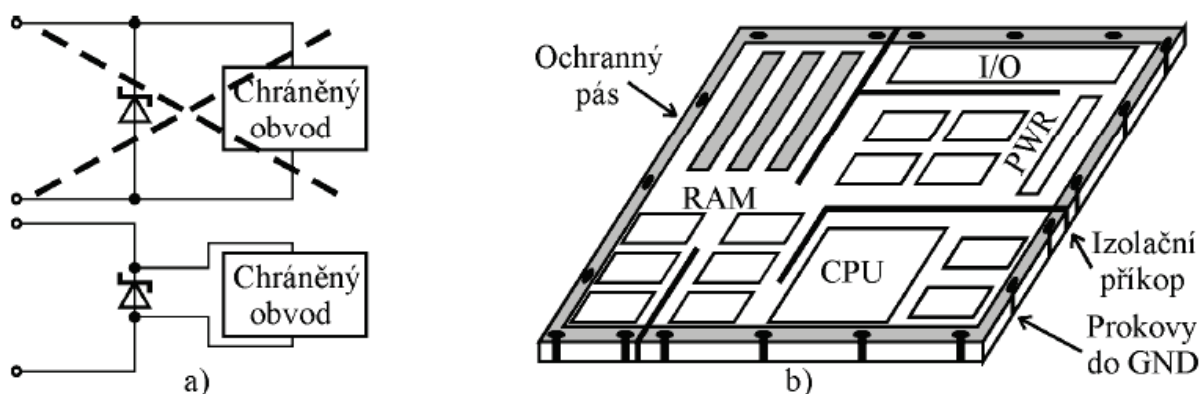
Velmi často se pro ochranu před ESD užívají různé druhy součástek, většinou nazývaných společným názvem "Voltage Suppressors". Mezi ně patří například varistory, Zenerovy diody, ESD diody (= obdoba Zenerových diod, určených speciálně pro účely ochrany před ESD). Pro návrh vedení spojů těchto součástek platí jedno společné pravidlo, v tomto textu již mnohokrát uvedené (obr. 27a): je nutné udržovat minimální plochu proudové smyčky nejen I_2 , ale též I_1 . Jsou-li na DPS zvláště 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 (obr. 26b). Elektrostatický výboj je odveden na kostru přístroje a nestačí se rozšířit do elektronického systému za přemostěním.

Ochrana DPS před dotykem

Ochrana DPS před dotykem zajišťuje takzvaný ochranný pás (guard band). Jedná se o 1 až 3 mm široký vodivý pás okolo celé desky plošného spoje ze strany součástek i ze strany spojů, který je zhruba každých 15 mm propojen pomocí prokovů do vrstvy vodivé plochy GND (obr. 27b). Tato ochrana je vlastně založena na pravděpodobnosti, že se obsluha nebo servisní technik při manipulaci s deskou bude dotýkat spíše okrajů než objektů 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 boční vyzařování z desky plošného spoje (obr. 2c)

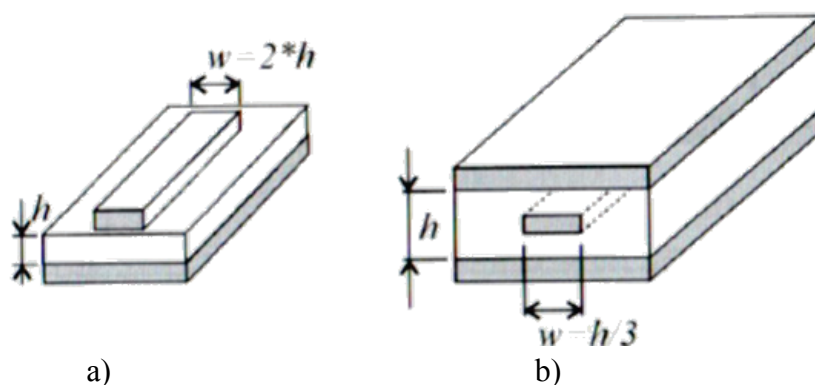




Obr. 27 a) Vedení spojů ochranné součástky, b) ochranný pás

1.2.10 RYCHLÉ ČÍSLICOVÉ OBVODY

Stále více se setkáváme s rychlými logickými obvody (například LVDS, PECL...). Jedná se o návrh obvodů pracujících s kmitočty, u nichž je délka spoje srovnatelná s vlnovou délkou přenášeného signálu. Je tedy nutné dodržovat veškerá související pravidla



Obr. 28 Orientační návrh geometrie spojů s vlastní impedancí $Z_0 = 50 \Omega$

- Impedance vodičů - geometrie vodičů a rozlitých měděných ploch musí být realizována tak, aby tvořila konstantní vlastní impedanci, zpravidla 50Ω (obr. 28).
- Impedance diferenčních párů - geometrie páru a rozlitých měděných ploch musí být realizována tak, aby tvořila konstantní vzájemnou impedanci, zpravidla 100Ω .
- Stejně zpoždění všech paralelně vedoucích signálů - je třeba pomocí meandrů vyladit délku signálově souvisejících paralelně vedoucích spojů tak, aby vykazovaly zpoždění vedení signálu v toleranci stanovené výrobcem použitých součástek.

2 LITERATURA

doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D. a kolektiv. *ZÁKLADY KONSTRUKČNÍCH TECHNOLOGIÍ V ELEKTRONICE - Výroba DPS v laboratořích VŠB TU Ostrava*, učební text a návody do cvičení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, FEI, KAT 450. 2012 [30.6.2013]. Interní document.

Vít Záhlava. *Návrh a konstrukce DPS, Principy a pravidla praktického návrhu*. Nakladatelství BEN – technická literatura, Praha 2010 [29.6.2013]. ISBN 978-80-7300-266-4

Kristýna Friedrischková. *Příprava výukových textů v projektu MOST-TECH, Technologie propojení součástek v systému, plošné spoje – materiály, konstrukce, výroba*. VŠB TU Ostrava, učební text a návody do cvičení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, FEI, KAT 450. 2012 [30.6.2013]. Dostupné z

< http://mostech.vsb.cz/source/dokumenty/4_Plosne%20spojce.pdf >.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ**



NAVRHOVÁNÍ A TECHNOLOGIE DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

ÚVOD DO PROBLEMATIKY NÁVRHU PLOŠNÉHO SPOJE V PROGRAMU EAGLE

Ing. David Vala
Ing. Kristýna Friedrischková
Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D.
Ing. Bohumil Horák, ml.
Ing. Ondřej Balák

Ostrava 2013

© Ing. David Vala, Ing. Kristýna Friedrischková, Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D., Ing.
Bohumil Horák, ml., Ing. Ondřej Balák

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3062-9



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

1	ÚVOD DO PROBLEMATIKY NÁVRHU PLOŠNÉHO SPOJE V PROGRAMU EAGLE.....	4
1.1	Úvod	5
1.1.1	Složení návrhového systému.....	5
1.1.2	Vlastnosti návrhového systému	5
1.1.3	Verze	6
1.1.4	Požadavky na PC.....	6
1.2	Control panel (ovladací panel).....	6
1.3	Postup práce ve schématickém editoru.....	9
1.3.1	Přechod z Control panelu do Schematic editoru a jeho nastavení.....	9
1.3.2	Nastavení pracovního prostředí	9
1.3.3	Ohraničení pracovní plochy – formát sch.	11
1.3.4	Manipulace se soubory.....	12
1.3.5	Organizace knihoven, umístění součástek a objektů na plochu.....	12
1.3.6	Manipulace s objekty- součástky, texty, grafické prvky	13
1.3.7	Editace objektů (jméno/ hodnota součástky)... ..	14
1.3.8	Propojení objektů	14
1.3.9	Závěrečná grafická úprava.....	14
1.3.10	Výstupy sch. Editoru	15
1.4	Editor plošného spoje, spuštění, přechod mezi editory, nastavení e pcb	15
1.4.1	Tvorba / načtení sch. Souboru a přechod do E SCH.....	15
1.4.2	Přechod z e sch do E PCB.....	15
1.4.3	Načtení / úprava již vytvořené DPS	15
1.4.4	Popis pracovního prostředí a ovládací prvky	17
1.4.5	Nastavení prostředí E PCB.....	17
1.4.6	Kontrola a případná záměna pouzder součástek	18
1.4.7	Rozmístění pouzder součástek.....	19
1.4.8	Náhrada gumových spojů	19
1.4.9	Propojení vývodů pouzder.....	20
1.4.10	Grafická úprava spojů	20
1.4.11	Vytváření polygonů	21
1.5	Výstupy z návrhového systému.....	22
1.5.1	TISK	22



1.5.2	Informační soubory	23
1.5.3	Editor knihoven	24
2	LITERATURA	25



1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY NÁVRHU PLOŠNÉHO SPOJE V PROGRAMU EAGLE



OBSAH KAPITOLY:

Obsahem učebního textu je seznámit studenty s prostředím programu Eagle a základními operacemi a funkcemi jednotlivých oken programu (Control panel, Schematic a Board) a hlavními prvky knihovny ve které jsou umístěny jednotlivé typy součástek.



MOTIVACE:

K tomu aby bylo možné správně navrhnout desku plošného spoje je třeba mít a znát návrhové prostředí vývojového programu k tomu určeného.

Po nastudování této kapitoly by měl být každý schopen realizovat jak schéma tak desku plošného spoje a její výrobu.



CÍL:

Cílem tohoto učebního textu je pochopení pracovního prostředí návrhového programu Eagle.



1.1 ÚVOD

EAGLE je uživatelsky přívětivý a výkonný nástroj pro návrh desek plošných spojů (DPS, PCB). Název **EAGLE** je zkratka, pocházející z původního názvu **Easily Applicable Graphical Layout Editor**.

1.1.1 SLOŽENÍ NÁVRHOVÉHO SYSTÉMU

Program se skládá ze tří hlavních modulů:

- EDITOR SCHÉMAT
- EDITOR SPOJŮ
- AUTOROUTER

Jsou ovládány z jednoho uživatelského prostředí prostřednictvím Control Panelu.

1.1.2 VLASTNOSTI NÁVRHOVÉHO SYSTÉMU

Společné

- dopředná a zpětná anotace v reálném čase
- nápověda orientovaná podle obsahu
- žádná hardwarová ochrana programu
- vícenásobná okna pro desku, schéma a knihovnu
- výkonný uživatelský jazyk
- integrovaný textový editor
- dostupný pro Windows 95/98/NT4/2000 a Linux

Editor spojů

- největší rozměr výkresu 1.6 x 1.6m (64 x 64 inch)
- rozlišení 1/10.000 mm (0,1 mikronu)
- až 16 signálových vrstev
- klasické i SMD součástky
- dodává se s plnou sadou knihoven součástek
- snadné vytváření vlastních součástek v plně integrovaném editoru knihoven
- funkce vpřed/vzad pro LIBOVOLNÝ editační příkaz, do libovolné hloubky
- poměření ploch = rozlévání mědi
- funkce kopírovat a vložit pro kopírování kompletních částí výkresu
- kontrola pravidel návrhu

Editor schémat

- až 99 listů jednoho schématu
- kontrola elektrických pravidel zapojení



- prohazování hradel a pinů
- vytvoření desky ze schématu jediným příkazem

Autorouter

- až 16 signálových vrstev
- strategie propojování nastavitelná uživatelem pomocí váhových faktorů

1.1.3 VERZE

Profesionál je plná verze bez omezení.

Standard je omezena na max. 4 vrstvy desky a na velikost desky max. velikosti Eurokarty (160 x 100 mm).

Light je omezena na velikost Eurokarty (80x100 mm) a není určena pro komerční použití, je plně funkční

1.1.4 POŽADAVKY NA PC

PC Pentium (nebo lepší)

- Windows 95/98/NT4/2000 nebo Linux
- myš
- alespoň 32MB RAM
- pevný disk s alespoň 20MB volného místa

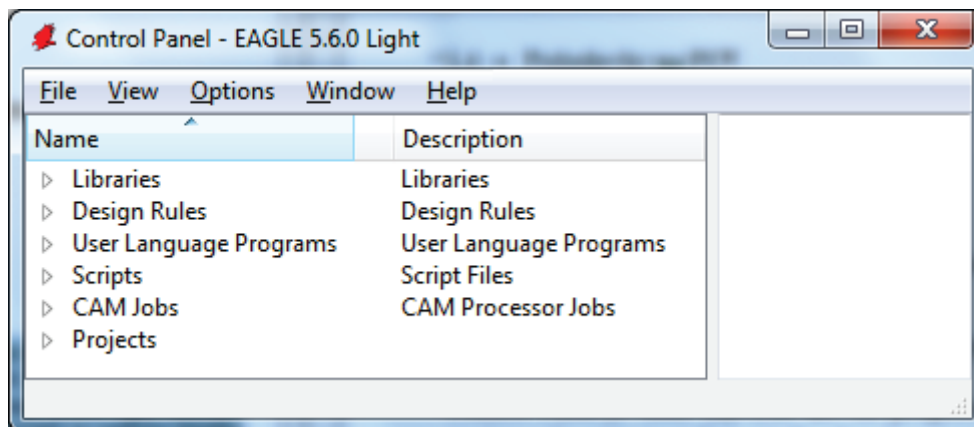
1.2 CONTROL PANEL (OVLADACÍ PANEL)

Control Panel je okno nejvyšší úrovně programu EAGLE. Okno se skládá ze stromové struktury (levá část) a informačního okna (pravá část). Je zobrazen na obr.2. Položky nejvyšší úrovně stromové struktury (zcela vlevo), reprezentují různé typy souborů EAGLE. Každá z těchto položek může ukazovat na jeden nebo více adresářů se soubory daného typu.

Ve sloupci „Description“ je zobrazen krátký popis jednotlivých položek stromové struktury (pokud tento popis existuje).

V informačním okně vpravo je zobrazen popis právě vybrané položky stromové struktury. Pokud se jedná o knihovní prvek, je zde vidět jeho náhled.





Obr. 2 Control panel

S objekty stromové struktury lze provádět operace také pomocí kontextového menu, toto menu, specifické pro každou položku stromové struktury, se vyvolá kliknutím pravého tlačítka myši.

