

TEHNOLOGII DE INTERCONECTARE ÎN ELECTRONICĂ

LUCRAREA DE LABORATOR nr. 7 ANALIZA INTEGRITĂȚII SEMNALELOR

1. Controlul impedanțelor

După cum este cunoscut, circuitele (cablajele) imprimate obișnuite sunt structuri conductoare amplasate pe substrat dielectric cu rol de conectare "inter-componentă" ("on-board", cum se mai numesc). Se pot întâlni două tipuri principale: structuri generatoare de impedanță controlată și structuri generatoare de impedanță necontrolată (nedefinită). Noțiunea de "impedanță controlată" se referă la liniile (traseele) de interconectare ce prezintă o impedanță caracteristică constantă la propagarea semnalelor, fapt ce poate duce la realizarea unor adaptări corespunzătoare și la minimizarea reflexiilor, oscilațiilor de stabilire pe palier, supratensiunilor, etc. "Impedanța necontrolată" a căii de transmitere a semnalelor utile este mai puțin avantajoasă deoarece traseul de interconectare se prezintă cu o impedanță caracteristică având valori plasate într-o plajă largă, adaptarea și păstrarea integrității semnalelor fiind mult mai greu realizate.

În figura 1 a,b,c,d sunt prezentate cele mai utilizate geometrii cu impedanță controlată pentru structurile de interconectare pe substrat, iar în 1 e,f cele mai utilizate geometrii cu impedanță necontrolată:

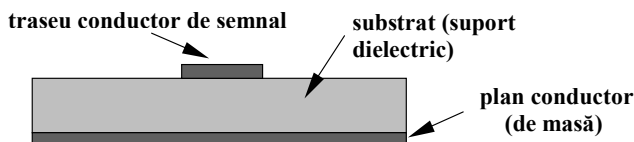


Fig. 1a Traseu de semnal plasat pe substrat dielectric, deasupra unui plan de masă ("microstrip line")

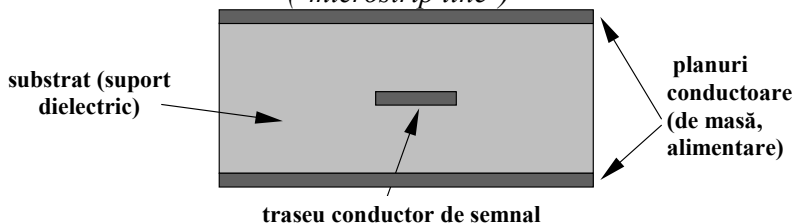


Fig. 1b Traseu de semnal plasat în interiorul unui dielectric, între planuri de referință ("stripline")

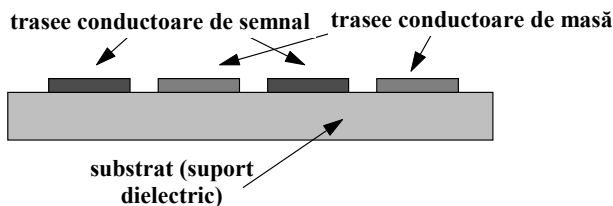


Fig. 1c Trasee de semnal și masă pe substrat dielectric, ("coplanar line")

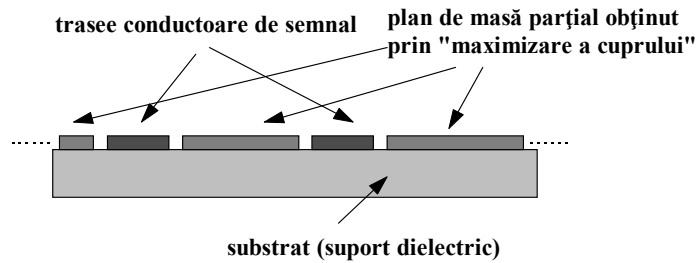


Fig. 1d Trasee de semnal și plan de masă parțial pe substrat dielectric, ("modified coplanar line")

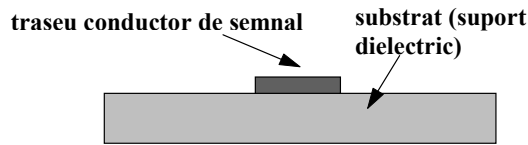


Fig. 1e Traseu de semnal pe substrat dielectric, în absența unui plan de masă

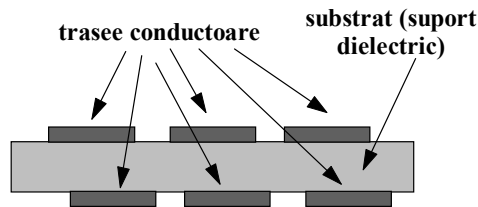


Fig. 1f Trasee de semnal amplasate pe ambele fețe ale unui substrat dielectric, în absența unui plan de masă

O primă concluzie care se poate trage, în cazul proiectării modulelor digitale de mare viteză, este aceea că structura de interconectare trebuie generată prin intermediul unor geometrii cu impedanță controlată, în vederea obținerii performanțelor maxime și minimizării perturbațiilor ce pot afecta integritatea semnalului util. Se consideră, în general, obligatoriu ca traseele generatoarelor de ceas (CLK), circuitele asociate lor, liniile de distribuție CLK și traseele parcurse de semnale periodice de frecvență ridicată să fie generate sub forma unor geometrii cu impedanță controlată.

