

# Circuite Integrate Monolitice pentru Microunde

## Proiect

### Tema de proiectare

Se proiectează circuite pasive realizate în tehnologia prezentată la curs (Plessey). Se folosește Sonnet pentru simulare electromagnetică și Advanced Design System pentru simulare de circuit. La sfârșitul semestrului se predă un material care să descrie componenta implementată, analiza de convergență, schema echivalentă și detaliile tehnologice - nr. de straturi/model metal etc. - (format hard sau electronic pdf/doc) **împreună cu** fișierele care implementează proiectul în **Sonnet** (cel mai precis proiect din analiza de convergență, proiect **funcțional** - fișierul \_X\_.son + subdirectorul corespunzător \_X\_ din directorul "sondata", versiunea prezentă în laborator, sau ultima versiune evaluativă disponibilă online <http://www.sonnetsoftware.com/> ) **și Advanced Design System** (directorul "\*\_prj" corespunzător sau arhiva \*.zap a proiectului).

Fiecare temă va conține dimensiuni fizice pentru următoarele componente:

- bobină spirală pătrată, celulă standard
- condensator planar (sandwich) cu poliimidă (PI)
- condensator planar (sandwich) cu nitrură de siliciu (Si)

Fiecare student va alege din tema proprie o **singură** componentă pentru a o analiza, ținând cont de nota maximă pentru fiecare componentă (tabelul următor).

Nr.	Tip componentă	Nota maximă
1	Bobină	8
2	Condensator PI	6
3	Condensator Si	7

Tabel 1. Teme de proiectare

Pentru compensarea notei maxime (eventual) mai mici de 10 se poate beneficia de unul din următoarele bonus-uri:

Nr.	Descriere	Bonus	Detalii
1	Utilizare structură cu trei straturi (GaAs+PI+aer)	0	
2	Utilizare structură cu cinci straturi (GaAs+Si+PI+Si)	+0.5	Fig. 7a
3	Utilizare structură cu nouă straturi (GaAs+Si+PI+Si)	+1	Fig. 7b
4	Utilizare metal ideal	0	
5	Utilizare model "Normal metal"	+0.5	Fig. 2
6	Utilizare model "Thick metal" (min. 4 nivele)	+2	Fig. 3,4
7	Utilizare model "Dielectric Brick"	+1	Fig. 6,7b

Tabel 2. Punctaj suplimentar

### Note:

- Modele mai complicate presupun creșterea considerabilă a timpului de calcul și a memoriei necesare.

- Unele combinații temă/bonus nu sunt posibile. De exemplu: capacitate pe siliciu cu model "Thick metal" pentru metalizări implică automat utilizarea modelului "Dielectric Brick", sau utilizare două straturi (GaAs+PI) se poate aplica doar pentru bobină și condensator PI
- Toate componentele implică utilizarea a două nivele de metalizare (M2 și M3) și implică apariția trecerilor între nivele (via-holes)

Straturile de materiale implicate sunt reprezentate simplificat în figura 1, indicându-se de asemenea suprafețele pe care se depun cele două niveluri de metalizare M2 și M3 (nitru de siliciu se depune deasupra acestor metalizări pentru a evita conexiuni electrice nedorite). În tabelul 3 sunt prezentate caracteristicile materialelor utilizate.

