

Signal Integrity prakticky: přizpůsobení spoje přenosu signálu

S používáním rychlejších součástek na deskách plošných spojů nabývají na stále větším významu analýzy Signal Integrity. Při přenosu rychlého signálu se spoj chová jako přenosová linka, na které dochází k celé řadě nežádoucích jevů, jako jsou deformace průběhu signálu, zakmitávání, přeslechy nebo vyzařování. Tyto jevy mohou způsobit občasné nebo úplné selhání funkce obvodu, i když navržená deska je elektricky zapojena zcela správně. Analýzy Signal Integrity sledují kvalitu přenosu signálu. Vývojáři obvodů i návrháři desek mají jistou představu o možném řešení problematických spojů, ale při použití velmi rychlých obvodů již většinou praktické zkušenosti nestačí, protože řešení vyžaduje přesnější analýzy.

V tomto článku se zaměříme na praktické řešení problémů s přenosem signálu plošným spojem. Začneme jednoduchým spojem mezi výstupem a vstupem rychlého obvodu, zjistíme vliv šířky a délky spoje, jeho umístění ve vícevrstvé desce a zkusíme najít vhodný zakončovací člen. V navazujících článcích se potom zaměříme na problémy s přeslechy, EMC, vlivy via otvoru, přenosy signálu přes konektor na další desku, plošnými spoji v GHz pásmu, použitím DDR pamětí atd.

Nebudeme se zabývat teorií přenosu signálu, ale praktickým řešením možných problémů z pohledu vývojáře obvodu a návrháře desky plošných spojů. Pro analýzu ještě ve stádiu vývoje zapojení použijeme program Hyperlynx LineSim a pro kontrolu situace na již navržené desce program Hyperlynx BoardSim. Tyto programy byly vybrány proto, že představují tzv. „desktop“ řešení – čili něco, co může používat běžný vývojář a návrhář desky bez nutnosti být expertem na Signal Integrity analýzy.

Jak již bylo uvedeno, analýzy přenosu signálu plošným spojem lze provádět již při vývoji zapojení obvodu (ještě před návrhem desky plošných spojů) nebo již na navržené desce.

Analýza ve stádiu vývoje zapojení obvodu sice nezná přesné geometrické rozměry na desce ani skutečné rozmístění součástek, ale i tak umožňuje zjistit nutné předpoklady pro správné provedení plošného spoje, které jsou potom doporučením pro návrh desky. Výsledkem takovéto analýzy je např. maximální délka spoje, umístění na určité vrstvě desky, složení desky z jednotlivých vrstev (layer stackup) nebo vhodný zakončovací člen a jeho hodnota. Dodržení těchto podmínek při návrhu dává velmi reálnou šanci, že navržená deska bude fungovat správně.

Analýza přenosu signálu na již navržené desce potvrdí správnost vývoje obvodu, případně upraví některé její parametry tak, aby šance pro zhotovení funkční prototypové desky byla co nejvyšší.

Proč provádět předběžnou analýzu ještě před návrhem desky, když lze tutéž analýzu provést na skutečném plošném spoji již navržené desky? Protože potřebné úpravy lze snadno zahrnout do požadavků na následující návrh desky, zatímco v opačném případě potřebné změny na desce vyžadují předělání návrhu. Je snadné přidat rezistor o určité hodnotě do schematického obvodu, stejně jako předepsat maximální délku plošného spoje a jeho položení na určitou vrstvu desky. Naproti tomu dodatečné úpravy na navržené desce znamenají zpoždění a zvýšené náklady.

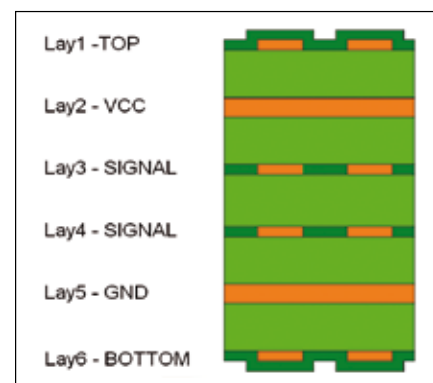
Z toho vyplývá, že analýza přenosu kritického signálu spojem ještě před návrhem desky je zcela základní analýzou, kterou by měl vývoj zapojení projít. Její výhodou je i to, že není vázána na žádný konkrétní návrhový systém DPS, protože analyzované zapojení se kreslí v jejím vlastním editoru. Nekreslí se celé schematické zapojení, ale pouze kritické spoje a navíc poněkud jiným způsobem než je obvyklé v běžných programech pro kreslení schémat. V nakresleném zapojení se uplatňují jen vstupy a výstupy sou-

Ing. Milan Klauz
CADware s.r.o.