Zde je uveden seznam všech položek, které se mohou v kontextovém menu objevit:

New Folder	vytvoří novou podsložku vybrané složky
Edit Description	otevře soubor s popisem v textovém editoru
Rename	přejmenuje vybraný objekt
Copy	překopíruje vybraný objekt
Delete	vymaže vybraný objekt
Use	přidá knihovnu do seznamu knihoven, které se budou prohledávat (hledá-li se device, package)
USE ALL	přidá všechny knihovny určené v options/directories do seznamu knihoven, které se budou prohledávat (hledá-li se device, package)
Use none	odebere všechny knihovny určené k prohledávání
Update	obnoví všechny součástky z této knihovny použité ve schématu a desce
Add to schematic	spustí příkaz ADD s tímto device (v editoru schémat)
Add to board	spustí příkaz ADD s tímto package (v editoru desky)
Open/Close Project	otevře/zavře současný projekt



New	vytvoří nový soubor daného typu v okně editoru
Open	otevře zvolený soubor v okně editoru
Print...	vytiskne soubor na systémové tiskárně
Run in ...	spustí ULP v aktuálním schématu/desce/knihovně
Execute in ...	spustí Script v aktuálním schématu/desce/knihovně
Load into Board	nahraje tuto sadu návrhových pravidel (Design Rules) do aktuální desky

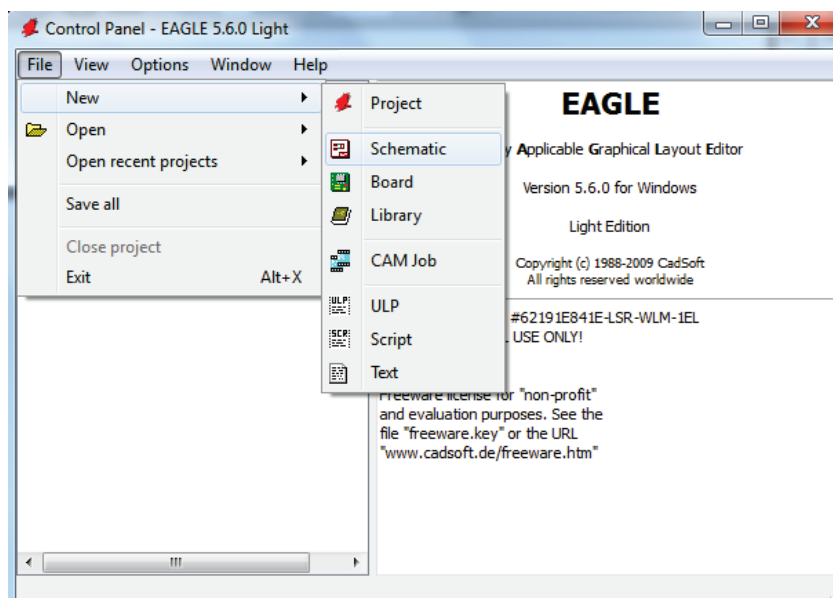
Další možností je metoda „Drag&Drop“ (táhni a pusť), pomocí které můžete kopírovat nebo přesouvat soubory a adresáře mimo stromovou strukturu. Takto lze vkládat součástky do schématu nebo desky, spouštět ULP a Scripty, přiřadit soubor „Design Rules“, provést „Library update“.



1.3 POSTUP PRÁCE VE SCHÉMATICKÉM EDITORU

1.3.1 PŘECHOD Z CONTROL PANELU DO SCHEMATIC EDITORU A JEHO NASTAVENÍ

Po spuštění programu se otevře okno CONTROL PANEL, který je zobrazen na obr. 1. Z CP je možné přejít do jednotlivých editorů.



Obr. 1 Control panel

Při tvorbě nového schématu postupujeme

FILE - NEW - SCHEMATIC

Pracovní prostředí SCH E je zobrazeno na obr. 3.

1.3.2 NASTAVENÍ PRACOVNÍHO PROSTŘEDÍ

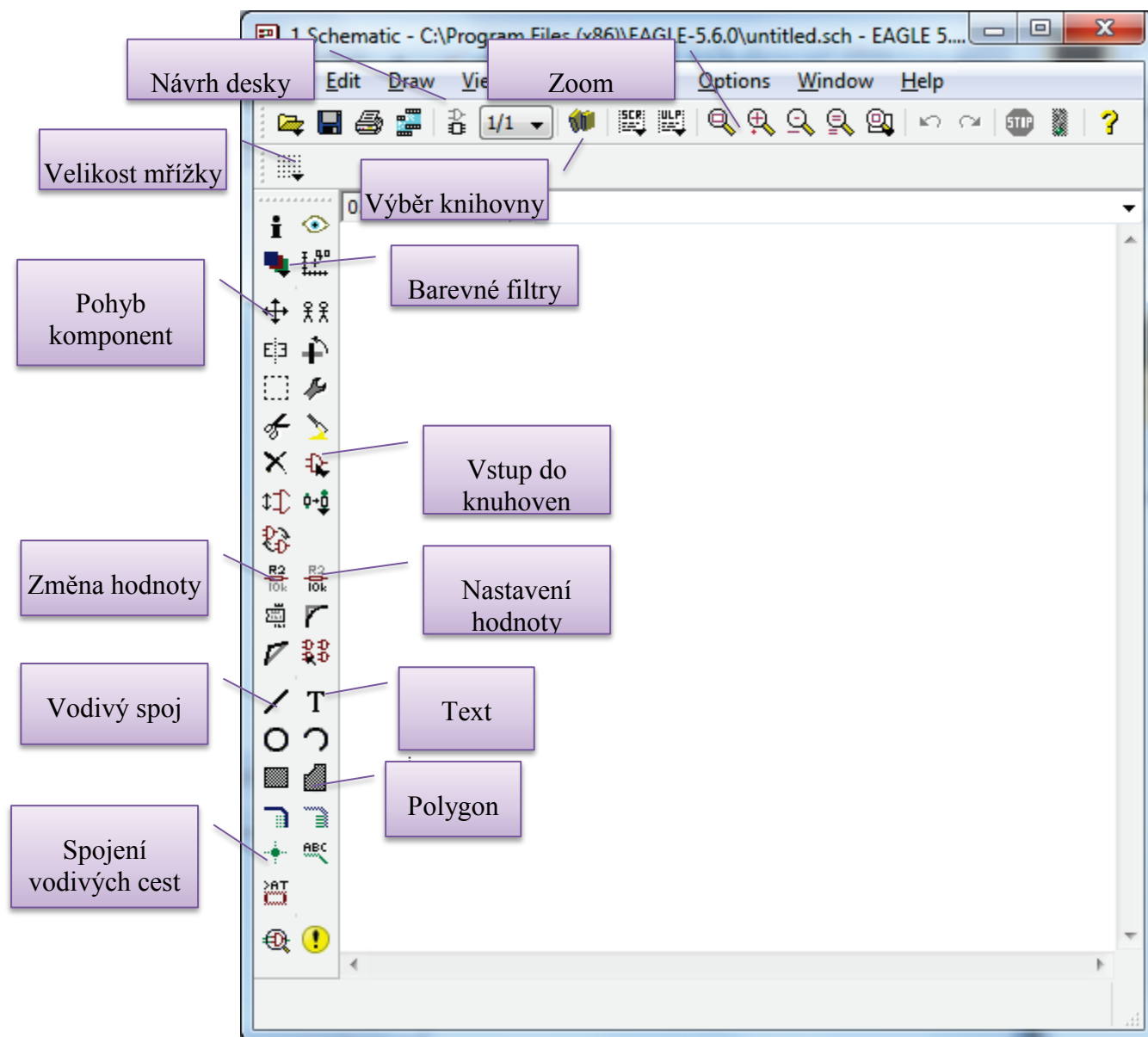
BARVY VRSTEV A JEJICH ZAPNUTÍ / VYPNUTÍ

Provádíme pomocí ikony DISPLAY, okno je zobrazeno na obr. 4. Význam jednotlivých vrstev:

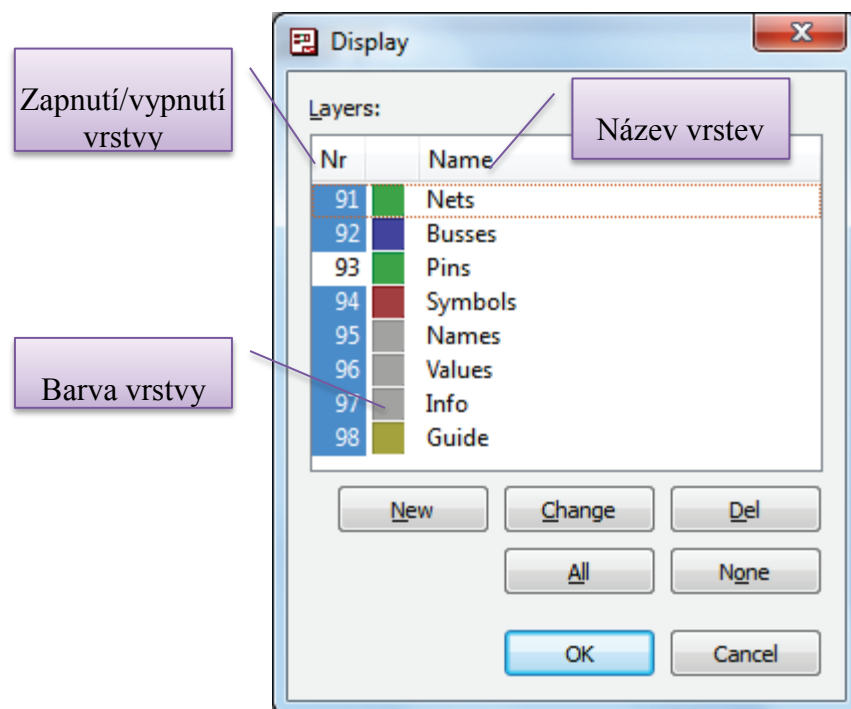
91	Nets	spoje (Nets)
92	Busses	sběrnice
93	Pins	vývody součástek
94	Symbols	schematické značky
95	Names	jména součástek
96	Values	hodnoty/typy součástek

Doporučení- při tvorbě dokumentace volíme černou barvu vrstev, viditelnost vrstev podle uvážení.





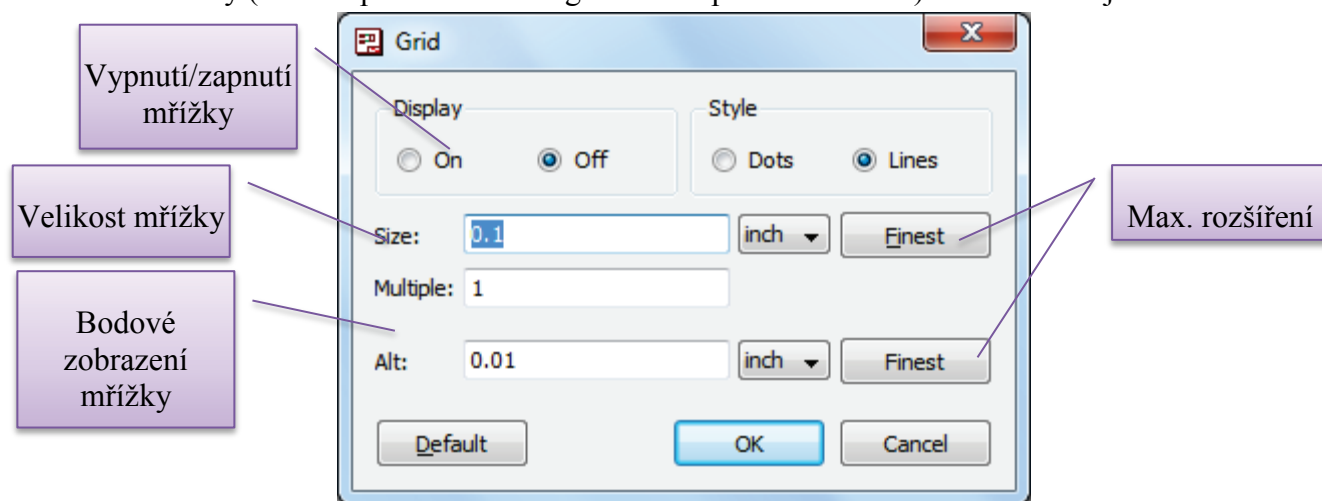
Obr. 3 Pracovní prostředí SCHEMATIC



Obr. 4 Nastavení vrstev

NASTAVENÍ POKLÁDACÍHO RASTRU A JEHO ZOBRAZENÍ

Použijeme ikonu GRID- nastavíme velikost pokládacího rastru, jednotky, zobrazení bodů nebo mřížky (vhodné pro závěrečnou grafickou úpravu schématu). Okno GRID je na obr. 5.



Obr.5 Okno GRID

1.3.3 OHRANIČENÍ PRACOVNÍ PLOCHY – FORMÁT SCH.

Ohraničením pracovní plochy předejdeme pozdějším problémům při závěrečné grafické úpravě budoucího schématu (může se stát, že vytvořené schéma neumístíme do zvoleného formátu a musíme ho znova zdlouhavě upravovat).

Zvolený formát vybíráme z knihovny.

ADD (USE) - FRAMES - DIN A4-L - OK - LTM - ESC



1.3.4 MANIPULACE SE SOUBORY

Použijeme *MENU - FILE - NEW* vytvořit nové schéma

- OPEN otevřít existující schéma
- SAVE uložit
- SAVE AS uložit jako

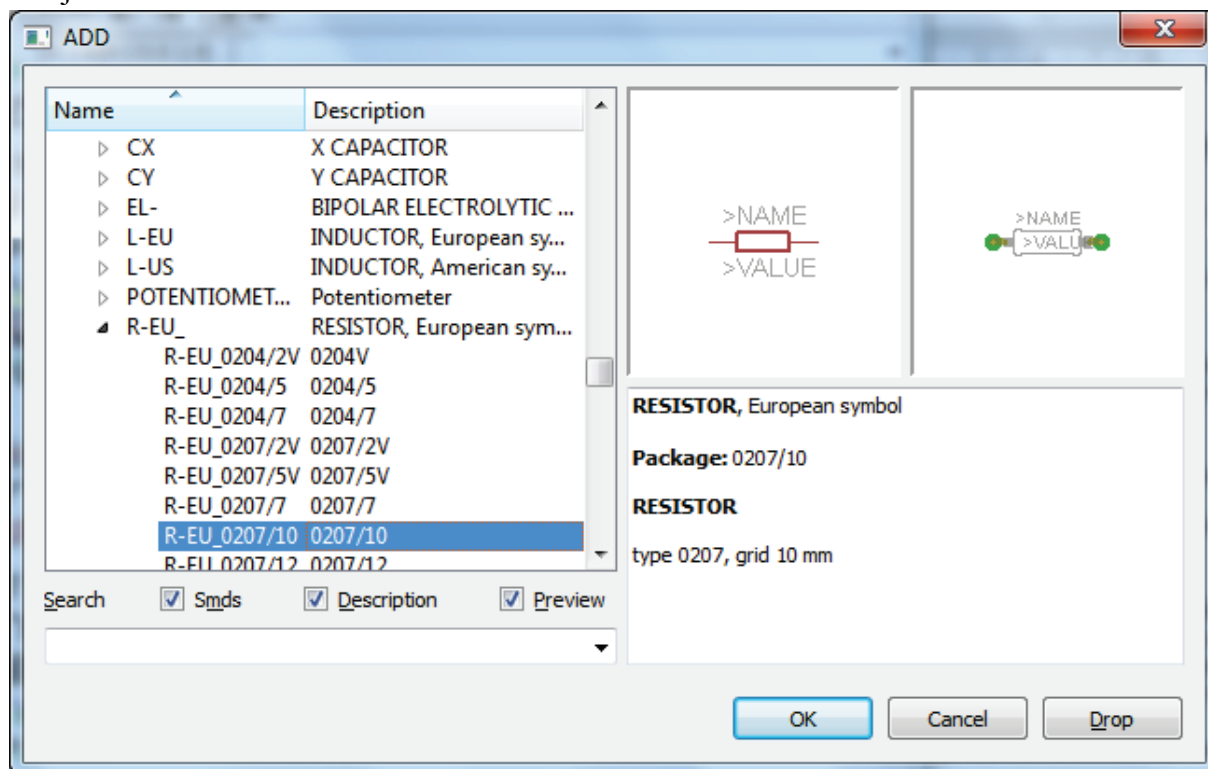
Doporučení- založte si ihned soubor s názvem budoucího schématu !!!!