În legătură cu fenomenul de propagare, trebuie spus că la propagarea oricărei forme de semnal pe o cale oarecare de transmisiune (în cazul nostru traseu de cablaj imprimat), în punctul de incidență al semnalului cu un punct/zonă de discontinuitate al/a respectivei căi, apare situația că o parte din semnal se întoarce înapoi spre generator, primind numele de semnal reflectat (deci apar reflexii). Reflexiile reprezintă o cauză principală a pierderii imunității la perturbații a circuitelor digitale și a modificării formei semnalului util transmis. În cazul liniei de interconectare amplasate pe substrat, deci realizată prin intermediul unor trasee obținute prin corodare sau depunere, la transmisia unui semnal pe linie o parte din el se va reflecta în momentul întâlnirii unei discontinuități de impedanță electrică. Analizând linia din punct de vedere al continuității impedanței, se constată că există posibilitatea de apariție a semnalelor reflectate datorită eventualelor discontinuități atât la intrarea în linie (la generator), cât și la ieșirea din linie (la sarcină). În figura 2 este prezentată schema electrică primară de transmisie a unui semnal între un generator și un receptor.

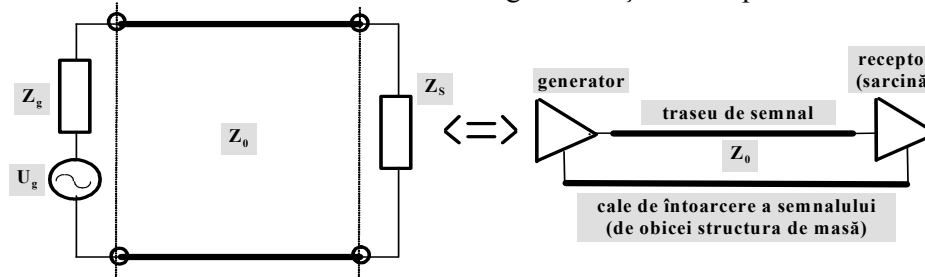


Fig. 2 Schemă electrică primară de transmisie a unui semnal (Z_g - impedanța generatorului, Z_0 - impedanța caracteristică a liniei de interconectare, Z_s - impedanța de sarcină)

Într-o primă aproximație se poate spune că Z_0 depinde de geometria traseului și de permitivitatea electrică a substratului, Z_g depinde de tipul circuitelor electronice utilizate, având valori relativ reduse iar Z_s depinde tot de tipul circuitelor, având valori relativ ridicate sau caracteristici neliniare. În plus, nu trebuie omise nici discontinuitățile de impedanță care își fac apariția chiar în cadrul liniei de interconectare (colțuri, salturi de lățime, găuri de trecere, joncțiuni în T, etc.).

Întârzierile de propagare pe liniile de semnal sunt importante în cazul multor produse electronice, cum ar fi: sistemele/echipamentele/modulele digitale de calcul și comunicație de mare viteză, circuite de eșantionare de viteză ridicată pentru osciloscopae și reflectometre în domeniul timp, numărătoare de mare rezoluție, echipamente radar, etc. În general timpul de propagare depinde de permitivitatea electrică relativă și permeabilitatea magnetică relativă ale substratului dar cum substraturile PCB, MCM (Multi Chip Module - module multicip) sau hibride folosite sunt în marea lor majoritate dielectrice, importantă este doar prima dintre mărimile precizate mai sus. Structurile de interconectare fiind realizate din materiale conductoare, timpul de propagare pare la prima vedere extrem de mic: de ordinul zecilor de picosecunde pe centimetru. Cu toate acestea, în electronica digitală actuală s-a ajuns în prezent la timpi de front de ordinul sutelor de picosecunde, fapt care a schimbat optica mai veche ce "încadra" timpul de întârziere pe traseele conductoare în categoria mărimilor cu valori neglijabile pentru practică.

2. Tehnica terminațiilor

Terminațiile joacă un rol important în asigurarea calității semnalelor transmise, transferului optim de putere între circuite și funcționalității modulului electronic, un avantaj al prezenței lor fiind și acela de reducere a energiei de radiofrecvență generate. Ele pot fi plasate la capătul dinspre generator al traseului sau (mai ales) la cel dinspre receptor. Componentele utilizate sunt rezistoare, condensatoare și, uneori, diode.

Tehnica terminațiilor cuprinde șase metode care vor fi detaliate în cele ce urmează.

1) Rezistor serie

În general, introducerea unei terminații implică plasarea unei/unor componente adecvate la capătul dinspre receptor, deci la "capătul depărtat" al traseului de interconectare. Metoda rezistorului serie este singura care face excepție de la această regulă. Ea presupune plasarea unui rezistor serie la capătul dinspre generator (figura 3) și reprezintă o metodă deosebit de eficientă pentru "legături punct la punct", adică pentru trasee fără ramificații. Dezavantajul principal îl reprezintă faptul că semnalul incident este atenuat. Avantajul major, însă, este dat de faptul că la receptor nu va apărea nici un fel de supracreștere ("overshoot"), deci nu va fi generat binecunoscutul "ringing". Metoda de față este aplicabilă în special familiilor logice CMOS.

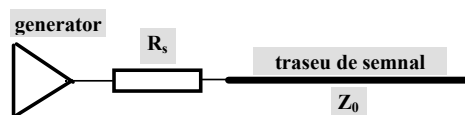


Fig. 3 Plasarea rezistorului serie între dispozitivul generator și începutul traseului de interconectare
Calculul rezistenței pentru acest tip de terminație este dat de formula:

$$R_s = Z_0 - Z_g,$$

unde Z_g - impedanța generatorului, Z_0 - impedanța caracteristică a liniei de interconectare, R_s - rezistența terminației serie).