částek v podobě speciálních schematických symbolů, kterým se přiřazují modely součástek. Plošný spoj je znázorněn symbolem přenosové linky.

Deska plošných spojů

Úvodem je třeba zmínit, že pro zajištění návratu signálu ke zdroji vyžadují analýzy nutně jednu vrstvu desky jako napájecí (GND plane). Dvouvrstvé desky bez zemnicí vrstvy nesplňují tento požadavek a jejich spoje se z hlediska přenosu signálu chovají nekontrolovatelně. Proto se v našich analýzách budeme vždy zabývat vícevrstvními deskami se zemnicí napájecí plochou.



Obr. 1 Složení vrstev desky

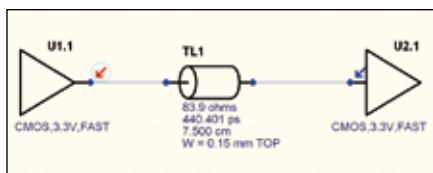
Před vlastní analýzou přenosu signálu je potřeba zadat data o desce, jako je počet vrstev a jejich rozložení (layer stackup), tloušťky jednotlivých vrstev mědi, dielektrik a jejich fyzikální vlastnosti atd. Program bere v úvahu i fyzikální vlastnosti dielektrika nepájivé masky na straně spojů. V programu jsou k dispozici obvyklé hodnoty, které lze při konkrétní analýze podle potřeby upravit. Z toho ale vyplývá, že již v tuto chvíli je potře-

ba mít určitou představu o budoucí desce plošných spojů.

Deska, na které provedeme analýzu, bude mít 6 vrstev (obr. 1). Signálními vrstvami jsou vrstvy 1, 3, 4 a 6, zatímco napájecími vrstvami jsou vrstvy 2 a 5.

Schematické zapojení obvodu

Analyzovaný obvod sestává ze dvou součástek, kde výstup z U1.1 je zapo-



Obr. 2 Zapojení obvodu

jen přímo na vstup U2.1. Aby bylo možné obvod simulovat, je potřeba vybrat IBIS modely obou součástek. Mohli bychom vybrat modely skutečných použitých součástek, ale zde jsou pro názornost principu simulace vybrány jako pří-

klad modely součástek CMOS technologie 3,3 V FAST. V programu Hyperlynx je několik desítek tisíc modelů jak konkrétních součástek, tak generických pro určité třídy součástek. IBIS modely je také možné stáhnout z webových stránek výrobců.

Analyzovaný plošný spoj

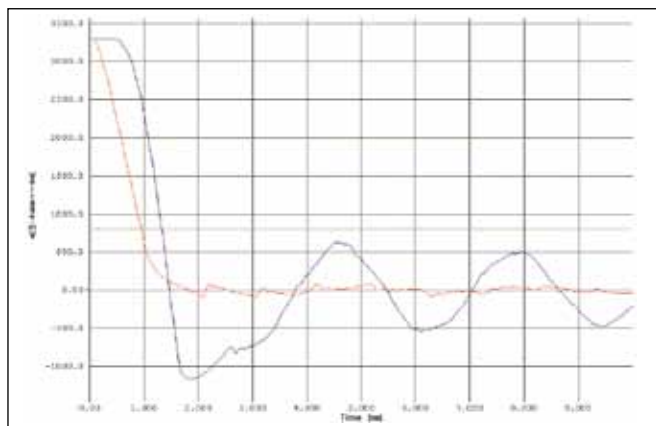
Plošný spoj je v zapojení znázorněn přenosovou linkou, pro kterou jsou v tabulce programu zadány parametry jako např. šířka spoje (tloušťka mědi je již definována v rozložení vrstev desky). Spoj má šířku 0,15 mm, předpokládanou délku 75 mm a je tažen na horní straně desky (TOP). Program kalkuluje jeho impedanci (83,9 Ω), odpor (0,503 Ω), zpoždění (0,440 ps), kapacitu a indukčnost. Předpokládaná délka spoje vychází z úvahy o možném rozmístění součástek na desce a jejich vzájemných vzdálenostech. V tomto případě je délka odhadnuta jako maximální

délka, kterou je možné v případě potřeby později zkrátit. Obrácený postup by jen zhoršoval výsledek.