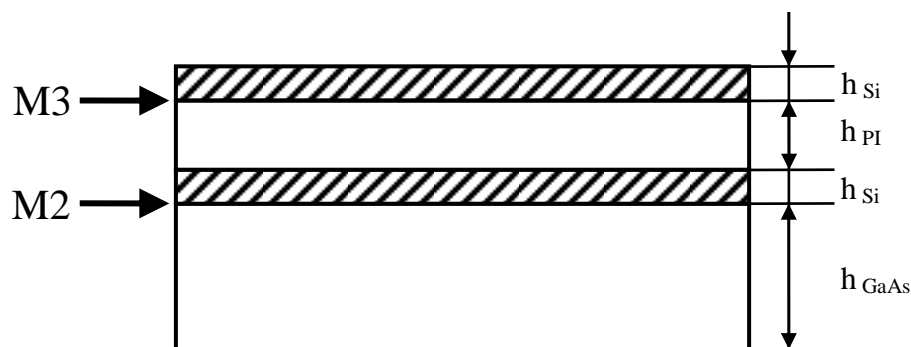


Fig. 1. Straturi dielectrice

Nr.	Material	$\epsilon_r$	$\tan \delta$	$\sigma$ [S/m]	$R_{sq}$ [m $\Omega$ /sq]	$h$ [ $\mu$ m]
1	GaAs	12.85	$0.3 \cdot 10^{-3}$			200
2	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	7.2	$15 \cdot 10^{-3}$			0.13
3	PI	3.4	$55 \cdot 10^{-3}$			1.8
4	M2			$3.6 \cdot 10^7$	55	0.5
5	M3			$3.3 \cdot 10^7$	10	3

Tabel 3. Caracteristici materiale utilizate

Pentru descrierea metalizărilor există mai multe nivele de detalii introduse, care sunt recompensate prin bonus-uri diferite (tabelul 2). În primul rând modelul utilizat în Sonnet poate fi:

- Metal Ideal (Lossless), pierderi nule, înălțime egală cu 0
- Modelarea pierderilor (Normal Metal), cu mărimile introduse fiind cele din figura 2:  $\sigma$ ,  $h$  și raportul de curenți între suprafața de sus și cea de jos a conductorului. Pierderile sunt modelate prin rezistențe de suprafață, raportul de curenți depinzând de tipul de linii introduse. Pentru linii microstrip acest raport este tipic 1.5. În structura geometrică înălțimea introdusă este 0 (valoarea introdusă în model e utilizată strict la calcularea impedanțelor de suprafață).
- Modelarea pierderilor și a înălțimii liniei (Thick metal), cu mărimile introduse fiind cele din figura 3:  $\sigma$ ,  $h$  și numărul de nivele de metalizare introduse pentru simularea înălțimii. În structura geometrică înălțimea introdusă este cea indicată și Sonnet realizează automat secționarea stratului dielectric de deasupra pentru a introduce efectiv folii metalice în structură (fig. 4). Se obțin astfel câteva (NumSheets -1) suprafețe suplimentare, și câteva straturi suplimentare care permit modelarea mai bună a înălțimii liniei, cu creșterea corespunzătoare a timpului de calcul și a memoriei necesare, ca urmare se recomandă

creșterea graduală a numărului de nivele (2 - 4 - 6) cu urmărirea necesarului de memorie și cu realizarea unei analize de convergență. În această situație metalizarea se extinde pe verticală și intră în stratul dielectric de deasupra.

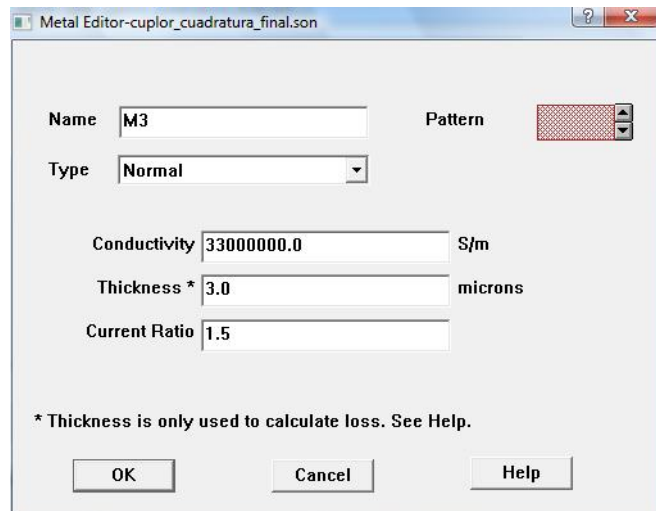


Fig. 2. Modelarea pierderilor (Normal metal model)