1.3.5 ORGANIZACE KNIHOVEN, UMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK A OBJEKTŮ NA PLOCHU

ORGANIZACE KNIHOVEN

Všechny součástky jsou uloženy v knihovnách. Knihovny jsou organizovány podle typu součástek a nebo podle výrobců pomocí stromové struktury. Na obr. 6 je zobrazen příklad rozvinuté knihovny napěťových regulátorů vyvolané povelom ADD. Schématická značka, pouzdro vybrané součástky a popis (knihovna, typ pouzdra, rozměry pouzdra) jsou zobrazeny v pravé části.

Okno SEARCH umožňuje také hledání konkrétní součástky v případě, že neznáme knihovnu kde je umístěna.



Obr. 6 Rozvinuté okno knihovny

UMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK NA PLOCHU

Vyvolání součástky na plochu si popíšeme na příkladu:

- umístit jednočipový mikroprocesor PIC od firmy MICROCHIP typu 16F84 v pouzdře DIL18 na plochu.

Postup:



ADD - knihovna MICROCHIP - PIC16F8* - listujeme v knihovně a podle pouzdra DIL18 vybíráme PIC19F84AP - OK - součástka je uchycena na kurzoru, pohyb a případná rotace (PTM) - umístění na požadované místo LTM - ESC - a můžeme pokládat další součástku ze stejné knihovny a nebo jiné.

UMÍSTĚNÍ OBJEKTŮ NA PLOCHU

TEXT:

ikona TEXT - v dialogovém oknu TEXT napsat znění - OK - nastavit parametry SIZE, RATIO, FONT - případná rotace PTM - umístění LTM – ESC

SIZE výška písma

RATIO poměr šířky čáry a výšky písma

FONT styl textu

ZMĚNA TEXTU:

ikona CHANGE - TEXT změna textu

- SIZE, RATIO, FONT parametry

ČÁRA:

Kreslení čar ve SCH E - čáry provedené tímto způsobem - nejsou elektrické spoje !!!

ikona WIRE - začátek LTM - parametry sklon, WIDTH, STYLE pomocí PTM +

LAYER - vedení čáry, zlom LTM - konec dvojitý klik ve stejném bodě LTM

ZMĚNA ČÁRY:

ikona CHANGE - WIDTH tloušťka čáry

- STYLE provedení čáry

- LAYER vrstva

1.3.6 MANIPULACE S OBJEKTY- SOUČÁSTKY, TEXTY, GRAFICKÉ PRVKY

Při vytváření schématu musíme součástky a další objekty přesouvat na určená místa. Rozmístění součástek musí být rovnoměrné po celé ploše formátu (zajistíme přehlednost schématu).

Nejdříve umístíme "centrální součástku" a okolo ní ostatní, zde je vhodné zapnout pokládací rastr (viz. ikona GRID - body/čáry nebo F6). Součástky pokládáme symetricky v horizontální a vertikální rovině.

PŘESUN:

MOVE - kurzorem "uchopíme" součástku nebo objekt (text....) za uchopovací značku, změna barvy značky signalizuje připravenost k přesunu - případná rotace PTM - umístění na požadované místo LTM – a přechod na další součástku..

ANALOGICKY	ROTATE	ROTOVÁNÍ
	MIRROR	ZRCADLENÍ
	DELETE	VYMAZÁNÍ



1.3.7 EDITACE OBJEKTŮ (JMÉNO/ HODNOTA SOUČÁSTKY)...

Každá součástka musí být přesně definována (i pro budoucí přechod do editoru plošných spojů) jménem (NAME) a hodnotou (VALUE). Po rozmístění součástek toto provedeme pomocí ikon NAME a VALUE v odpovídajících editačních oknech. Tato okna použijeme i pro případné budoucí změny.

1.3.8 PROPOJENÍ OBJEKTŮ

Provádíme povel, ikonou NET se zobrazeným pokládacím rastrem pomocí ikony GRID a nebo F6.

Ikona NET - začátek (kurzor) na vývodu součástky a LTM - styl vedení spoje měníme pomocí PTM - ukončení segmentu spoje (zlom, roh) LTM - konec na vývodu součástky LTM.

ZMĚNA: -tloušťku spoje (segmentu spoje) měníme CHANGE - WIDTH + volba tl.

1.3.9 ZÁVĚREČNÁ GRAFICKÁ ÚPRAVA

Rozmístění součástek a spojů musí být přehledné, objekty rovnoměrně rozmístěny v rámečku (grafická úprava).

Především jednotně uspořádáme pozici popisu součástek NAME, VALUE (vyjimky pouze omezeně), vzdálenosti spojů a schématických značek, spojů a popisů. Pozornost věnujeme i symetrickému umístění schématických značek ve větvích obvodu (horizontálně i vertikálně).

Upravíme velikost a pozici nápisů a popisů např. bloků.

POUŽIJEME	MOVE	PŘESUN
	ROTATE	ROTOVÁNÍ
	MIRROR	ZRCADLENÍ
	DELETE	VYMAZÁNÍ

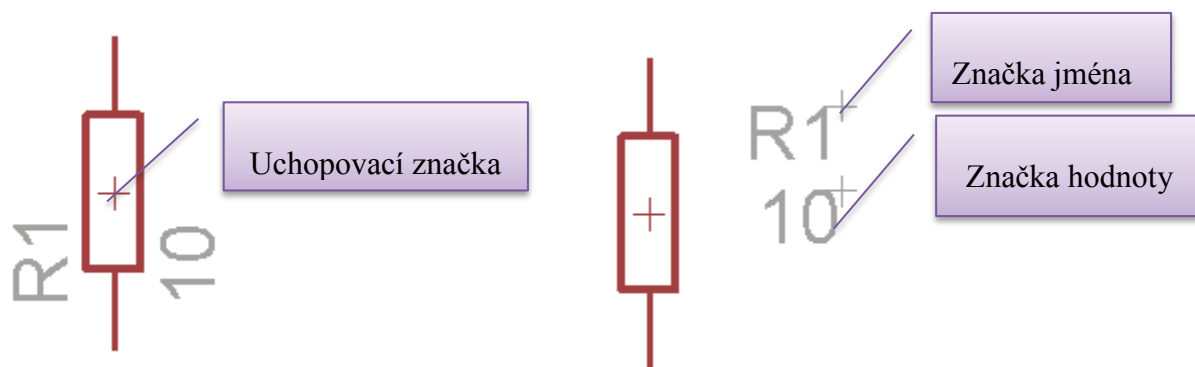
SMASH ODDĚLENÍ TEXTOVÝCH ATRIBUTŮ OD ELEMENTU

Schématická značka je složena ze symbolu a textu jméno/hodnota a má tedy jednu uchopovací značku = jeden objekt. Při pohybu manipulujeme s jedním objektem.

Při závěrečné grafické úpravě je potřeba často přesouvat odděleně symbol, jméno, hodnotu = oddělit jednotlivé prvky = více uchopovacích značek.

Na obr. 7 je vidět schématickou značku rezistoru po přesunu, rotaci a po provedení povelu SMASH.





Obr.7 Vliv povelu SMASH na zobrazení elementu

1.3.10 VÝSTUPY SCH. EDITORU

Podrobně budou výstupy ze SCHEMATIC rozebrány v kapitole 4. ELEKTRONICKÁ PODOBA soubor schématu *.sch, soubor s výsledky ELECTRICAL RULE CHECK *.erc, soubor PARTLIST *.bom

TISK schéma zapojení
PARTLIST
VÝSLEDEK ERC

1.4 EDITOR PLOŠNÉHO SPOJE, SPUŠTĚNÍ, PŘECHOD MEZI EDITORY, NASTAVENÍ E PCB

Podle situace může existovat několik variant, které budou dále popsány. Kontrola dodržování vazeb mezi editory- je otevřeno sch. a deska jednoho obvodu, při změně v jednom editoru se změna projeví v druhém editoru – zpětná anotace, při vypnutí sch. editoru bude hlášeno porušení integrity- můžeme dále pracovat- nebude však garance 100% návrhu.

1.4.1 TVORBA / NAČTENÍ SCH. SOUBORU A PŘECHOD DO E SCH

Standartní, nejvíce používaná varianta , kdy je schéma vytvořeno ve SCH E postupem uvedeným v kap. 2. Přejdeme do SCH E a vytvoříme, nebo načteme dříve vytvořené schéma obvodu.

CONTROL PANEL - FILE - NEW / OPEN - SCHEMATIC

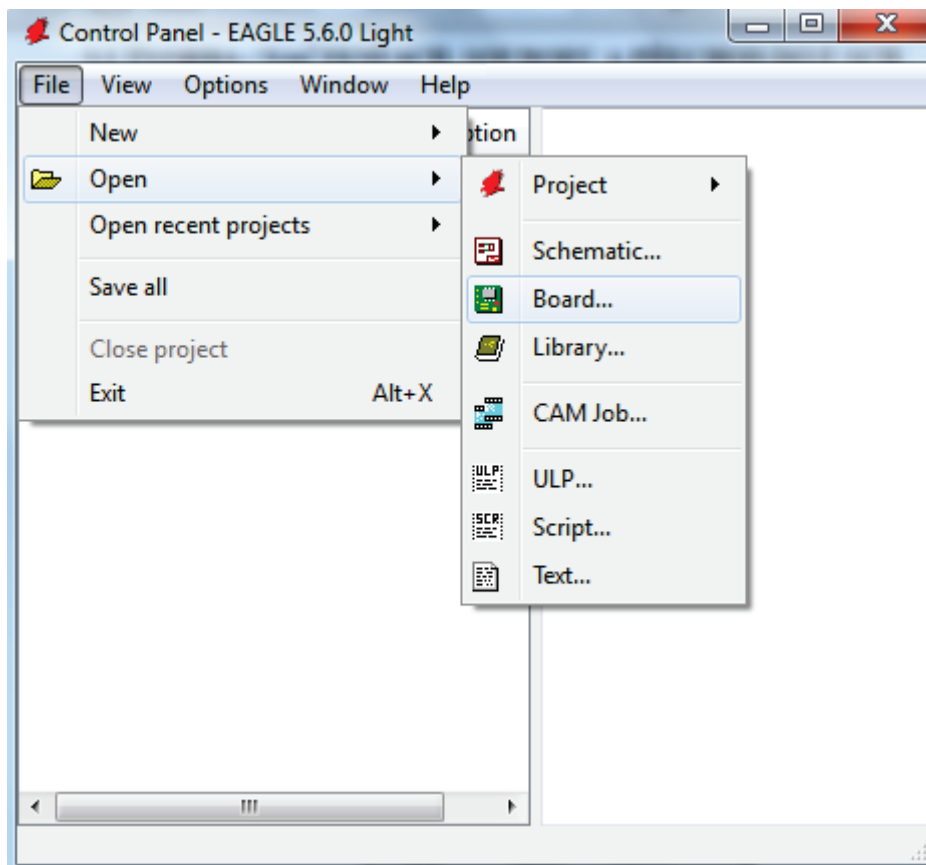
1.4.2 PŘECHOD Z E SCH DO E PCB

Použijeme ikonu BOARD

1.4.3 NAČTENÍ / ÚPRAVA JIŽ VYTVOŘENÉ DPS

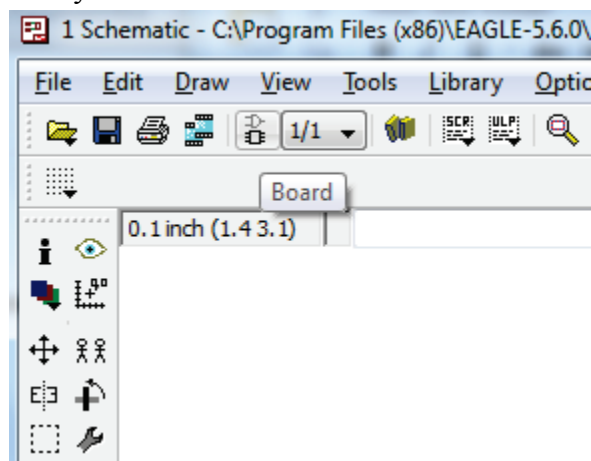
CONTROL PANEL - OPEN – BOARD. Uvedená varianta je zobrazena na obr. 8.



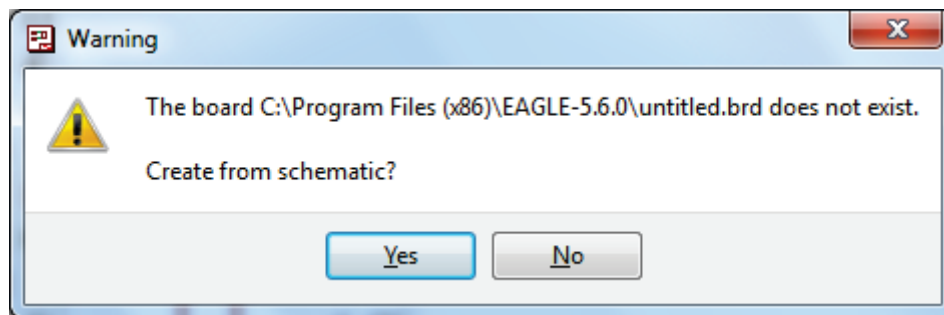


Obr. 8 Načtení vytvořené DPS pro její úpravu

Nebo přepnutím pomocí ikony BOARD v okně schématu.