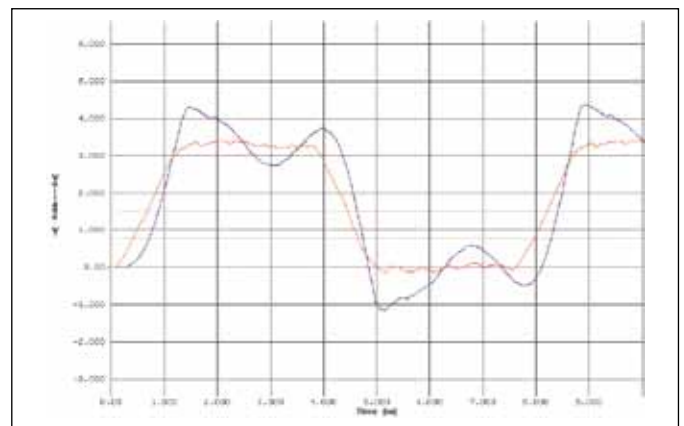
Simulace přenosu signálu

Po přiřazení modelů součástkám, definování rozložení vrstev a parametrů desky, definování šířky a délky plošného spoje je možné přikročit k simulaci přenosu signálu tímto spojením. Signálem může být impuls se sestupnou a vzestupnou hranou nebo oscilující signál. Výsledky jsou zobrazeny v podobě průběhů signálu v připojených místech spoje. V případě našeho obvodu to znamená u výstupu (červená) a vstupu (modrá).

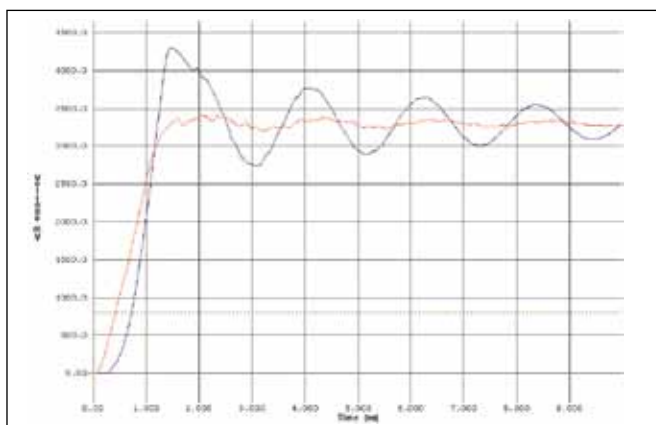
Ze zobrazeného výsledku (obr. 3) je patrné, že signál přichází na připojený vstup se zpožděním asi 0,4 ns, ale silně zakmitává jak do záporné, tak kladné oblasti napětí s maximální hodnotou přibližně -1,2 V. Hodnoty lze přesně odečítat jak pro časovou, tak napěťovou úro-



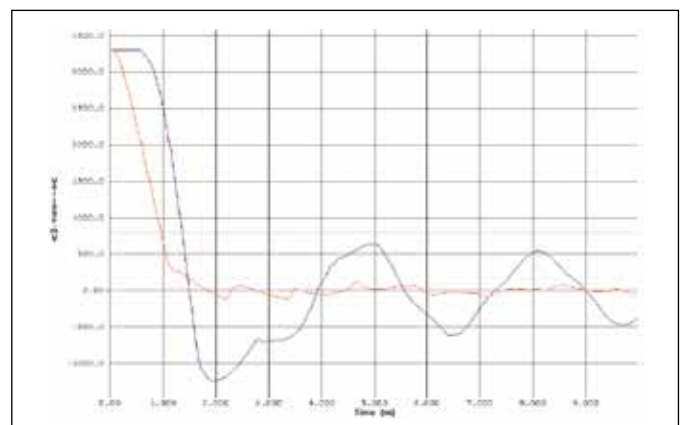
Obr. 3 Přenos signálu – impuls, sestupná hrana



Obr. 5 Přenos oscilujícího digitálního signálu



Obr. 4 Přenos signálu – impuls, vzestupná hrana



Obr. 6 Přenos signálu na vrstvě 4

veř, stejně jako zjišťovat rozdíly hodnot ve dvou vybraných místech.