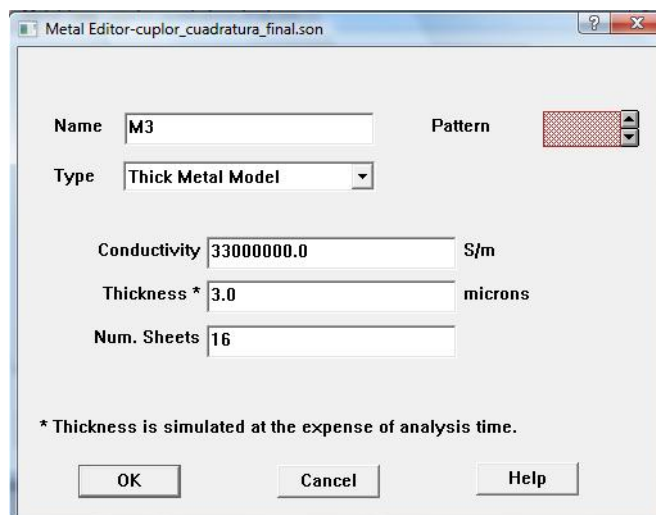


Fig. 3. Modelarea grosimii metalizării (thick metal model)

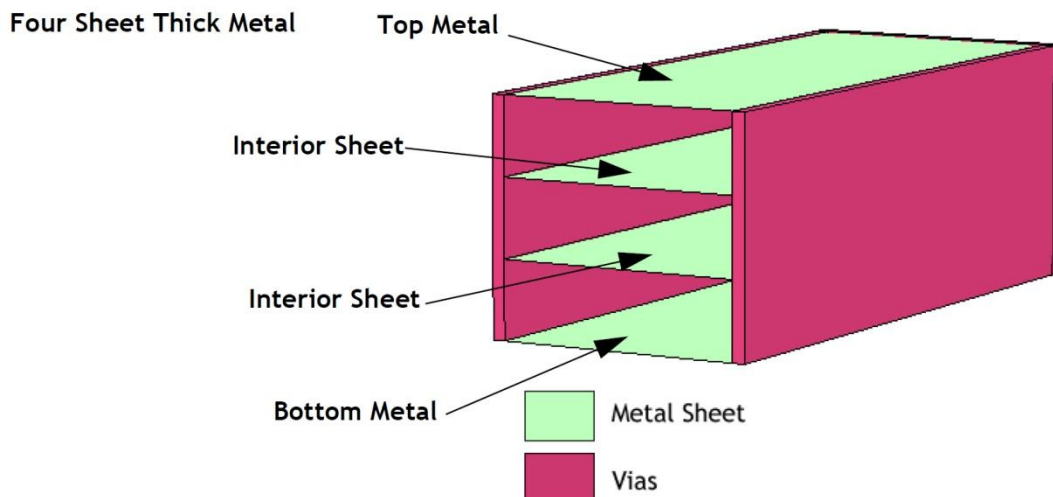


Fig. 4. Modelarea grosimii metalizării (4 nivele)

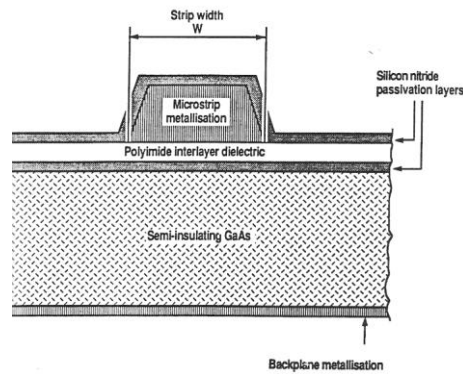


Fig. 5. Geometria reală în circuitul integrat

Utilizarea modelului "thick metal" oferă apropierea cea mai mare de situația reală (fig. 5). Suplimentar, înălțimea stratului de pasivizare cu nitrură de siliciu este mai mică decât a metalizărilor implicate ( $0.13\mu\text{m}$  față de  $0.5/3\mu\text{m}$ ) ceea ce aduce o dificultate suplimentară la modelarea cu precizie a depunerii nitrurii de siliciu **pe** metalizare. O modelare precisă impune introducerea unor straturi suplimentare și utilizarea modelului "Dielectric Brick". Elementul "Dielectric brick" în Sonnet introduce un paralelipiped dintr-un material dielectric în interiorul unui alt material dielectric, obligatoriu extins pe întreaga înălțime a stratului dielectric în care se realizează introducerea (fig. 6). Introducerea unui bloc dielectric trebuie însoțită de impunerea unei secționări pe verticală a stratului dielectric corespunzător "number of Z-partitions" (în meniu, Circuit -> Dielectric Layers -> buton Z-Parts...). Inițial valoarea este 0 pentru straturile "normale", fără blocuri dielectrice, dar trebuie crescut la minim 1 la introducerea unui astfel de bloc, cu creșterea corespunzătoare a timpului de calcul și a memoriei necesare, ca urmare se recomandă creșterea graduală a numărului de nivele (1 - 2 etc.) cu urmărirea necesarului de memorie și cu realizarea unei analize de convergență..