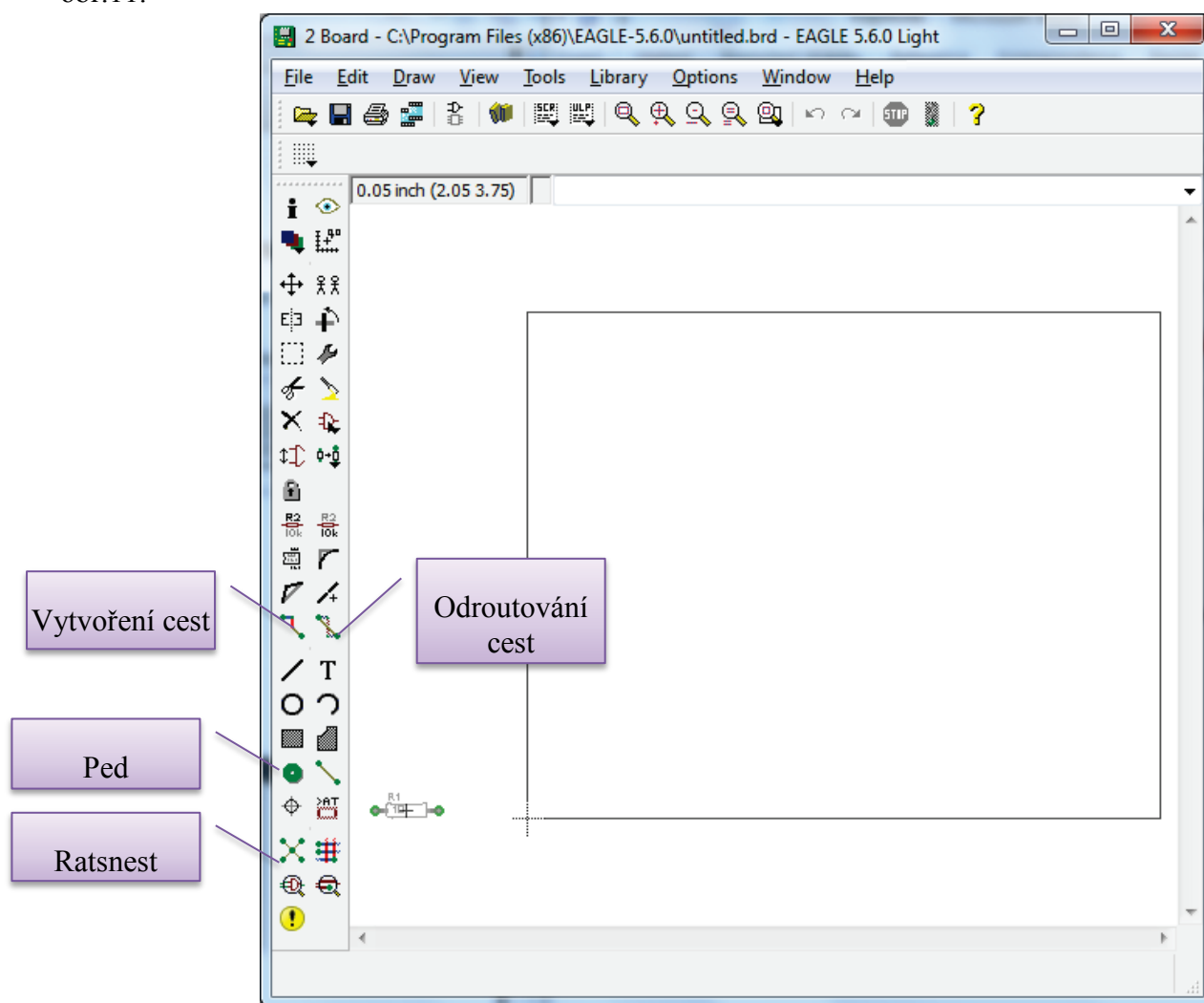
Obr.9 Přepínací ikona v okne SCH



Obr.10 Dotazové okno při vytvoření Bard ze schématu

1.4.4 POPIS PRACOVNÍHO PROSTŘEDÍ A OVLÁDACÍ PRVKY

Po spuštění editoru plošného spoje E PCB se zobrazí pracovní prostředí, které vidíme na obr.11.



Obr.11 Pracovní prostředí okna Board

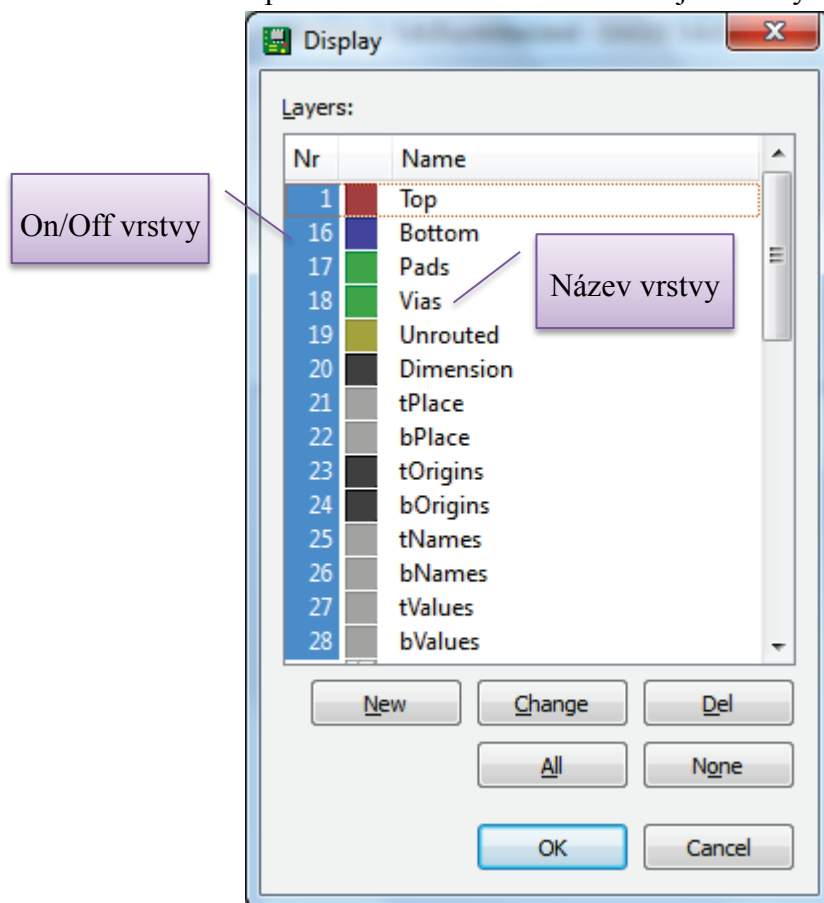
1.4.5 NASTAVENÍ PROSTŘEDÍ E PCB

Opět je zde možno nastavit zobrazovací mřížku, tento krok se provede, jako v okně SCH (podkapitola 2.2.2).



VRSTVY

Editační okno DISPLAY pro nastavení barev a zobrazení jednotlivých vrstev je na obr.12.

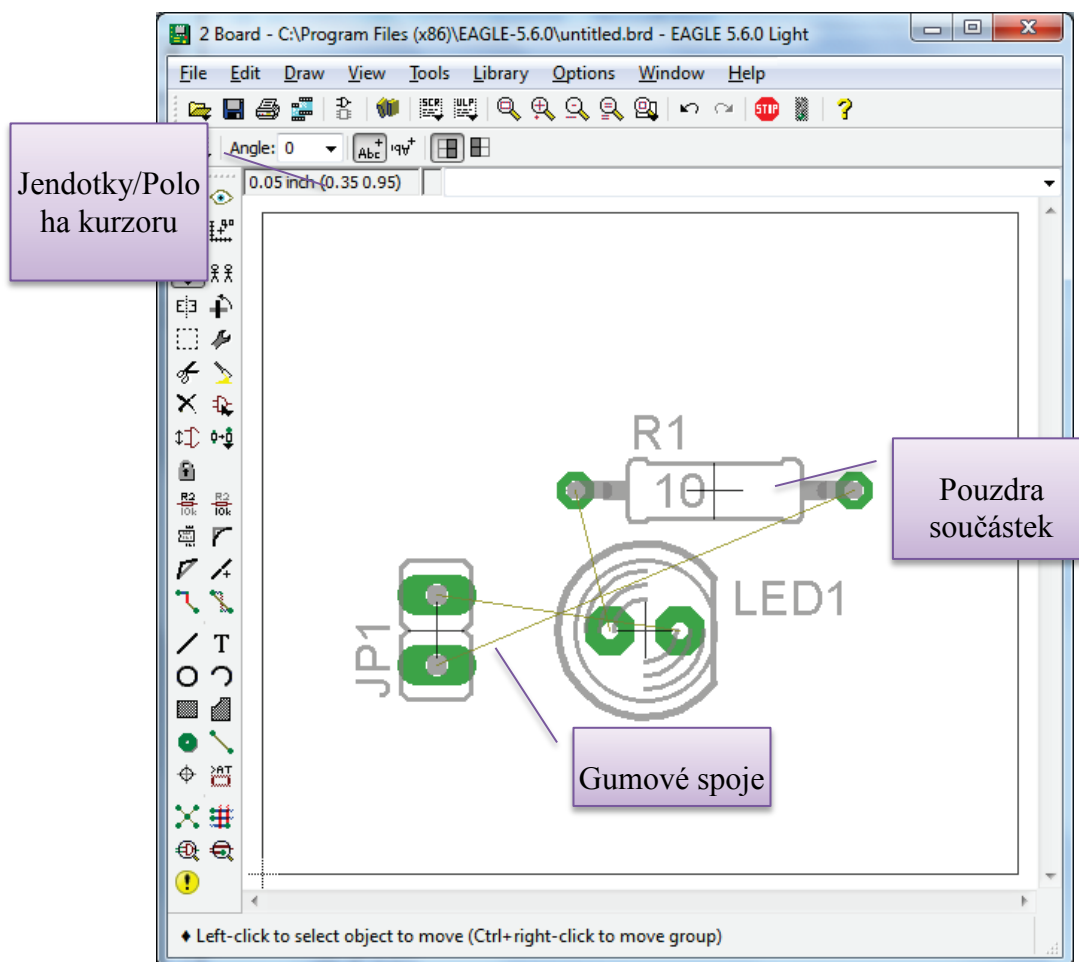


Obr.12 Editáčn  okno DISPLAY

1.4.6 KONTROLA A PŘÍPADNÁ ZÁMĚNA POUZDER SOUČÁSTEK

Po otevření E PCB se na obrazovce v levé části zobrazí pouzdra součástek schématu. Obrýs desky (u verze STANDART 100x80 mm) doporučuji povel DELETED smazat - bude nahrazen konkrétním rozměrem DPS.

Křížek má koordináty [0,0]. Vývody pouzder jsou propojeny gumovými spoji. Situace je zobrazena na obr.13.



Obr.14 Pouzdra součástek s gumovými spoji

Provedeme kontrolu úplnosti pouzder, zda byla všechna ze schématu zobrazena a zda odpovídají po elektrické a konstrukční stránce. Záměnu pouzder řeším pomocí příkazu REPLACE

1.4.7 ROZMÍSTĚNÍ POUZDER SOUČÁSTEK

Rozmístění pouzder je ovlivněno- konstrukčními požadavky, funkcí a typem obvodu, provozními požadavky, jednoduchostí spojů, výrobitelností desky.

- doporučený rastr: GRID - SIZE 50/ 25 mil
- přesunutí je provedeno -ikona MOVE

1.4.8 NÁHRADA GUMOVÝCH SPOJŮ

Tuto operaci provést vždy po provedeném přesunu pouzder součástek- gumové spoje jsou nahrazeny nejkratšími

- doporučený rastr: SIZE 50/ 25 mil
- ikona RASTNEST



1.4.9 PROPOJENÍ VÝVODŮ POUZDER

RUČNÍ

Ikona ROUTE – vrstva 16 - BOTTOM (strana spojů- standartněmodrá barva) – WIDTH (šířka spoje) – způsob vedení spoje

Postup:

- ovládání pomocí pravého tlačítka myši
- klik na vývod pouzdra a vedení spoje za pomoci nejkratšího spoje k dalšímu vývodu, způsob vedení spoje volíme tlačítkem myši,
- z pájecího bodu vycházíme přímo a později spoj lomíme pod úhlem 45°

AUTOMATICKÉ

Pomocí AUTOROUTERU

KOMBINOVANÉ

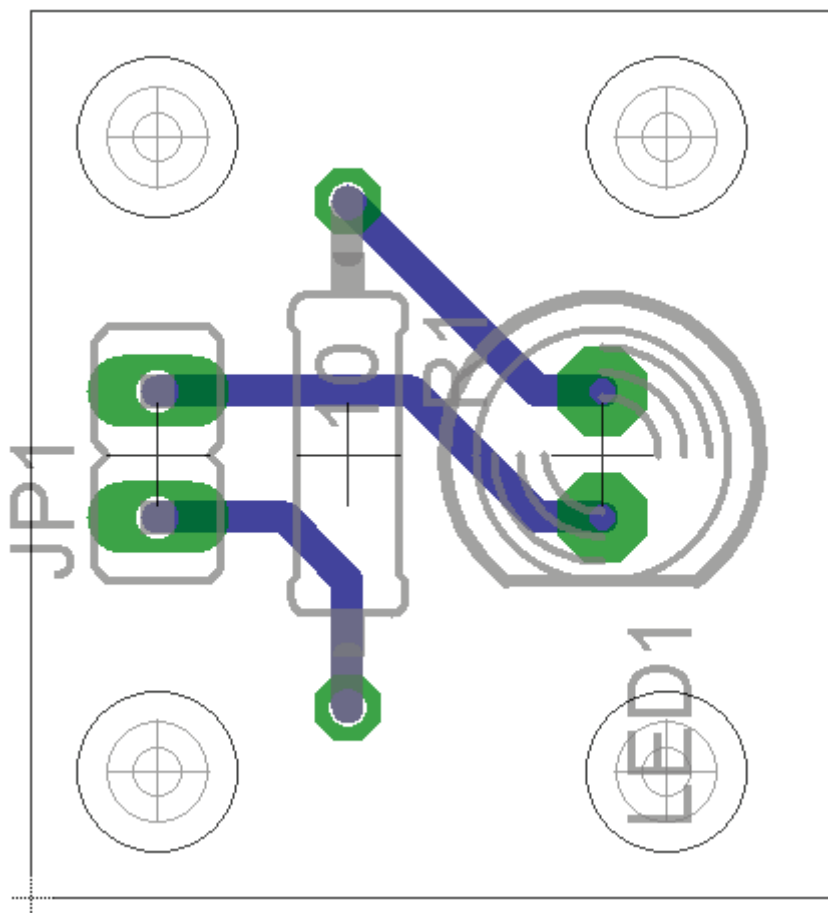
Nejčastěji používaný způsob- nejdříve návrh automatický s následnou ruční úpravou.