Na dalších obrázcích (č. 4 a 5) jsou znázorněny průběhy signálu na vzestupné hraně a průběhy oscilujícího signálu. Vidíme, že poměry se poněkud liší, nicméně výsledky jsou rovněž znepokojující.

Možné přizpůsobení plošného spoje

Co můžeme s plošným spojem udělat, aby se podmínky pro přenos signálu zlepšily? Můžeme ho zkusit přesunout z horní strany desky dovnitř nebo změnit jeho délku či šířku. Můžeme také aplikovat některý způsob zakončení plošného spoje v podobě sériového, nebo pull-up či pull-down rezistoru. Podívejme se na tyto jednotlivé případy.

Plošný spoj uvnitř desky

Přesuneme plošný spoj z horní strany dovnitř desky např. na vrstvu 4. Spoj se

nachází mezi napájecími plochami desky, blíže k vrstvě GND. Šířka a délka spoje zůstávají stejné (0,15 mm/75 mm), ale jeho impedance se změní z 83,9 Ω na 65,7 Ω . Z výsledku vyplývá, že průběh signálu na vstupu (modrá) je zhruba stejný a situace s přenosem signálu se nijak nezlepšila (obr. 6).

Změna šířky plošného spoje

Plošný spoj je zpátky na horní straně desky, ale jeho šířka je změněna na dvojnásobek, to znamená na 0,3 mm. Impedance spoje se tím změnila na 63,2 Ω , délka spoje zůstává stejná 75 mm. Výsledek přenosu signálu je na obr. 7. Vidíme, že šířka spoje má na přenos signálu minimální vliv (kromě změny impedance).

Zkrácení délky plošného spoje

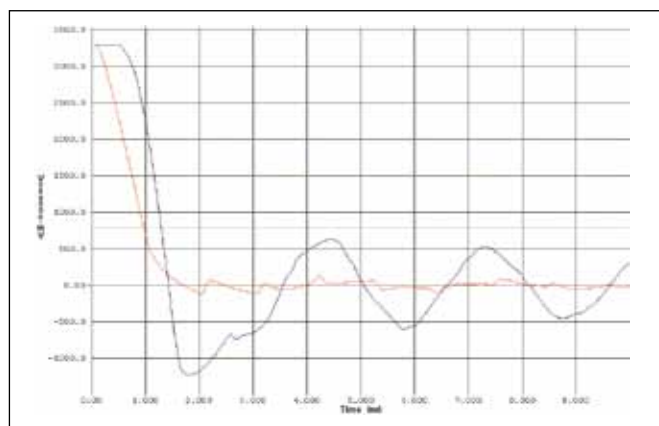
Délka plošného spoje hraje důležitou roli v přenosu signálu. Čím delší je spoj, tím horší jsou podmínky pro přenos sig-

nálu. Zkusme tedy plošný spoj zkrátit ze 75 mm třeba na 25 mm. Šířka spoje je opět na původní hodnotě 0,15 mm, spoj je tažen na horní straně desky. Zkrácení spoje nemá vliv na impedanci, která zůstává 83,9 Ω .

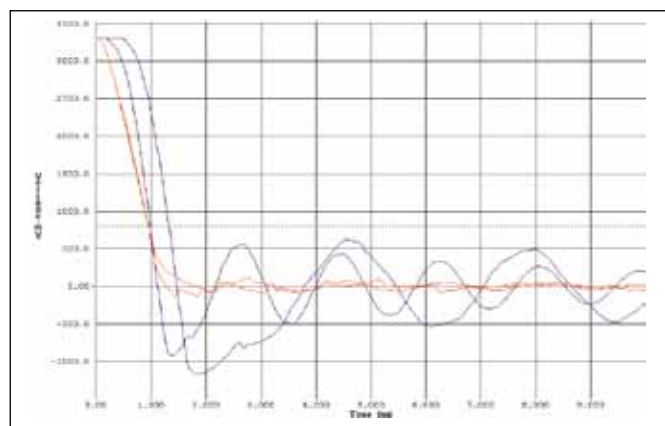
Na obr. 8 je znázorněn průběh signálu, ze kterého je zřejmé, že skutečně došlo ke zlepšení situace, ale více v časové ose. Napětové úrovně na připojeném vstupu se sice také trochu zlepšily, ale signál po dosažení vstupu i nadále silně zakmitává.