Avantajele folosirii unui rezistor serie sunt următoarele:

- prevenirea reflexiilor;
- adaptarea de impedanță;
- minimizarea overshoot-urilor și undershoot-urilor;
- minimizarea curenților de radiofrecvență existenți pe traseu.

2) Rezistor "pull-up" conectat la alimentare

Metoda rezistorului conectat la alimentare constă în plasarea unui rezistor de valoare adecvată între capătul dinspre receptor al traseului de semnal și structura de alimentare a circuitelor modului electronic proiectat (figura 4). Acest rezistor “pull-up” (cum mai este cunoscut în literatura de specialitate) realizează adaptarea de impedanță între traseul de semnal și circuitul receptor, altfel spus caută să elimine neadaptarea (firească) dintre impedanța caracteristică a traseului de interconectare proiectat de designerul PCB și impedanța de intrare a circuitului fabricat de o companie producătoare de profil. În cazul în care rezistorul este ales corect, el reprezintă o terminație foarte eficientă, realizând o bună adaptare și eliminând reflexiile. Dezavantajul este acela că simpla prezență a rezistorului în circuit creează o cale permanentă de curent, conducând la creșterea puterii consumate și, în funcție de valoarea rezistenței alese (care oricum nu are cum să fie prea mare din considerente de adaptare), la shift-are spre valori superioare a nivelului de “zero” logic, fapt care ar putea conduce la disfuncționalități în cazul anumitor familii logice.

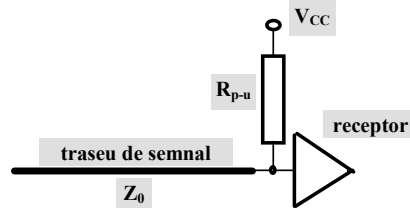


Fig. 4 Plasarea rezistorului “pull-up” între intrarea dispozitivului receptor și alimentare

Calculul rezistenței pentru acest tip de terminație este dat de formula:

$$R_{p-u} = Z_0,$$

unde R_{p-u} - rezistența terminației.

3) Rezistor “pull-down” conectat la masă

Metoda rezistorului conectat la masă constă în plasarea unui rezistor de valoare adecvată între capătul dinspre receptor al traseului de semnal și structura de masă a modului electronic (figura 5). Și acest rezistor (numit “pull-down” în literatura de specialitate) realizează adaptarea de impedanță între traseul de semnal și circuitul receptor. În cazul în care rezistorul este dimensionat corect, el reprezintă o excelentă terminație, realizând adaptarea necesară și eliminând reflexiile. Și în acest caz dezavantajul îl reprezintă faptul că prezența acestui rezistor în circuit generează o cale permanentă de curent spre masă. Acest lucru conduce la creșterea puterii consumate și, în funcție de valoarea rezistenței alese, la shift-are spre valori inferioare a nivelului de “unu” logic, fapt care ar putea conduce la disfuncționalități în cazul anumitor familii logice. În general se recomandă studierea cataloagelor și buna înțelegere a condițiilor de funcționare a circuitelor cu care se lucrează.

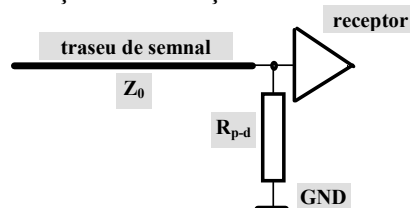


Fig. 5 Plasarea rezistorului “pull-down” între intrarea dispozitivului receptor și masă

Rezistența acestui tip de terminație este:

$$R_{p-d} = Z_0,$$

unde R_{p-d} - rezistența terminației.

4) Grupare rezistivă conectată la alimentare și masă

Metoda grupării rezistive conectate la alimentare și masă, numită și metoda terminației Thevenin constă în plasarea a două rezistoare de valori adecvate între capătul dinspre receptor al traseului de semnal și structurile de alimentare și masă ale modului (figura 6). Acest tip de

terminație este considerat optim pentru TTL în cazul semnalelor transmise pe configurații de tip bus. La logica CMOS trebuie avută în vedere corelația dintre nivelul tensiunii de comutare și tensiunea de intrare a dispozitivului. Trebuie reținut că o dimensionare greșită a rezistoarelor terminației Thevenin poate conduce la modificarea nivelurilor de prag, deci la disfuncționalități.

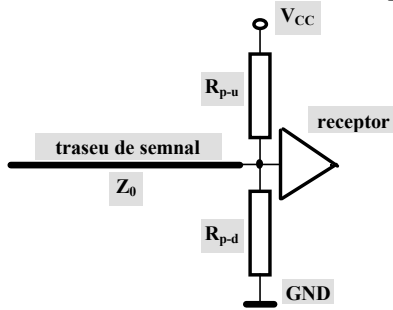


Fig. 6 Plasarea grupării rezistive între intrarea dispozitivului receptor și structurile de alimentare și masă

Calculul rezistenței pentru acest tip de terminație este dat de formula:

$$R_{p-u} = R_{p-d} = 2 \cdot Z_0,$$

mărimile fizice din relația de mai sus fiind prezentate anterior.