1.4.10 GRAFICKÁ ÚPRAVA SPOJŮ

Změna šířky vybrané části spoje	CHANGE	CHANGE – WIDTH – nastavit novou hodnotu- klik na segment spoje
Vymazání části spoje	DELETE	část spoje bude nahrazena nejkratším
Vymazání celého úseku sítě	RIPUP	spoje budou nahrazeny nejkratšími
Posunutí spoje	MOVE	
Vytvoření zlomu na spoji	SPLIT	
Optická kontrola spojů		vypnout vrstvu zobrazující obrysy pouzder – DISPLAY – 21 a provést kontrolu vedení spojů- dodržení návrhových pravidel
Změna pouzdra	CHANGE PACKAGE	
	REPLACE	
Úprava popisů pouzder	TEXT	pro přehlednost vypneme vrstvy 16, 17,18
	MOVE	
	SMASH	

Tab.1 Možné úpravy spojů





Obr.14 Pohled na navrženou DPS ze strany pouzder součástek

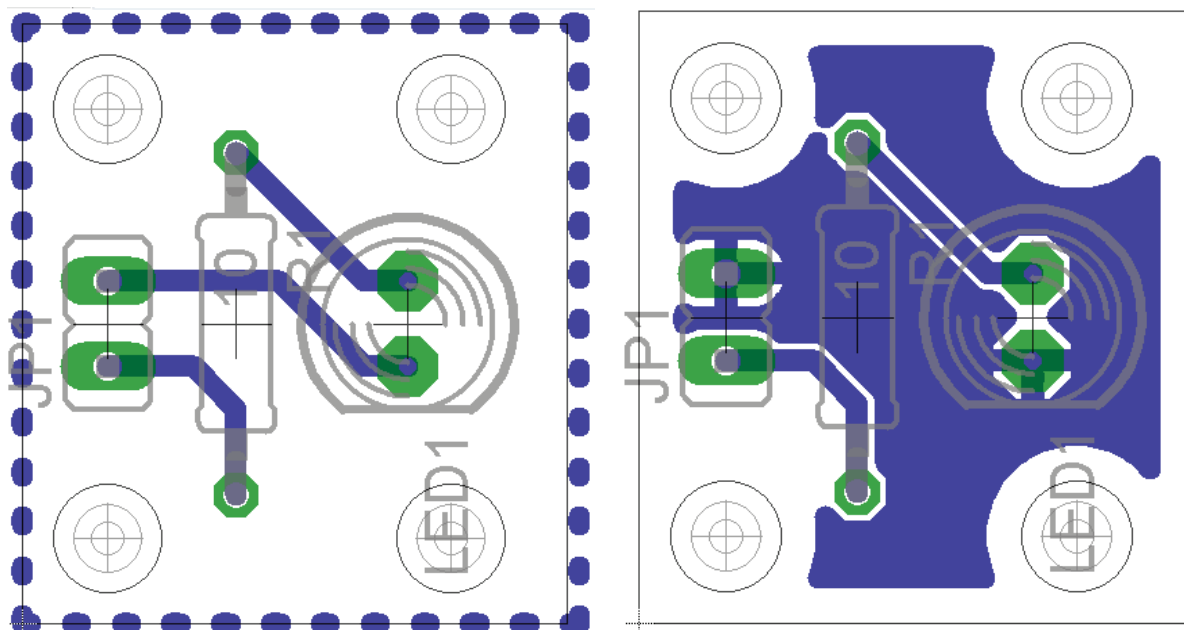
1.4.11 VYTVÁŘENÍ POLYGONŮ

Rozlévání mědi na plochu desky – plochy je možné využít jako zemnění, chlazení.....

- ikona POLYGON
- určit vrstvu ve které se bude polygon vytvářet 1 TOP součástky
16 BOTTOM spoje

Postup:

ikona POLYGON - klikneme na počáteční bod budoucího polygonu- táhneme jako spoj po obvodu vyplňované plochy- ukončíme přesně v počátečním bodě- uzavřeme polygon – tloušťka čáry polygonu 10 mil – vyplnění plochy pomocí ikony RATSNEST.



Obr. 15 Ukázka vylití Polygonu

1.5 VÝSTUPY Z NÁVRHOVÉHO SYSTÉMU

Výstupy z programu jsou tvořeny soubory v elektronické podobě, výkresy v tištěné podobě a soubory s výrobními daty:

- tisk výstupů SCH E, E PCB
- generování technologických souborů filmových předloh- GERBER
- generování technologických souborů ovládání vrtačky- EXCELLON
- informační soubory- např. PARTLIST- seznam součástek

VÝSLEDKY DRC

Výstupy dat pro zpracování jinými programy, např. 3D zobrazení, simulace

1.5.1 TISK

SCHÉMA ZAPOJENÍ

FILE - PRINT

Příklad:

vytisknout černobílé schéma zapojení na jednu stránku orientovanou podélně

Postup:

FILE – PRINT – BLACK

SOLID

ROTARE

SCALE FACTOR 1

PAGE LIMIT 1

PODÉLNÝ VÝKRES

MĚŘÍTKO

POČET STRÁNEK

Výsledek:

schéma je vytištěno v měřítku 1:1 na jedné stránce, je-li větší program provede automaticky úpravu měřítka zobrazení. Je-li PAGE LIMIT = 0 – tisk ude proveden v zadaném měřítku na odpovídající počet stran.



PRINTER	TYP TISKÁRNÍ
PAGE	PARAMETRY STRÁNKY
CAPTION	TISK ZÁHLAVÍ (soubor, datum, čas)

TISK VÝSTUPU E PCB

Postup je stejný jako při tisku schématu s respektováním zásad uvedených v tabulce

Dokument	Mirror	Zapnuté vrstvy
Obrazec spojů - BOTTOM	ANO	16, 17, 18, (20)
Obrazec spojů - TOP	NE	1, 17, 18
Potisk, rozložení součástek - TOP	NE	20, 21, 25, 27
Nepájivá maska - BOTTOM	ANO	30
Nepájivá maska - TOP	NE	29

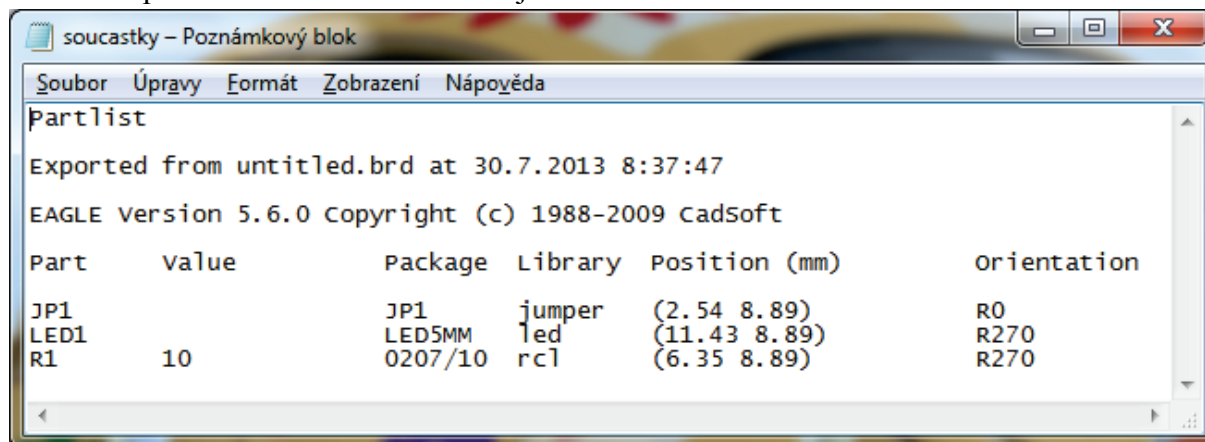
Tab.2 Možnosti výstupu z desky Board

1.5.2 INFORMAČNÍ SOUBORY

Se vytváří pomocí překladačů uživatelského programovacího jazyka.

PARTLIST- SEZNAM SOUČÁSTEK

Ikona ULP (USER LANGUAGE) – program spustíme bom.ulp – výsledek můžeme uložit pro následné zpracování - tisk. Okno BOM je na obr.16.



Obr.16 Okno se seznamem součástek

VÝSLEDKY ERC -ELECTRICAL RULE CHECK

Výsledky jsou uloženy v souboru *.erc a mohou být vytištěny.

EAGLE Version 4.11 Copyright (c) 1988-2003 CadSoft Electrical Rule Check for C:/PROGRAM FILES/EAGLE-4.11/projects/New_Project _1/3.sch at 04.01.2004 18:32:01

WARNING: Only 1 Pin on net N\$4

Board and schematic are consistent

0 errors

1 warnings



1.5.3 EDITOR KNIHOVEN

Editor knihoven se používá k editaci souborů součástek v knihovně (*.LBR). Po otevření nového okna editoru knihoven bude editační plocha okna prázdná a musíte použít povelu EDIT k vybrání toho prvku knihovny, který chcete editovat (package, symbol, device) nebo vytvořit.

EDIT	V editačním okně knihovny lze editovat (modifikovat či vytvořit nové) tzv. package, symbol, nebo device, což jsou různé formy součástky pro potřebu kreslení schématu či návrhu desky plošných spojů- editovat prvky knihovny	
PACKAGE	Definice pouzdra součástky (návrh desky)	
SYMBOL	Schematický symbol součástky (kreslení schématu).	
DEVICE	Je definice celé součástky. Obsahuje jeden nebo více „package variants“ a jeden nebo několik symbolů (např. hradel). Symboly mohou být přitom navzájem různé.	

Tab.3 Hlavní symboly v okně knihovny

Klikněte na jednu z ikon k načtení device (definice součástky), package (pouzdro) a symbolu. Pokud chcete vytvořit nový prvek knihovny, napište jeho jméno do políčka New. Pokud chcete editovat již existující knihovní prvek, napište do políčka New jeho celé jméno i s koncovkou pro rozlišení typu prvku.

Když koncovku vynecháte, budete muset vybrat typ prvku v políčku Choose, které se objeví. Pokud nemáte licenci na kreslení schémat (Modul Schema), potom se tlačítka pro volbu typu prvku příslušného schématu (Dev...) neobjeví v menu.



2 LITERATURA

Ing. Antonín JURÁNEK. *VÝUKA NÁVRHOVÉHO SYSTÉMU EAGLE*. Webové stránky firmy SEMACH - výroba plošných spojů a SMT osazovacích planžet [online]. 2004 [30.6.2013]. Dostupné z < <http://www.semach.cz/pdf/eagle.pdf> >

doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D. a kolektiv. *ZÁKLADY KONSTRUKČNÍCH TECHNOLOGIÍ V ELEKTRONICE - Výroba DPS v laboratořích VŠB TU Ostrava*, učební text a návody do cvičení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, FEI, KAT 450. 2012 [30.6.2013]. Interní document.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ**



NAVRHOVÁNÍ A TECHNOLOGIE DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

Prototypové pracoviště CPIT C112

Ing. David Vala
Ing. Kristýna Friedrischková
Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D.
Ing. Bohumil Horák, ml.
Ing. Ondřej Balák

Ostrava 2013

© Ing. David Vala, Ing. Kristýna Friedrischková, Doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D., Ing. Bohumil Horák, ml., Ing. Ondřej Balák

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3062-9



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

1	PROTOTYPOVÉ PRACOVÍŠTĚ CPIT C112	3
1.1	Úvod	4
1.1.1	Tvorba předlohy	4
1.1.2	Export šablony z programu Eagle	4
1.1.3	Umístění předlohy na kuprexit se světlocitlivou vrstvou	7
1.1.4	Osvícení plošného spoje	9
1.1.5	leptání plošného spoje	10
1.1.6	Očištění plošného spoje	12
1.2	OSAZOVÁNÍ DESEK PLOŠNÉHO SPOJE POMOCÍ PÁJECÍHO PRACOVÍŠTĚ.....	14
1.2.1	Zapečení součástek v peci	17



1 PROTOTYPOVÉ PRACOVIŠTĚ CPIT C112



OBSAH KAPITOLY:

Tato kapitola seznamuje studenta s reálným zařízením umístěným na VŠB-TU Ostrava, Fakultě elektrotechniky a informatiky, Katedře kybernetiky a biomedicínského inženýrství v prototypové laboratorii CPIT C112. K tomu aby si student mohl úspěšně vyzkoušet nastudovanou problematiku je třeba se reálně seznámit s přístroji a nástroji k tomu určenými.



MOTIVACE:

Motivace je velmi jednoduchá, každý kdo by chtěl realizovat DPS v prototypové laboratorii CPIT C112 musí mít nastudován tento sylab jinak mu nebude povolen přístup na uvedené technologie.



CÍL:

Cílem je studenty reálně seznámit s technologiemi výroby plošných spojů.

1.1 ÚVOD

Na VŠB TU Ostrava, fakultě elektrotechniky informatiky a katedře kybernetiky a biomedicínského inženýrství se nachází prototypové pracoviště pro malosériovou a kusovou výrobu.

Prototypová laboratoř se nachází v budově CPIT v místnosti C112 která pod vedením doc. Bohumila Horáka obnovuje technologie a to jak k výrobě plošných spojů, tak u výroby 3D prototypingu.

Na tomto pracovišti se vyvíjí plošné spoje za pomoci vývojového nástroje Eagle. V níže uvedených kapitolách bude popsán celý cyklus výroby plošného spoje technologií běžně dostupnou studentům VŠB-TU Ostrava.

1.1.1 TVORBA PŘEDLOHY

V kapitole 7 bylo popsáno návrhové prostředí programu Eagle, kterým se tedy již nebudeme zabývat. K tomu aby bylo možné začít vyrábět plošný spoje je třeba si nejprve vyexportovat z programu Eagle šablonu. Export této šablony se provede následujícím způsobem.

1.1.2 EXPORT ŠABLONY Z PROGRAMU EAGLE

- 1) Otevřete program EAGLE, okno BOARD.
- 2) V programu FILE, otevřete záložku CAM Processor (obr.1).
- 3) V okně CAM Processor Vyberte pro jednostrannou DPS vrstvy (obr.2):
 - a. Bottom
 - b. Pads
 - c. Vias
 - d. Dimension
- 4) Vyberte typ exportu PS_INVERTED.
- 5) **Odškrkněte** v sloupci STYL, FILL PADS.
- 6) Zadejte místo uložení, např. C://Desktop/predloha.ps (soubor vždy s příponou ps).
- 7) Expotrujte tlačítkem PROCESS JOB.

Pro export oboustranné DPS postupujte následovně:

- Vrstva BOTTOM

Export se provede stejně jako v bodu 3.

- Vrstva TOP

Ve sloupečku STYLE musí být zaškrtnuto MIRROR.