Program umožňuje porovnávat výsledky dvou po sobě jdoucích analýz. Provedeme tedy ještě jednou analýzu přenosu signálu pro původní délku 75 mm a potom si zobrazíme porovnání s předcházejícím výsledkem (délka spoje 25 mm). Na obr. 9 je výsledek. Průběh signálu na výstupu (červená barva) je zhruba stejný, zatímco průběhy na vstupu připojené součástky (modrá barva) jsou rozdílné.

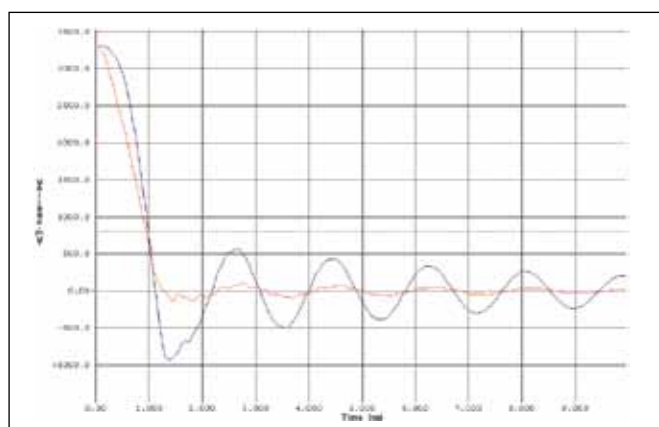
Zkusme nyní zjistit, jak by vypadala situace pro různé délky plošného spoje současně. Program umožňuje pro-



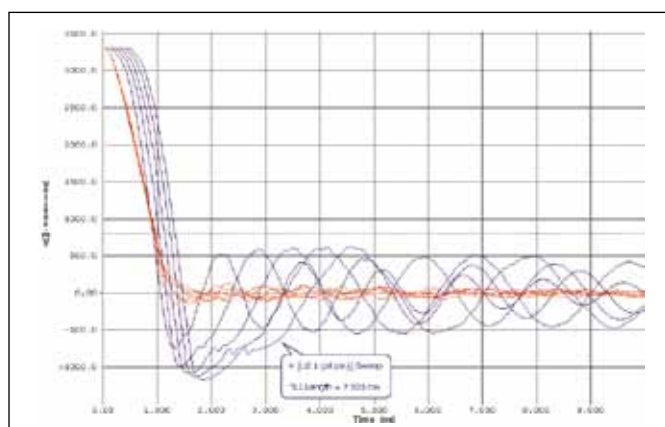
Obr. 7 Průběh signálu pro šířku spoje 0,3 mm



Obr. 9 Porovnání průběhů signálů spojů 25 a 75 mm



Obr. 8 Přenos signálu pro spoj 25 mm



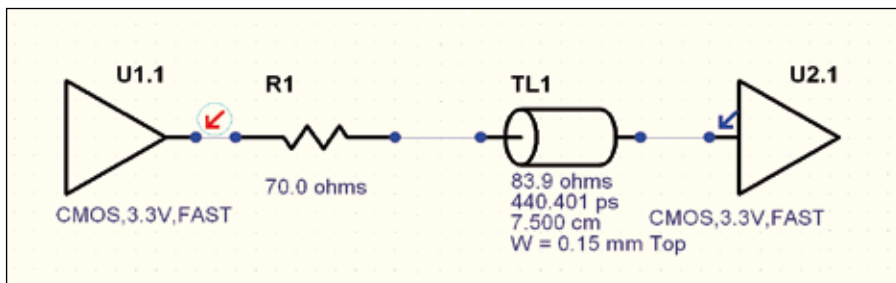
Obr. 10 Přenos signálu pro délky spoje 15–75 mm

vést analýzu pro zadaný rozsah hodnot. Zvolme rozsah délek plošného spoje 15 až 75 mm po 15 mm. Šířka zůstává 0,15 mm a spoj je i nadále položen na horní straně desky. Výsledkem jsou

notu zvolíme 70 Ω. Spoj má svoji původní délku 75 mm (nyní i včetně rezistoru) a také ostatní parametry zůstaly beze změny (šířka 0,15 mm, horní strana desky).

odporu. Je tedy potřeba zvážit, jak přiblížením součástek zkrátit spoj. Předpokládejme, že nebude možné zkrátit spoj na méně než 35 mm. Pro tuto hodnotu délky program navrhl optimální hodnotu rezistoru 62 Ω (obr. 14a). Maximální délkou spoje se rozumí délka skutečného spoje od vývodu k vývodu, včetně rezistoru. Jelikož i vzdálenost mezi výstupním vývodem a rezistorem musí být minimální, program kalkuluje maximální možnou vzdálenost mezi vývodem a připojeným rezistorem (Length to driver). Ta je v tomto případě 0,805 cm.