În cazul în care valoarea rezistoarelor este aleasă corect, divizorul rezistiv Thevenin reprezintă o terminație eficientă, eliminând reflexiile ce iau uzual naștere în absența sa. Din păcate, dezavantajul major este dat de puterea consumată de acest tip de terminație, simpla prezență în circuit a celor două rezistoare generând o cale permanentă de curent continuu. Și în această situație se recomandă studierea cataloagelor și respectarea specificațiilor de funcționare a circuitelor cu care se lucrează, soluția finală fiind ajungerea la un compromis între adaptare și consumul de putere.

5) Grupare RC conectată la masă

Metoda grupării RC conectate la masă constă în plasarea unui rezistor în serie cu un condensator între capătul dinspre receptor al traseului de semnal și structura de masă a modului electronic (figura 7). Terminația de față este utilă atât pentru logica TTL cât și pentru CMOS. Rezistorul realizează adaptarea de impedanță dintre traseul de semnal și dispozitivul receptor, în timp ce condensatorul păstrează nivelul de curent continuu al dispozitivului. După cum se observă, un avantaj remarcabil este în acest caz absența căii de curent continuu spre masă. În plus, curenții alternativi de radiofrecvență se pot scurge nestingeriți la masă în momentul comutărilor L→H, H→L. Apar, totuși, mici dezavantaje: prezența condensatorului introduce o mică întârziere pe traseu și “înmoaie” puțin fronturile semnalului util.

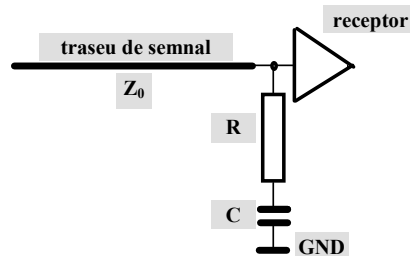


Fig. 7 Plasarea grupării RC între intrarea dispozitivului receptor și masă

Valoarea componentelor pasive pentru acest tip de terminație este prezentată mai jos:

$$R = Z_0, C = 20 \dots 600 pF$$

Valoarea condensatorului trebuie aleasă astfel încât constanta de timp a grupării RC să fie mai mare decât dublul timpului de propagare în cazul în care nu s-a neglijat influența sarcinii/sarcinilor plasate pe traseul de semnal, t'_{pd} (a se vedea articolul din numărul trecut):

$$\tau = R \cdot C > 2 \cdot t'_{pd}$$

Metoda de față se aplică cu foarte bune rezultate în cazul magistralelor de semnal cu geometrii de traseu identice în cadrul layout-ului. Un caz particular îl reprezintă situația în care se elimină rezistorul, configurația rămânând una capacitivă (figura 8). Din păcate, ea prezintă mai multe dezavantaje, cele mai importante fiind lipsa posibilității de adaptare și “înmuierea” fronturilor (ceea ce duce uneori la așa-numitele “probleme de timing”).

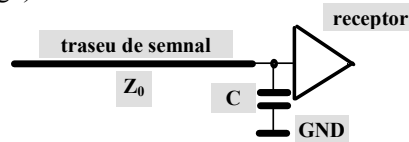


Fig. 8 Plasarea unui condensator între intrarea dispozitivului receptor și masă

Capacitatea condensatorului se află în plaja prezentată la configurația RC.

6) Grupare de diode conectată la alimentare și masă

Metoda grupării de diode conectate la alimentare și masă constă în plasarea a două diode (numite “clamping diodes”) între capătul dinspre receptor al traseului și structurile de alimentare și masă ale modulului (figura 9). Această grupare este utilizată în general pentru structuri de semnal diferențiale sau pentru configurații de tip magistrală. Rolul lor este de elemente limitatoare ale overshoot-urilor și undershoot-urilor ce apar la tranzițiile L→H, H→L. Uneori dioda conectată la alimentare poate să lipsească (în cazul circuitelor TTL). Cu toate că un avantaj îl reprezintă consumul redus de putere, dezavantajul major este acela că diodele au un răspuns slab în frecvență, generând probleme în cazul semnalelor rapide. Nu trebuie omis un alt mare dezavantaj, și el destul de critic: prezența diodelor nu realizează adaptarea de impedanță, fapt ce va conduce la apariția reflexiilor (mai corect spus la păstrarea lor, în lipsa adaptării) pe traseul de semnal. În concluzie, această metodă trebuie folosită în conjuncție cu metodele anterioare în vederea obținerii și mult doritei adaptări. Soluția finală a reprezentat-o integrarea diodelor de limitare practic în toate circuitele logice și folosirea tehnicilor discutate mai sus în exteriorul dispozitivului.

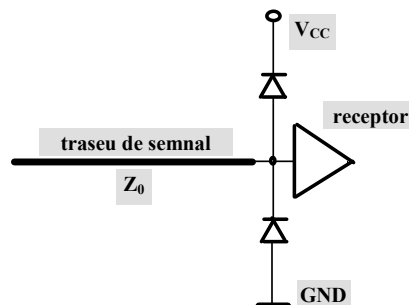


Fig. 9 Plasarea grupării de diode între intrarea dispozitivului receptor și structurile de alimentare și masă

Cum de multe ori diodele “clamping” interne ale circuitelor integrate nu pot face față curenților relativ mari generați în cazul reflexiilor (a se vedea cazul circuitelor VLSI) este nevoie de plasarea suplimentară a unor configurații de diode Schottky în exteriorul circuitului.

În cele ce urmează vor fi prezentate două programe de calcul al impedanțelor caracteristice specifice structurilor pasive de interconectare, programe prin intermediul cărora firme specializate în domeniu pun la dispoziția proiectanților instrumente performante în domeniul controlului impedanțelor.