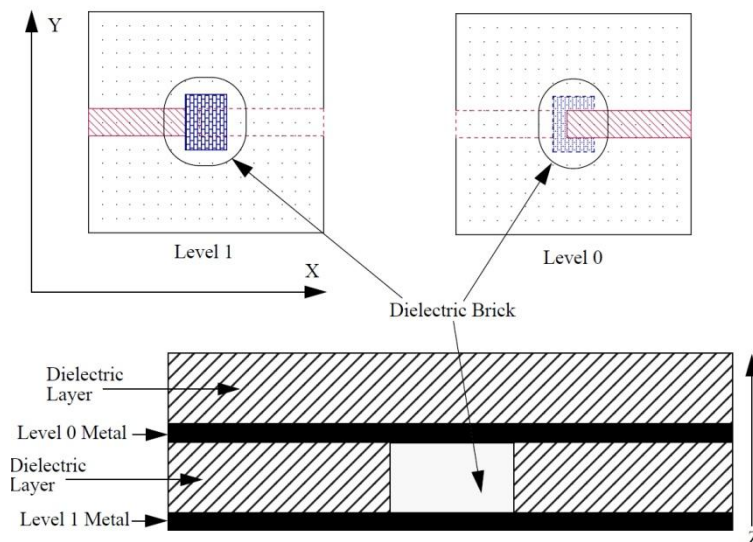


Fig. 6. Dielectric Brick în Sonnet

Pentru modelarea nitrurii de siliciu depusă pe metalizare e necesară introducerea suplimentară a 4 straturi prin împărțirea în trei secțiuni a straturilor de poliimid și aer (pentru a crea nivelele necesare între care să se extindă depunerile de pe metalizare - fig. 7).