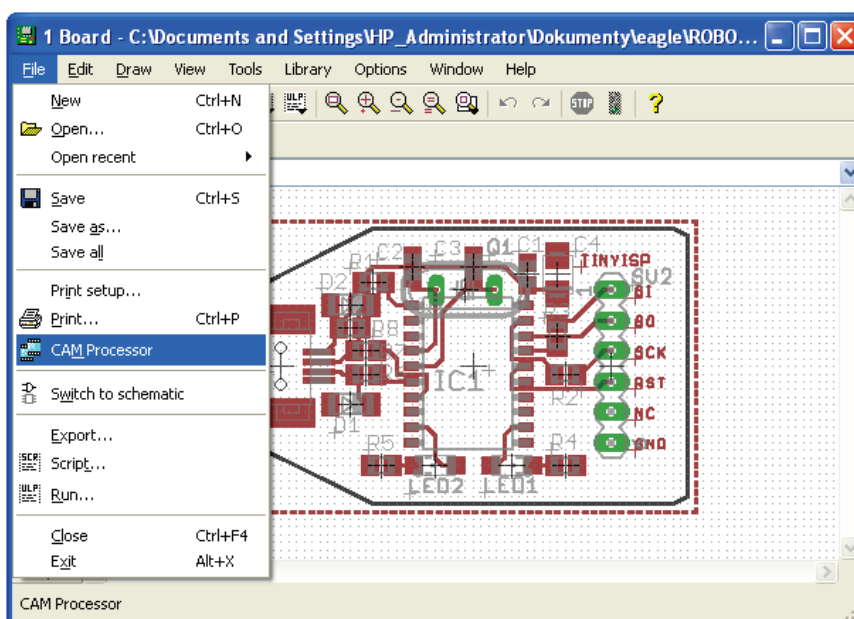


Výběr vrstev:

- a) Top
- b) Pads
- c) Vias
- d) Dimension

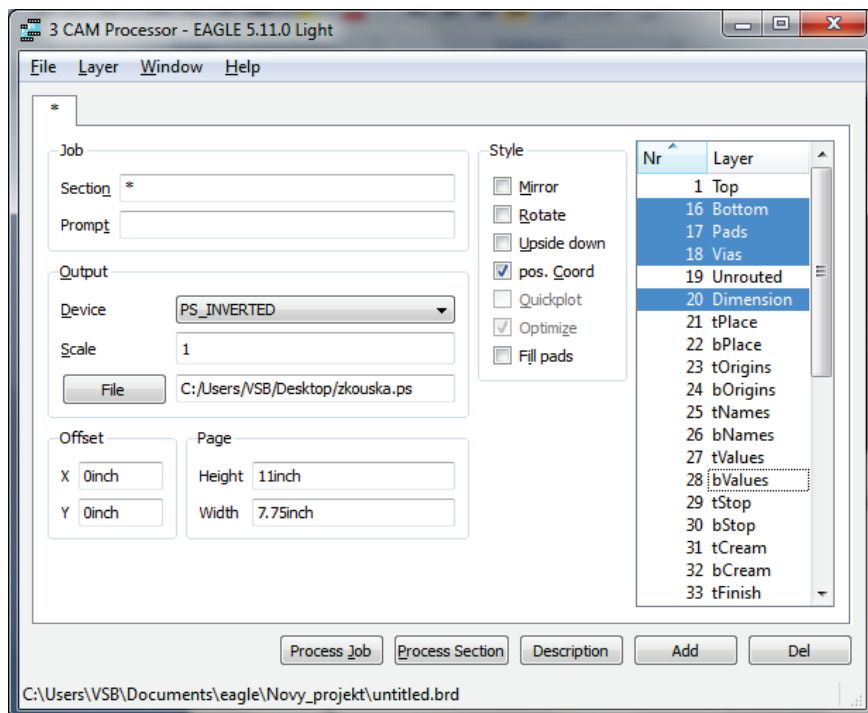
Po uložení souboru s příponou PS je nutné šablonu exportovat do grafického programu, který je schopen pracovat v křivkách. Nejlépe se pro tuto práci hodí program Corel.

- 8) Otevřete si Corel.
- 9) Vložte přetažením soubor predloha.ps do dokumentu v Corelu v křivkách (obr.3).
- 10) Vytiskněte předlohu na průhlednou fólii či pauzák (obr.4).

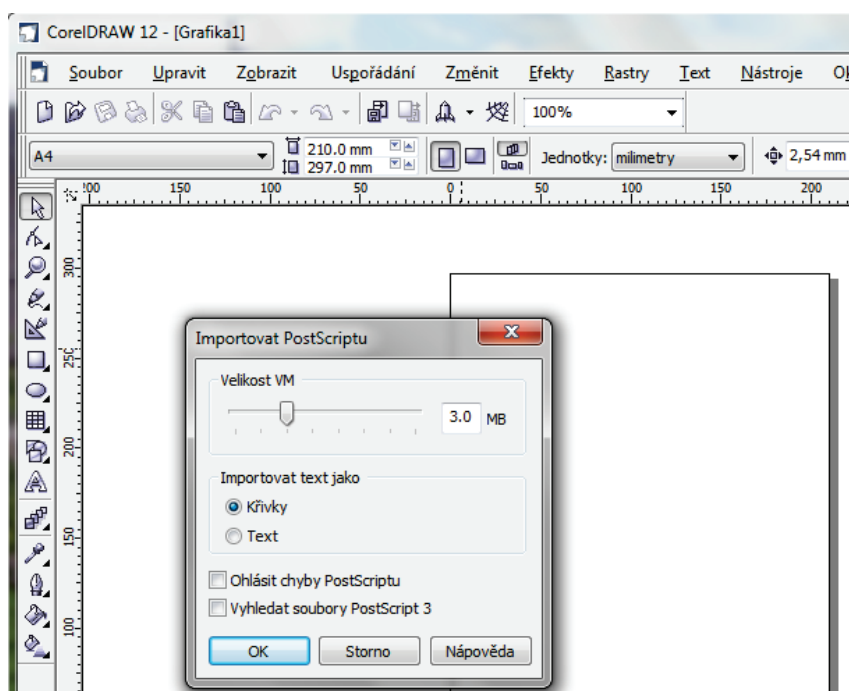


Obr.1. Ukázka exportu DPS



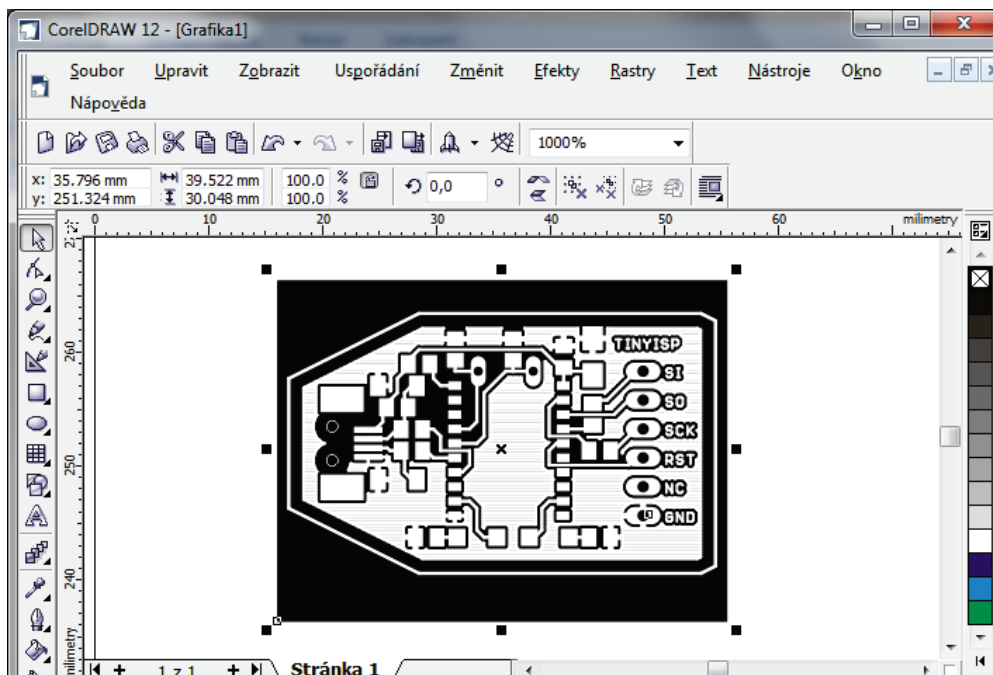


Obr.2. Okno CAM Processor

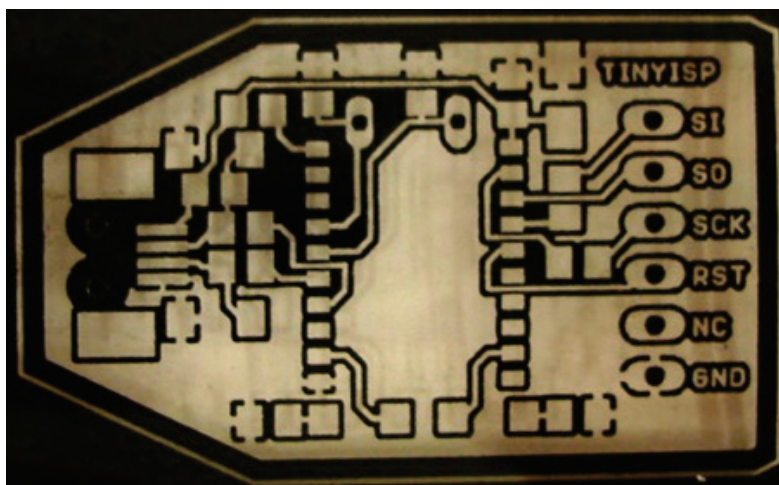


Obr.3. Export předlohy do grafického programu Corel





Obr.4. Exportovaná předloha



Obr.5. Vytisknutá předloha plošného spoje

1.1.3 UMÍSTĚNÍ PŘEDLOHY NA KUPREXTIT SE SVĚTLOCITLIVOU VRSTVOU

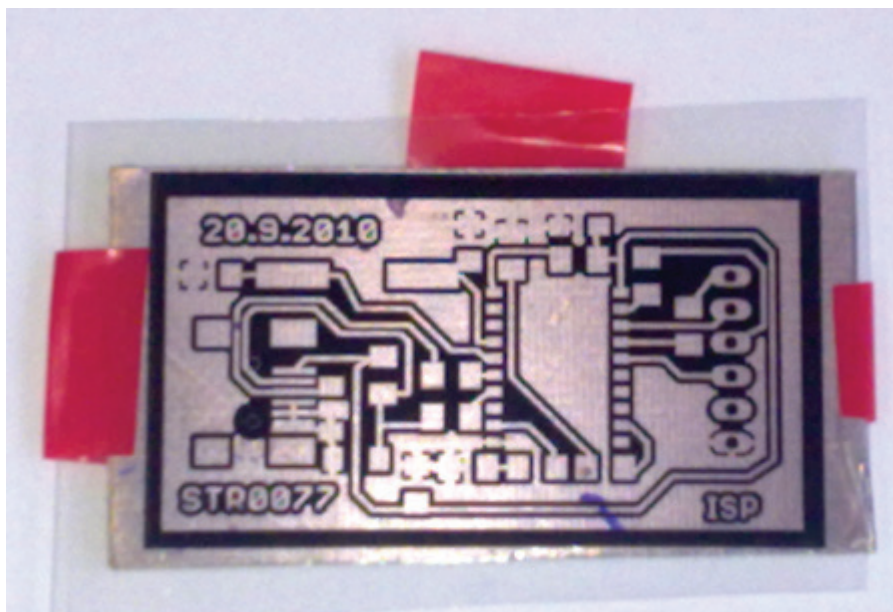
Po vytisknutí předlohy na průhlednou fólii například typu XEROX Premium Transparencies je nutné šablonu správně umístit na desku plošného spoje z kuprextitu. Tento proces se proveden následujícím způsobem:

REALIZACE JEDNOSTRANNÉ DPS

- 1) Nachystejte si kuprextit.K dostání po zapsání do knihy leprání u ing. Friedrischkové. Velikost kuprextitu by měla být přiměřená velikosti předlohy.
- 2) Předlohu umístěte na kuprextit tak, aby text umístěný na předloze byl čitelný.
- 3) Přichyťte předlohu kouskem lepicí pásky, tak aby nezasahovala do prostoru požadovaného tištěného spoje.



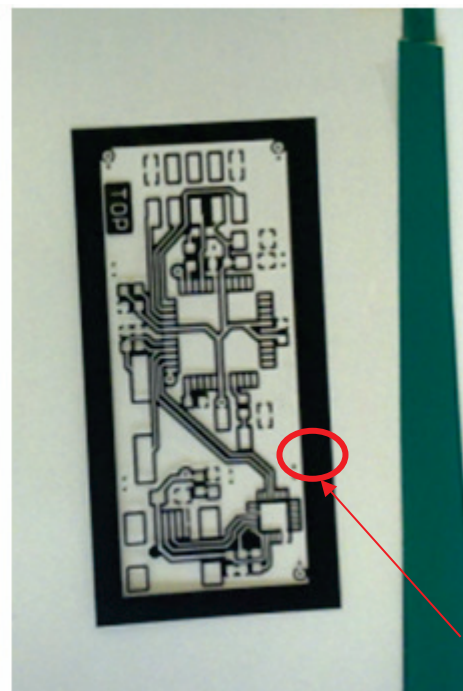
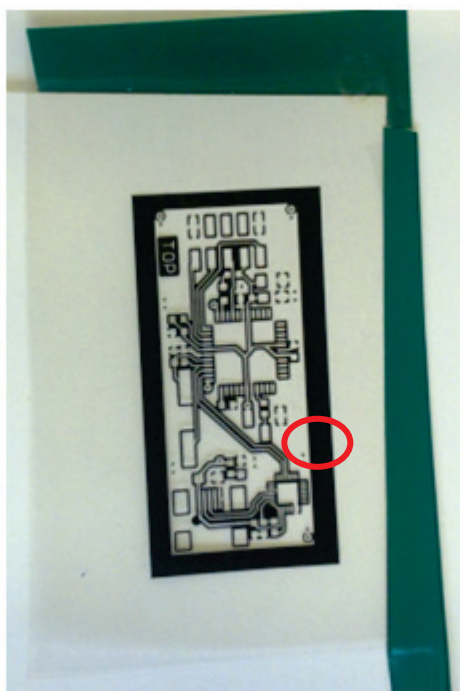
4) Neodstraňujte ochrannou fólii s kuprextitu!!!



Obr. 6. Jednostranná DPS: Nachystání kuprextitu, umístění předlohy, uchycení předlohy

REALIZACE OBOUSTRANNÉ DPS:

- 1) Vytiskněte si předlohu spojte tak, aby nápisy na předlohách bylo možné z obou stran přečíst.
- 2) Spojte jednotlivé body.
- 3) Přichyťte obě části lepicí páskou.
- 4) Nachystejte si kuprextit přiměřené velikosti (viz předchozí bod 1.).
- 5) Vložte kuprextit mezi předlohy a přichyťte jej lepicí páskou, tak aby se kuprextit s předlohou nehýbaly.