• CITS25

Acest sistem a fost creat de firma Polar Instruments Ltd. din Marea Britanie și este unul dintre cele mai utilizate programe de calcul al impedanțelor caracteristice ale structurilor de interconectare dispuse pe substrat dielectric (figura 10). De la început trebuie precizat că orientarea

primară a fost spre proiectarea în domeniul microundelor și abia odată cu apariția familiilor logice de mare viteză sistemele de acest tip au început să devină “interesante” în aria proiectării digitale, datorită fenomenelor analogice ce au început să-și facă simțită prezența.

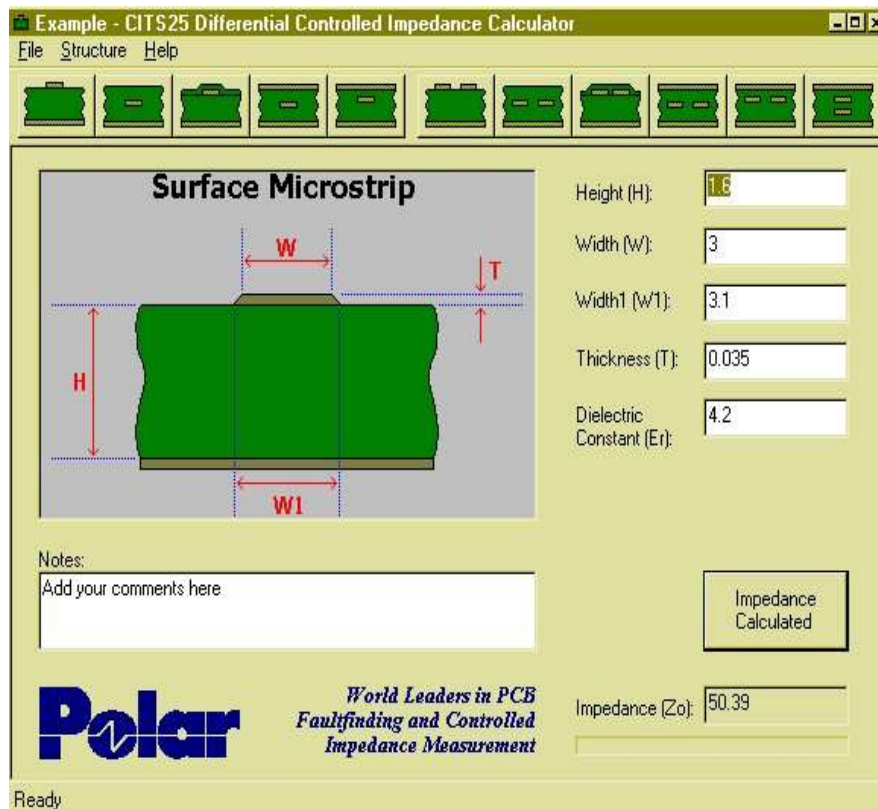
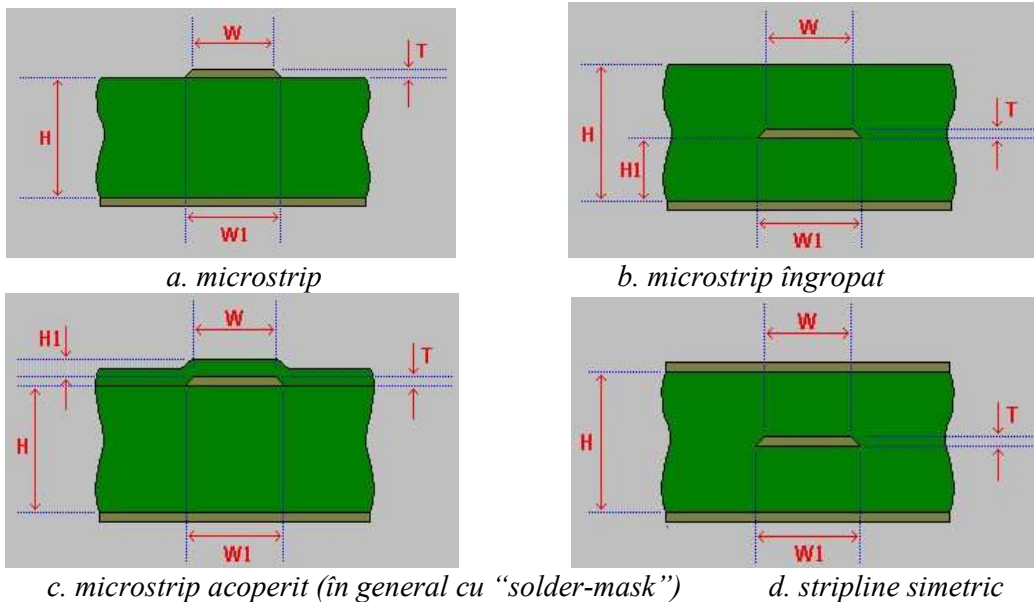


Fig. 10 Interfața de sistem a programului CITS25

El a fost intitulat “Differential Controlled Impedance Calculator” deoarece permite evaluarea impedanțelor caracteristice pentru o paletă largă de geometrii cu impedanță controlată, inclusiv structuri diferențiale. În figura 11 pot fi observate toate geometriile disponibile pentru analiză.