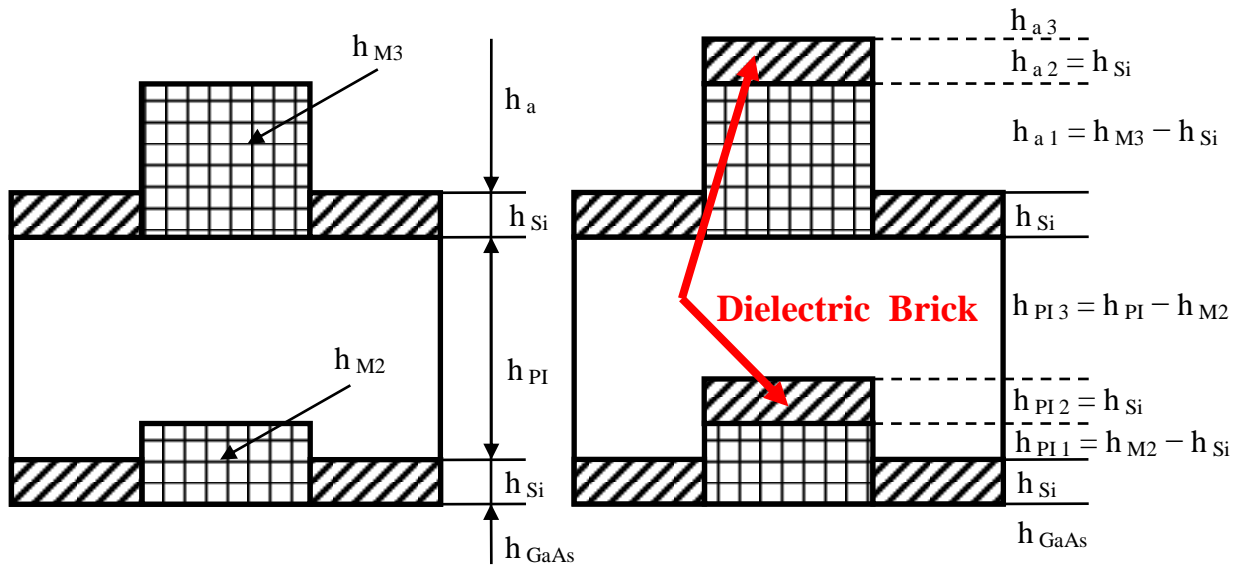


Fig. 7. Modelarea pasivizării pe metalizare (5 straturi -> 9 straturi)

Simulările în Sonnet se realizează între 1 și 20GHz (corespunzător tehnologiei Plessey) și se obțin pentru utilizarea în analiza de circuit parametri S pentru dispozitivul analizat. Parametrii S se obțin în aplicația Response Viewer unde pot fi afișați parametrii S, dar există și opțiunea exportării acestor parametri (în meniul, **Output > S,Y,Z Parameter File**) cu alegerea opțiunilor: Format = Touchstone, Data Type = De-Embedded, Parameter = S-Param, Complex = Mag-Angle.

### Note

- E obligatorie creșterea incrementală a complexității modelului ales (nr. de straturi, nr. de celule, model metal, introducerea bloc dielectric, număr de nivele la metalizări și în blocurile dielectrice), deoarece modelarea "completă" depășește cu mult resursele de timp și RAM pe care le aveți la dispoziție
- Modelarea componentei se face fără introducerea elementelor suplimentare inevitabile în practică, dar care sunt caracterizate de modele suplimentare: trecere M2/M3 pentru revenirea pe nivelul de metalizare M3, tranziții de la linia standard de conexiune (12/40μm) la linia utilizată în circuit, etc. (fig. 8,9).
- E necesară adăugarea opțiunii "Add reference planes" (neutilizată la laborator) pentru a asigura obținerea modelului componentei fără a introduce și liniile (de lungime variabilă) de acces (fig. 8,9).
- Dimensiunile celulelor standard sunt:
  - bobină: lățimea traseelor 12μm, spațiul între trasee 12μm, latura trecerilor 40μm, diametru trecere (via) M3-M2 circulară cu diametru 30μm, prima spiră din jurul trecerii are latura internă 76μm (fig. 9), linia de acces pe M3 are diverse orientări în funcție de numărul de sferturi de spiră din temă.
  - condensatoare: lățimea liniilor de acces la armături (M2 și M3) este de 40μm (fig. 8)
- Modelarea se încheie prin obținerea modelului de circuit pentru componentă. Această operațiune se realizează de mai multe ori pe parcursul realizării proiectului. Analiza de convergență presupune urmărirea variației unei mărimi numerice importante din structură,

iar în cazul componentelor simulate această mărime va fi valoarea componentei (mărimea principală, fără componentele parazite, L sau C)