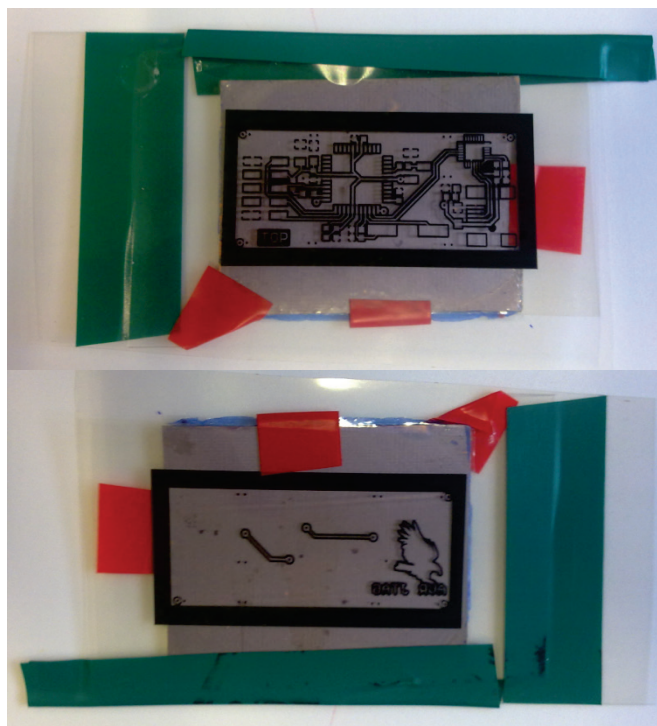


a)

b)

c)

Obr. 7. Oboustranná DPS: Nachystání předlohy a) Bottom strana, b) Top strana, c) spárování



Obr.8. Oboustranná DPS: Umístění a přichycení předlohy

1.1.4 OSVÍCENÍ PLOŠNÉHO SPOJE

Po přichycení šablony na kuprextiti je nutné přenést motiv na kuprextit, tento proces se provádí za pomoci osvitů v osvitové jednotce. V prototypové laboratoři je k dispozici jak jednostranná, tak oboustranná osvitová jednotka.

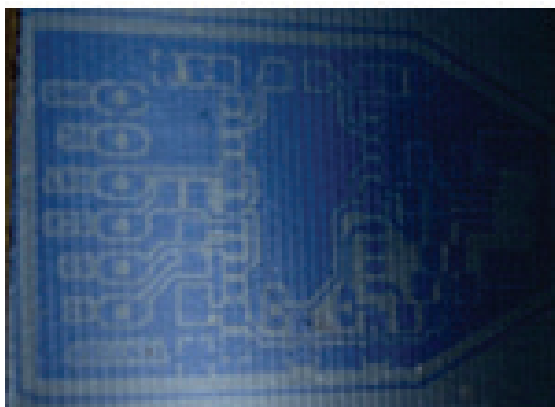
POSTUP OSVITU:

- 1) Vložte kuprextit s předlohou do osvitové jednotky.
- 2) Zatěžte víko.
- 3) Stiskněte zelené tlačítko START. Na displeji se vám bude odpočítávat čas osvitů (1min 30s).
- 4) Po dokončení osvitů DPS vyndejte.
- 5) Odejměte ochranou fólii z kuprextitu.

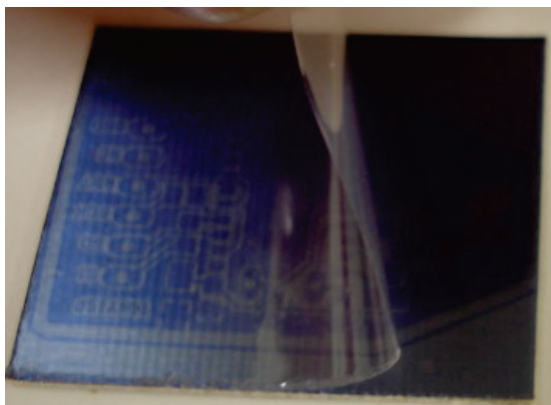




Obr. 9. Osvitová jednotka



Obr. 10. Osvícený spoj na kupreřtitu



Obr. 11. Sundání ochranné fólie

1.1.5 LEPTÁNÍ PLOŠNÉHO SPOJE

Po osvícení kupreřtitu je nutné odstranit přebývající části mědi. Tento proces se skládá z dvou částí:

- Vyvolání plošného spoje
- Leptání plošného spoje



VYVOLÁNÍ PLOŠNÉHO SPOJE

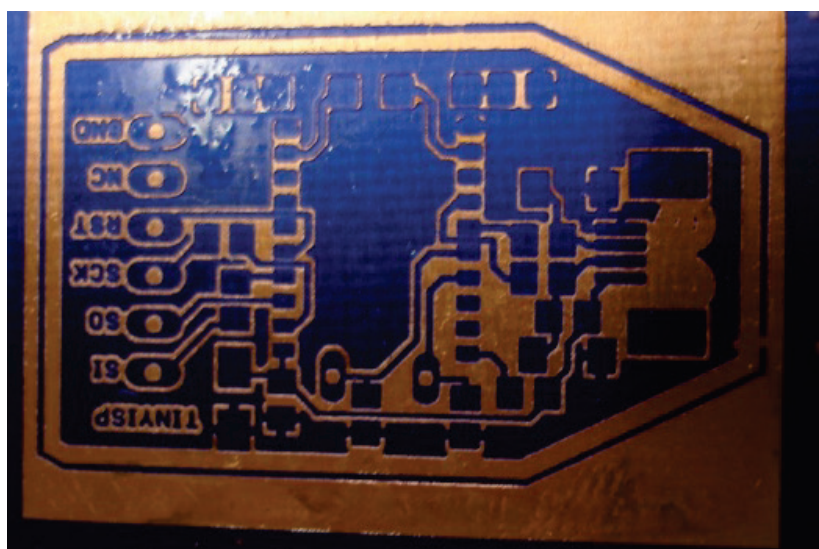
Postup při vyvolání plošného spoje:

- 1) Vezměte roztok číslo 1 (uhličitan sodný, obr.12a) a nalijte jej do misky. Leptací roztoky jsou umístěny v hnědé skřínce pod osvitovou jednotkou vpravo.
- 2) Vložte kuprextit do připraveného roztoku. Pro urychlení procesu můžete použít štětec, Obr. 12b.
- 3) Vyjměte kuprextit jakmile bude měď na kuprextitu čistá a lesklá, viz.obr 13.
- 4) Opláchněte vyvolanou DPS pod tekoucí vodou.

Pro oboustrannou DPS kroky 1-4 opakujte na každé straně.



Obr. 12. a) leptací roztok 1-uhličitan sodný, b) leptací proces



Obr.13. DPS po vyvolání



LEPTÁNÍ PLOŠNÉHO SPOJE

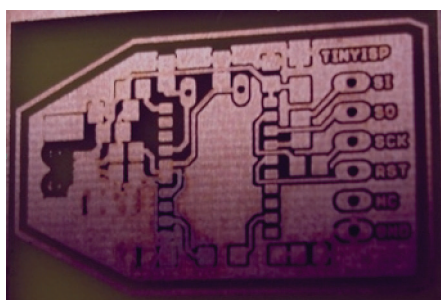
Postup při leptání plošného spoje.

- 1) Vezměte leptací roztok číslo 2 a nalijte jej do misky.
- 2) Vložte vyvolanou DPS do leptacího roztoku 2. Při vkládání DPS do leptacího roztoku dbejte na to aby na DPS nebyly bublinky vzduchu a nečistoty, nemuselo by dojít ke správnému vyleptání plošného spoje.
- 3) Vyjměte DPS z leptacího roztoku poté co budou odstraněny přebytečné plošky mědi.
- 4) DPS opláchněte pod tekoucí vodou.

Pro oboustrannou DPS realizujte kroky 1-4 na každé straně.



Obr.14. a) Leptací roztok chlorid železitý, b) položení DPS do roztoku



Obr. 15. DPS po odleptání

1.1.6 OČIŠTĚNÍ PLOŠNÉHO SPOJE

Po vyleptání máme již skoro hotovo. Měděné části stále chrání tenká vrstva rotozeristu, která chrání vodivé části spoje před mechanickým poškozením proto je vhodné před jejím odstraněním provést všechny mechanické úkony jako jsou vrtání, broušení atd a poté postupovat dle návodu.



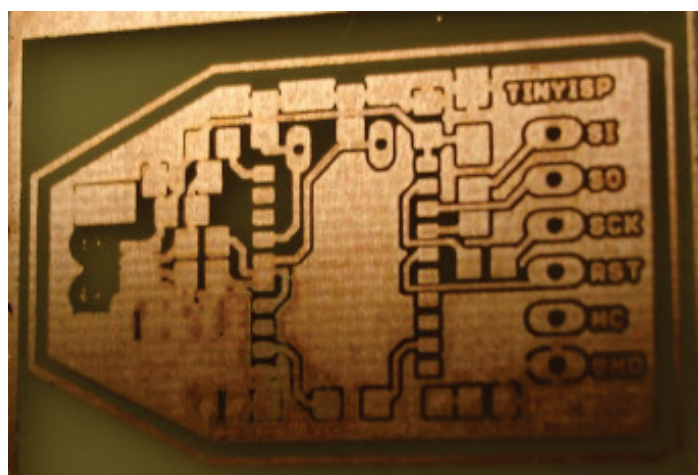
Postup práce:

- 1) Vezměte roztok číslo 3 – hydroxid sodný (obr.16) a nalijte jej doisky.
- 2) Destičku do tohoto roztoku ponořte a pinzetou po chvíli odstraňte ochrannou vrstvičku z plošného spoje.
- 3) Následně plošný spoj opláchněte pod tekoucí vodou a utřete. Nechte jej pár minut uschnout.
- 4) Naneste ochrannou vrstvu před korozi pomocí Fluxu ve spreji, který naleznete na stejném místě jako leptací roztoky.
- 5) Nechte pár minut zaschnout.

Pro oboustrannou DPS realizujte kroky 1-6 na každé straně.



Obr. 16. Čistící roztok 3



Obr.17. Hotová deska plošného spoje

1.2 OSAZOVÁNÍ DESEK PLOŠNÉHO SPOJE POMOCÍ PÁJECÍHO PRACOVISTĚ

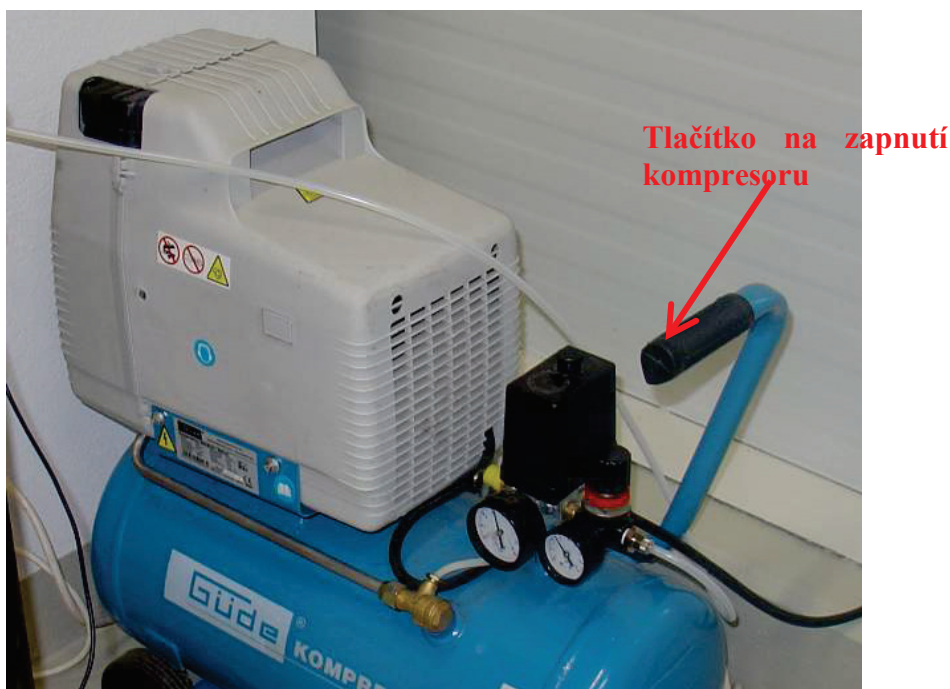
K tomu, aby bylo možné ukončit celkový technologický proces realizace desky plošného spoje je zapotřebí ji osadit příslušnými elektrotechnickými součástkami. K tomu slouží v prototypové laboratoři CPIT C112 tři typy pájení:

- Ruční (mikropájka, trafopájka)
- Ruční osazení na teleoperátoru
 - Pájení v reflow peci
 - Pájení pájecí vlnou v pájecí lince Ersu
- Automatické osazení na osazovacím stroji Essemtec
 - Pájení v reflow peci
 - Pájení pájecí vlnou v pájecí lince Ersu

Nejčastěji používanou technologií je osazení desky plošného spoje na teleoperátoru a zapájení v malé reflow peci.

NATLAKOVÁNÍ KOMPRESORU NASTAVENÍ DÁVKOVAČE CÍNU

- 1) Zapněte prodlužovací šňůru.
- 2) Zapněte tlačítko na zapnutí kompresoru (obr.18).
- 3) Vyčkejte než se kompresor sám vypne (bude natlakován).
- 4) Zapněte osazovací jednotku.
- 5) Nastavte redukční ventil na 5barů (obr.19).
- 6) Naneste cín na potřebné plošky.