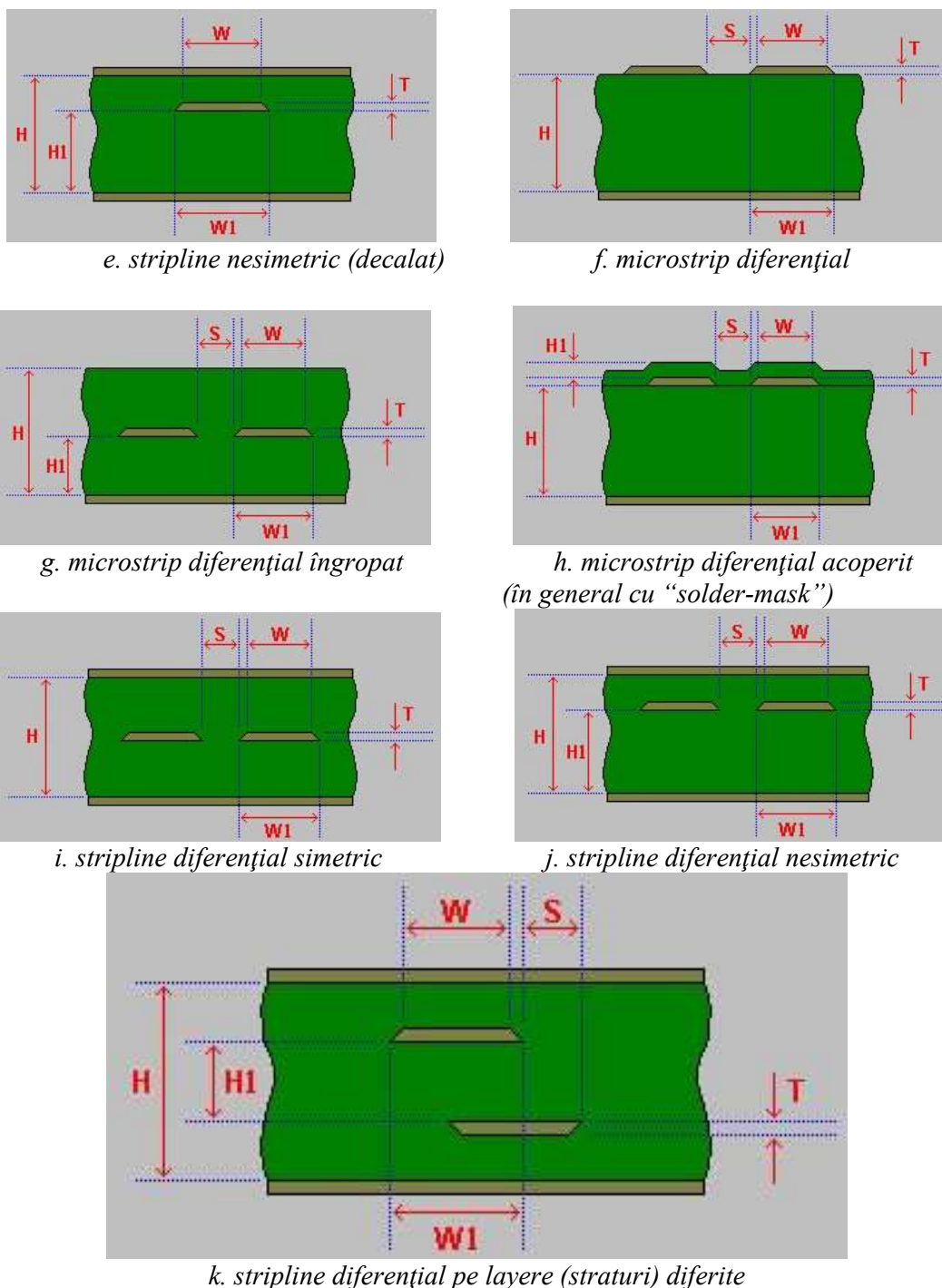


Fig. 11 Geometriile cu impedanță controlată disponibile în cadrul programului CITS25

Programul are doar capacitatea de analiză, adică permite obținerea impedanței caracteristice (parametru electric) în funcție de parametrii geometrici ai structurii. Evaluarea impedanței se realizează pe baza unor formule de calcul empirice, una dintre cele mai cunoscute fiind relația pentru geometria microstrip (se acceptă aproximația $W=W_1$, vezi figura 4a). Astfel, impedanța caracteristică a traseului de interconectare este:

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1,414}} \cdot \ln\left(\frac{5,98 \cdot H}{0,8 \cdot W + T}\right)$$

Relația prezintă o foarte bună precizie pentru un raport de aspect W/H în domeniul 0,1 ... 3 și pentru o permitivitate relativă ϵ_r (numită și constantă dielectrică) în domeniul 1 ... 15. Pentru calculul impedanței caracteristice utilizatorul trebuie să introducă parametrii geometrice ai liniei și constanta dielectrică și să starteze analiza prin apăsarea butonului “Press to calculate”. Rezultatul este afișat în câteva secunde și din acest moment proiectantul poate estima cu precizie impedanța caracteristică a viitorului traseu de interconectare real și poate continua proiectarea circuitului imprimat.

- **TXLINE**

TXLine este un alt program de calcul al impedanțelor caracteristice (figura 12). El a fost realizat de firma Applied Wave Research, Inc. din SUA și este utilizat intensiv în special de către companiile americane. La început și el a fost considerat un soft tipic de microunde (dovadă fiind geometria “slotline”, topologie imposibilă în cadrul circuitelor imprimate clasice), dar în ultimii ani programul a fost translatat și proiectanților din domeniul digital.