Výsledek přenosu signálu je na obr. 14b.



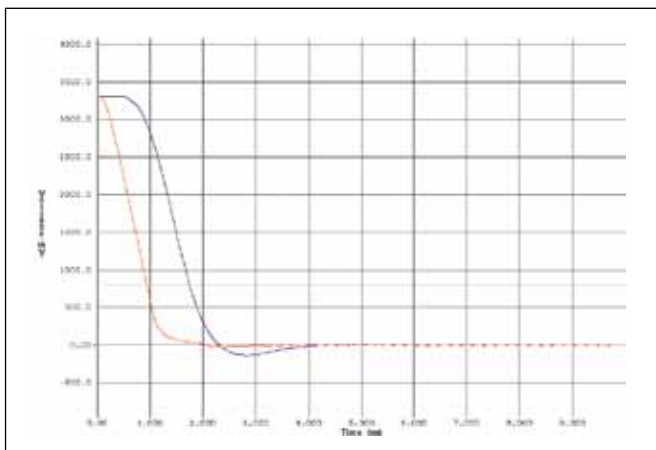
Obr. 11 Obvod se sériovým rezistorem

průběhy signálu na obr. 10. Signál přichází na připojený vstup se zpožděním a překmitnutím do záporných napěťových hodnot, které je úměrné délce spo-

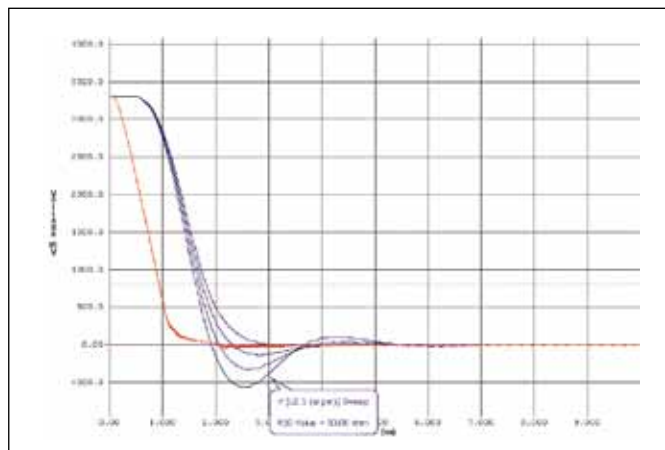
Z výsledku analýzy (obr. 12) je patrné podstatné zlepšení průběhu signálu na připojeném vstupu, ale za cenu delšího zpoždění mezi výstupem (červe-

Závěr

Analýzy přenosu signálu ještě před návrhem desky sice neznají přesnou geo-



Obr. 12 Přenos signálu při sériovém rezistoru



Obr. 13 Přenos signálu při sériovém rezistoru 50–80 Ω

je. Zcela nejnižší hodnotu průběhu signálu na vstupu má plošný spoj s délkou 75 mm.

Přizpůsobení sériovým rezistorem

Jelikož zkrácení délky plošného spoje nevyřešilo úplně problém s přenosem signálu, nezbyvá, než zkusit použití zakončovacího členu. Z několika variant (sériový rezistor, pull-up nebo pull-down rezistor, RC člen) vybereme sériový rezistor, protože nejméně zatěžuje napájecí obvod a výstup připojené součástky. Navíc na rozdíl od RC členu vyžaduje pouze jednu součástku. Sériový rezistor se zapojí v obvodu hned za připojený výstup a jeho výchozí hod-

ná barva) a připojeným vstupem (modrá barva).

Abychom si přiblížili možný vliv hodnoty sériového rezistoru na přenos signálu, provedeme analýzu v rozsahu 50 až 80 Ω s přírůstkem 10 Ω. Výsledkem je graf na obr. 13. Zcela nejnižších hodnot dosahuje křivka pro rezistor 50 Ω.