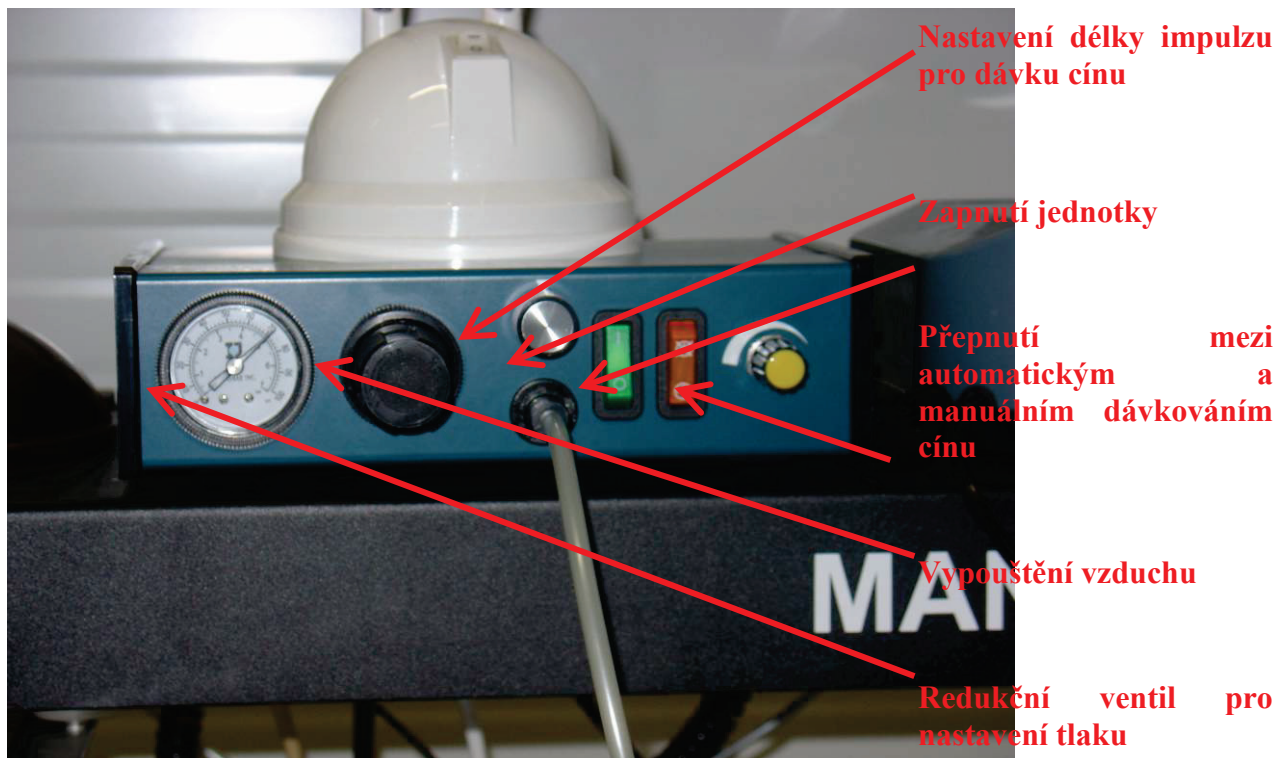


Obr.18. Kompresor

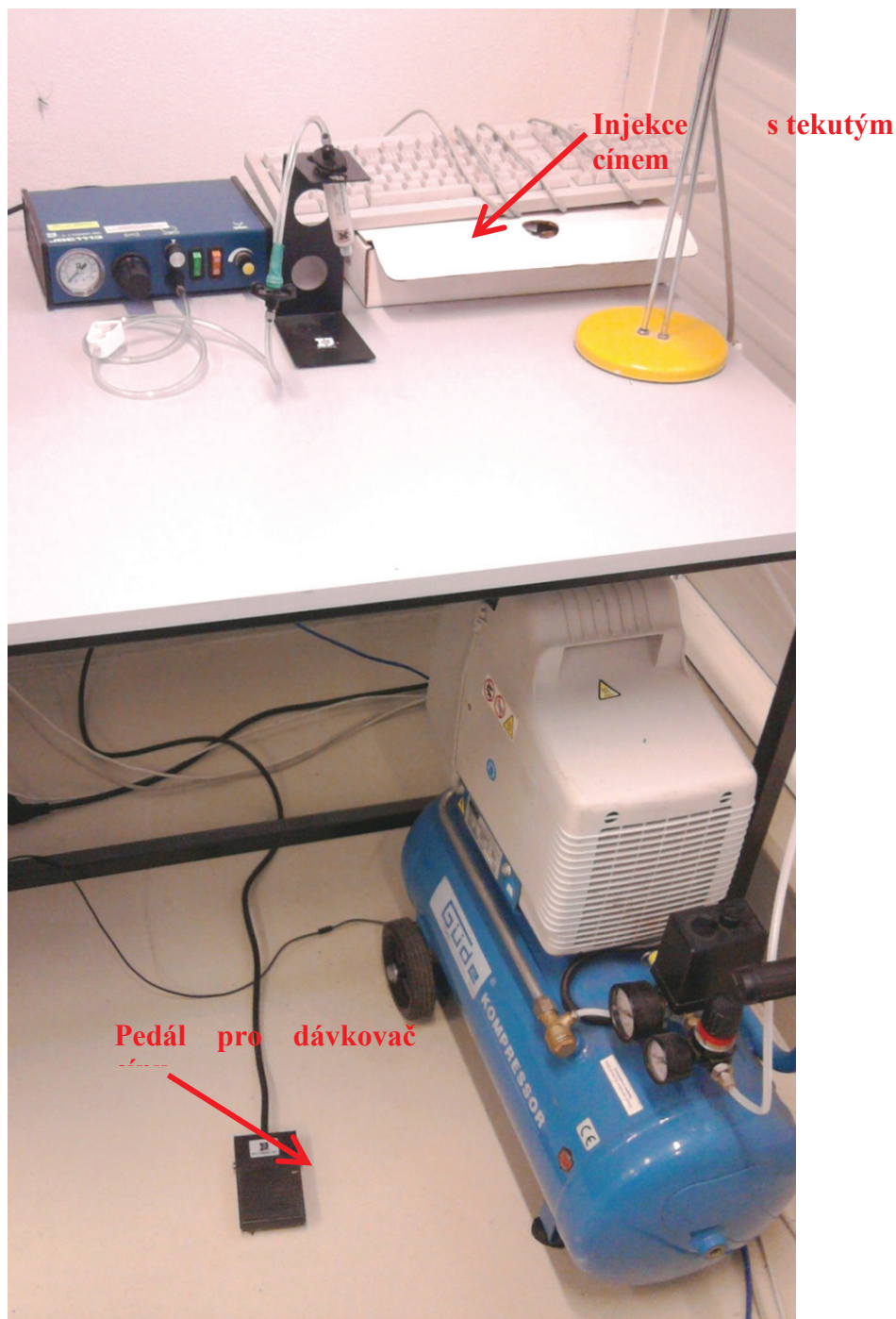
Pozn: Regulace dávkování cínu

Délka impulzu ovlivňuje množství dávky cínu. Tento čas se mění podle vlastnosti cínové pasty a podle velikosti pedu součástky.

Redukčním ventilem je možné nastavit tlak. Čím je tlak vyšší, tím je cínové pájky v dávce více. Doporučené nastavení je od 3,5 do 5 barů.



Obr. 19 Dávkoř cínu



Obr. 20 Osazovací pracoviště

OSAZOVACÍ JEDNOTKA

Postup při realizaci osazení osazovací jednotkou.

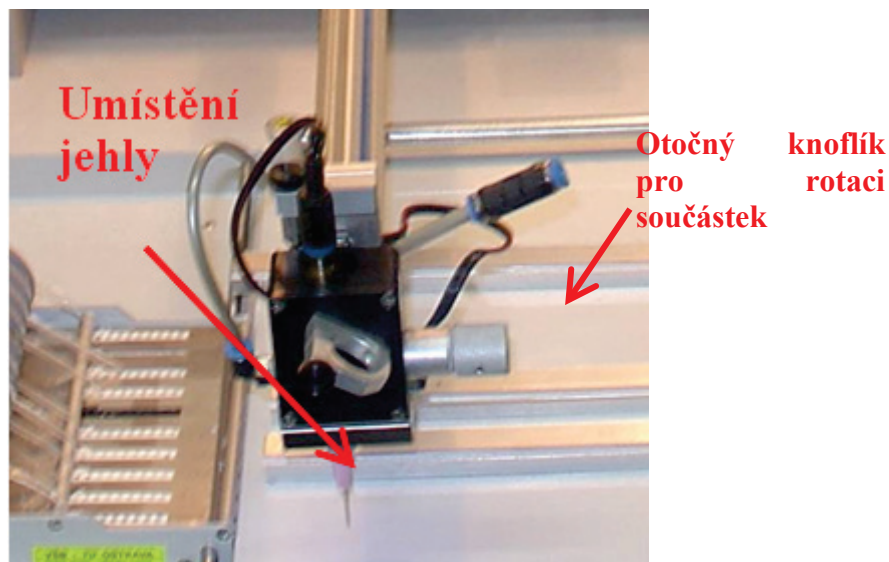
- 1) Usad'te DPS mezi vodítka.
- 2) Přichystejte si potřebné součástky.
- 3) Zapněte zdroj vakuua.
- 4) Nastavte výkon vakuového čerpadla na střední nebo maximální hodnotu (obr.4).
- 5) Pomocí osazovací hlavy osad'te DPS (obr.4).



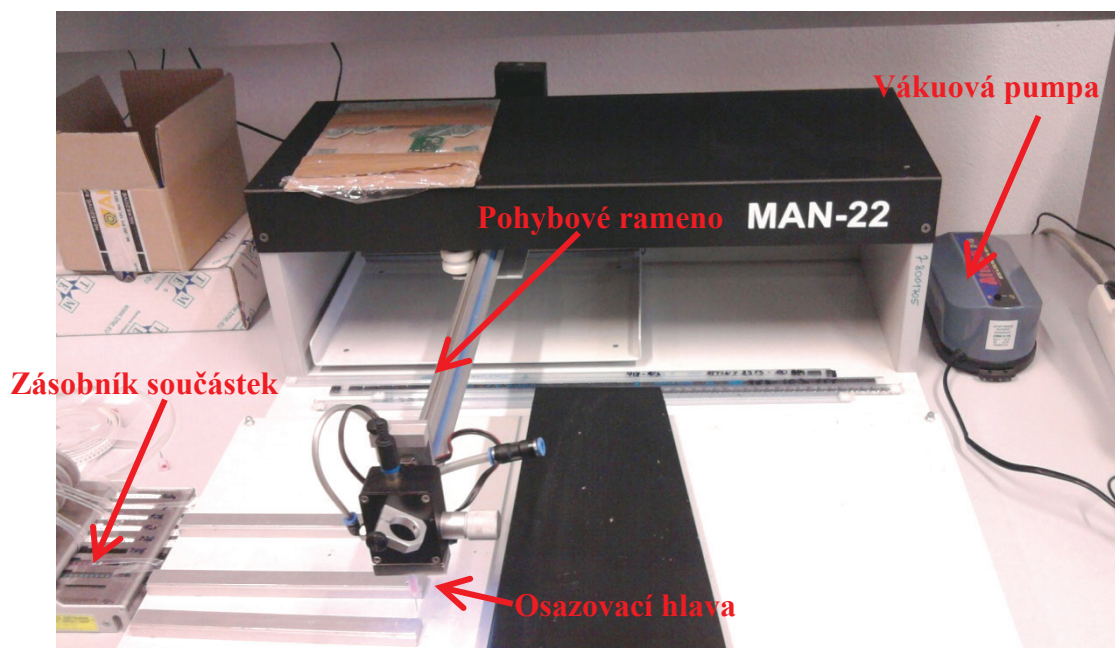
- a. Na nachystanou součástku přitiskněte jehlu.
- b. Položte na požadované místo (opětovným přitisknutím se součástka uvolní).

Pozn: Součástkou je možno pohybovat společně s manipulační hlavou, pro rotaci součástky slouží otočný knoflík.

- 6) Osad'te všechny součástky.



Obr. 21 Osazovací hlava s jehlou



Obr. 22 Vákuové čerpadlo

1.2.1 ZAPEČENÍ SOUČÁSTEK V PECI

Po nanesení cínu a usazení součástek na svá místa je třeba provést fixaci. Tato fixace se provádí za vysokých teplot v pájecí peci, která má předem definovanou pájecí křivku pro daný typ pájecí pasty.

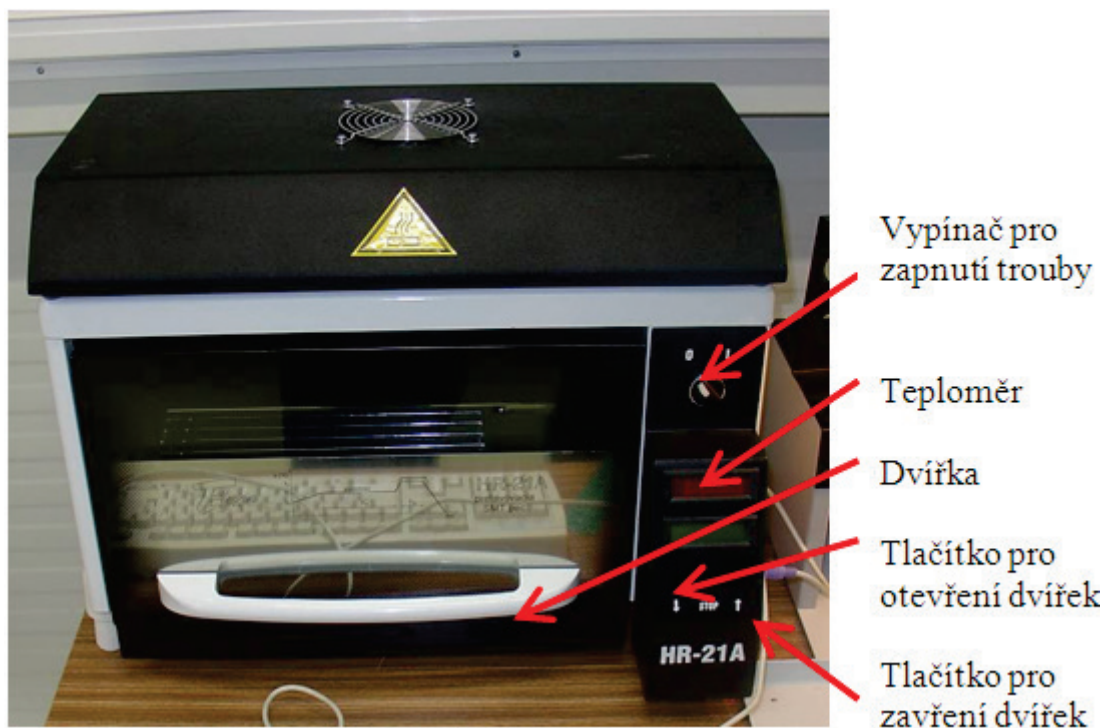


Postup při fixaci:

- 1) Uvolněte prostor před dvířky.
- 2) Zapněte troubu.
- 3) Počkejte na pokyn trouby k otevření (vypíše se na displeji “otvorte dvere”).
- 4) Stiskněte tlačítko pro otevření dveří.
- 5) Vložte DPS doprostřed roštu trouby.
- 6) Vyčkejte pokynů trouby k zavření dveří (vypíše se na displeji “zavrete dvere”).

Pozn: Probíhá předem nastavený program pro standardní pájení v peci. Deska se pájí infraohřevem, a proto není možné se dívat přímo do ohřívacích lamp ani přes dvířka, protože by mohlo dojít k poškození zraku.

- 7) Vyčkejte na samo otevření dveří.
- 8) Počkejte na vychladnutí DPS.
- 9) Vyjměte DPS.
- 10) Po ukončení pájení nechte troubu vychladnout s otevřenými dvířky na cca 80°C.
- 11) Vypněte troubu.
- 12) Po úplném vychladnutí trouby přikryjte přehozem.



Obr. 23 Pájecí trouba