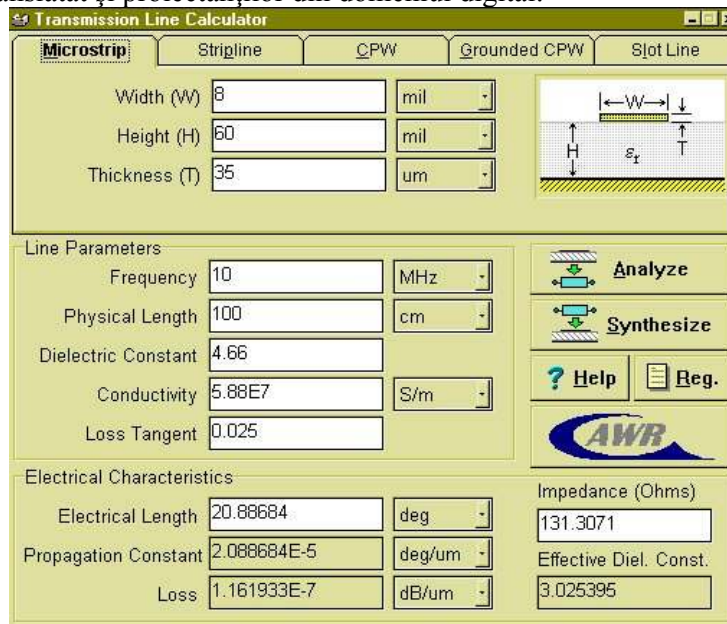


Fig. 12 Interfața de sistem a programului TXLine

Din studierea interfeței de sistem pot fi remarcate câteva avantaje majore: capabilitatea de sinteză (determinarea parametrilor geometrice funcție de cei electrici), posibilitatea determinării automate a permitivității relative efective (parametru important în cazul topologiilor neomogene, cum ar fi “microstrip”-ul), lungimii electrice a liniei, constantei de propagare și pierderilor. Dezavantajul principal este că nu abordează decât geometriile microstrip, stripline simetric și coplanară.

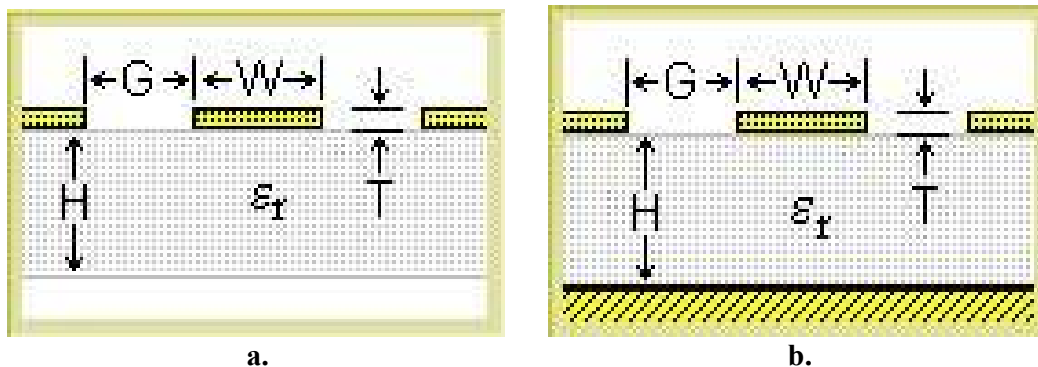


Fig. 13 Geometria coplanară din cadrul programului TXLine
a. fără plan de masă; b. cu plan de masă

Evaluarea liniilor de transmisiune (deci și a traseelor de interconectare din cadrul modulelor electronice digitale) se realizează tot pe baza unor formule de calcul empirice, startarea procedurii făcându-se prin apăsarea butoanelor "Analyze" și "Synthesize". Rezultatele se obțin rapid iar precizia este foarte bună.

Ca o concluzie, legată de programe de tipul celor prezentate mai sus, se poate spune că limitările nu sunt dictate de precizia formulilor empirice și metodelor matematice de aproximare utilizate pentru obținerea rezultatelor ci de procesul de fabricație a structurii de interconectare și de materialele folosite. Regula de bază la proiectarea plăcilor de circuit imprimat destinate aplicațiilor performante digitale de mare viteză sau analogice de înaltă frecvență este strânsa colaborare între proiectant și fabricant pentru obținerea unui circuit imprimat corect nu doar din punct de vedere mecanic, ci și din punct de vedere electric și magnetic sau chiar electromagnetic, dacă ne gândim la problemele legate de compatibilitatea electromagnetică a produsele electronice.

3. TrackSim - program destinat analizei/simulării integrității semnalelor

Scopul programului **TrackSim** este de a simula structuri de linii de transmisiune, fiind util în proiectarea sistemelor digitale de mare viteză. Programul oferă posibilitatea de a defini atât tipurile de porți și terminațiile de la capetele traseelor cât și configurația mediului de transmisie, adică secțiunea traseelor și permitivitățile relative ϵ ale materialelor dielectrice.

Practic se pot simula trasee de cablaj imprimat multistrat sau cabluri de tip panglică. Este posibilă simularea de trasee singulare sau de configurații paralele de lungimi egale (bus). TrackSim calculează formele de undă reale la ambele capete ale traseelor, pentru a fi comparate cu ceea ce se așteaptă să se obțină în cazul ideal, când nu ținem cont de reflexiile pe linie sau de diafonii.