Optimální přizpůsobení

S kratším plošným spojem se snižuje zpoždění přenosu signálu, zatímco s rostoucí hodnotou sériového rezistoru se snižuje zakmitávání signálu na připojeném vstupu. Optimální přizpůsobení plošného spoje bude tedy kompromisem délky spoje a hodnoty sériového

metrii obrazce plošných spojů na desce, ale jejich výsledky jsou velmi důležité. Jaký bude závěr z výše provedených analýz, pokud bychom chtěli na desce dosáhnout výsledku na obr. 14b?



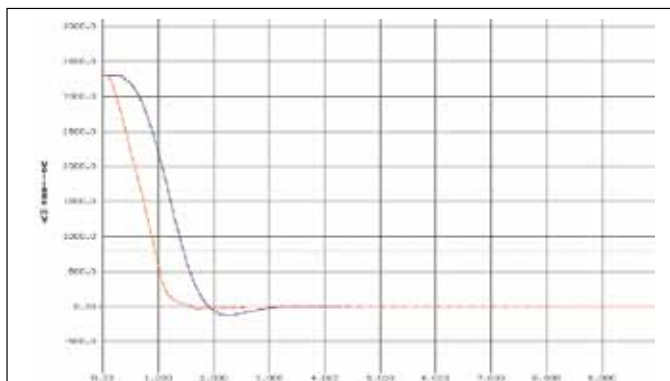
Obr. 14a Optimální výpočet hodnot

Analýzy byly provedeny na 6vrstvé desce (obr. 1), jejíž parametry byly zadány před zahájením analýz. Analyzovaný spoj o šířce 0,15 mm byl položen na horní stranu desky. Z výsledků je zřejmé, že změ-

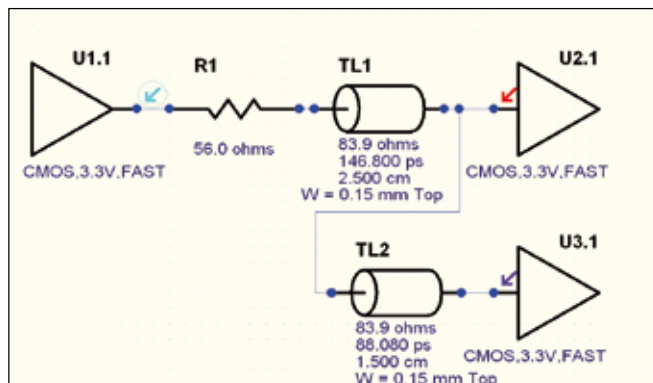
ho zásadních rozdílů oproti 6vrstvé desce. Z těchto výsledků je možné vyvodit závěr, že počet vrstev, umístění spoje na konkrétní vrstvě desky, ani šířka spoje nemají zásadní vliv na přenos signálu. Změní se ale

a rezistor (62 Ω), který musí být umístěn max. 8,05 mm za výstupním vývodem součástky.

Pokud bychom změnili umístění spoje na jinou vrstvu a nebo šířku spoje, po-



Obr. 14b Přenos signálu při $R = 62 \Omega$ a délce spoje 35 mm



Obr. 15 Příklad zapojení obvodu s více vstupy

na umístění plošného spoje na horní nebo vnitřní stranu desky neměla žádný výrazný vliv na přenos signálu (s výjimkou změny impedance). Podobně změna šířky spoje nehrála žádnou významnou roli, opět kromě změny impedance. Pokud bychom provedli analýzy na 4vrstvé desce, zjistili bychom, že tam není příliš mno-

impedance spoje. Pokud je potřeba dodržet určitou impedanci, potom i výše uvedené parametry hrají roli a musí být součástí doporučení pro návrh desky.

V našem případě není impedance spoje důležitá, a proto je potřeba pro návrh desky vzít v úvahu hlavně celkovou délku spoje od vývodu k vývodu (35 mm)

tom by bylo potřeba mírně doladit hodnotu rezistoru, abychom dosáhli stejného výsledku.

Stejným způsobem by se provedla analýza přenosu signálu v případě rozvětveného spoje, kdy na výstup je připojeno několik vstupů. Příklad možného zapojení je na obr. 15.

ETC USB osciloskop v komplexnej súprave

Prehľadne usporiadané pre ľahkosť použitia v teréne

Robustný kufrík pre ochranu súpravy

Osciloskop

Sondy a káble

Príslušenstvo

Špeciálne tvarovaná pena pre fixáciu komponentov aj pri neštandardných polohách kufríka

ETC s.r.o.
Rosinská cesta 8
010 08 Žilina

+421 41 5652687
info@etc.eu
http://www.etc.eu/