Pentru realizarea unei simulări performante, utilizatorul trebuie să parcurgă următoarele etape:

1. Definirea geometriei de interconectare (straturile dielectrice și traseele conductoare):

Programul va afișa aceste straturi în secțiune transversală, cu culori diferite, păstrând proporțiile grosimilor (a se vedea figurile 1 și 11). Ca rezultat se va obține, de exemplu, o structură de forma următoare (figura 14):

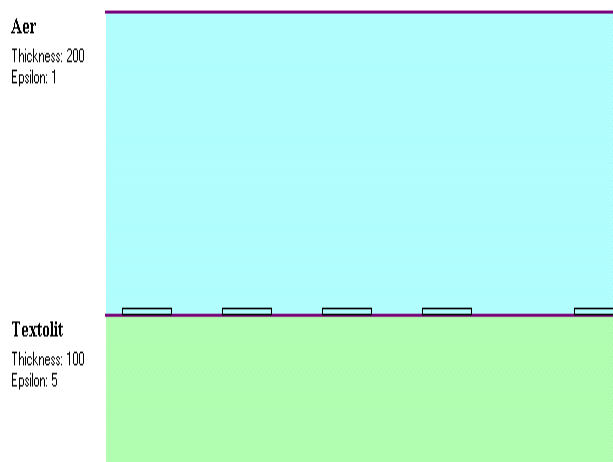


Fig. 14 Structura de layere

2. Definirea stimulilor (semnalelor care se transmit pe traseele de interconectare)

Există trei stări posibile în care se poate afla un pin de ieșire: 0 logic, 1 logic sau Hi-Z pentru o poartă tri-state. Construcția stimulilor se face selectând câte o regiune în lungul abscisei și atribuindu-i una din cele trei stări, folosindu-ne de unul din cele trei butoane destinate acestui scop.

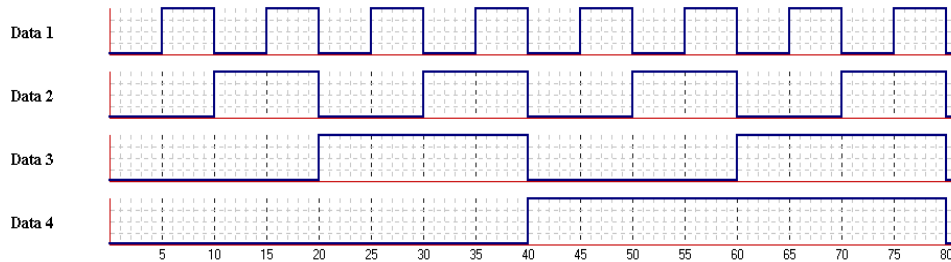


Fig. 15 Diagramă de timp pentru deținerea stimulilor

Domeniul temporal de pe abscisă se poate modifica cu ajutorul butoanelor de zoom. Așa cum au fost generați stimulii, frecvența ceasului numărătorului este de 200 MHz (figura 15).

3. Definirea tipurilor de porți și a terminațiilor utilizate

La această secțiune se trece folosind butonul *Assign*. Tabloul ei este prezentat mai jos.

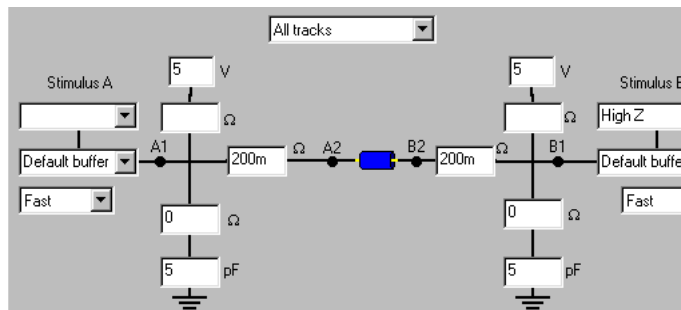


Fig. 16 Configurația de alocare a parametrilor porților utilizate și a terminațiilor

Fiecărui traseu în parte i se asociază apoi câte un stimul. Traseelor de date li se pot asocia, de exemplu, stimulii *Data1...Data4* iar traseului *Clear* un stimul de nivel logic 0 (*low*).

4. Realizarea configurațiilor:

Configurarea finală a sistemului de analiză a integrității semnalului (în vederea începerii simulării) se realizează prin intermediul a trei secțiuni care se apelează folosind butoanele:



1. Configurarea parametrilor porților (dezactivată în versiunea demo);
2. Configurarea parametrilor de simulare;
3. Ajustarea preciziei de calcul.

5. Executarea simulării și obținerea rezultatelor:

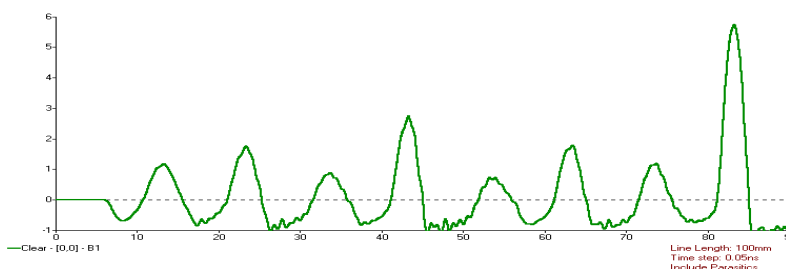


Fig. 17 Exemplu de forme de undă obținute în urma simulării