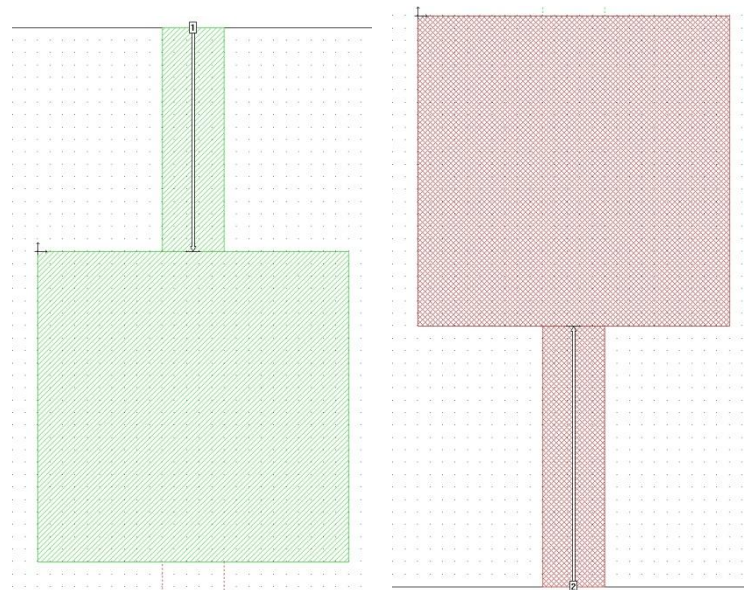


Fig. 8. Modelare condensator, plane de referință

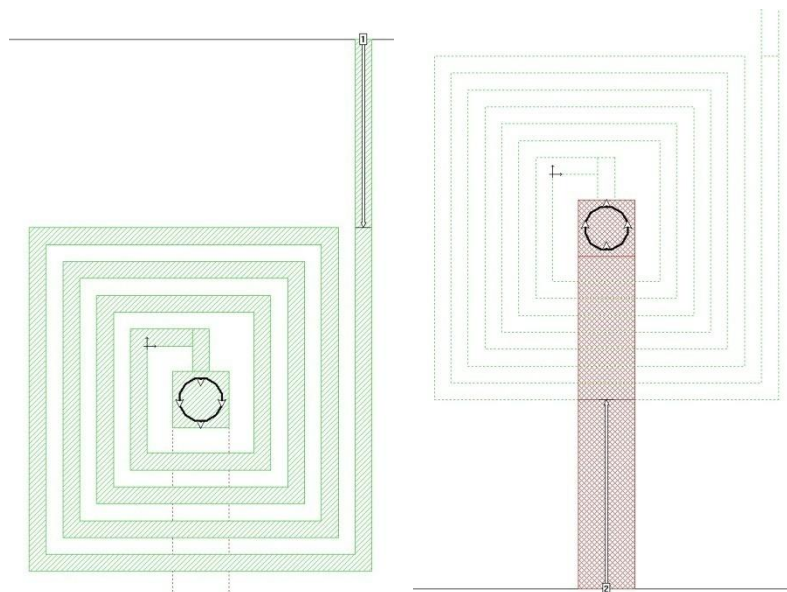


Fig. 9. Modelare bobină, plane de referință

Modelarea în simulatorul de circuit se realizează în ADS (Advanced Design System, versiunea 2003 sau 2009). În principiu pașii sunt:

- modelarea schemei echivalente pentru componentă, prezentată în slide-urile de la curs împreună cu relațiile necesare pentru a calcula valorile inițiale ale elementelor
- compararea rezultatului (parametri S) cu rezultatele obținute în Sonnet
- variația valorilor elementelor din schema echivalentă în vederea suprapunerii în banda largă (1-20 GHz) a celor două rezultate



- în cazul alegerii temei cu bobină există o rezonanță a parametrului  $S_{21}$  la o frecvență în interiorul benzii tehnologiei (1-20 GHz). Suprapunerea modelelor se face numai până la 80-90% din această frecvență

Programul de simulare utilizat în laborator este Advanced Design System 2003, instalat pe sistemul de operare XP Professional. În laborator găsiți acest sistem pe o mașină virtuală. Detectați pe desktop icoana care pornește VMware Player. În interfața programului identificați mașina virtuală "RF XP Professional" sau alegeți comanda "Open a Virtual Machine" și căutați mașina în directorul (tipic) D:\DCMR\WXP\_CIM.

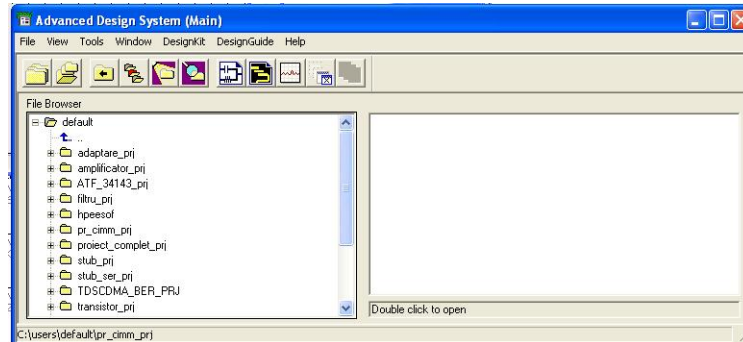


Fig. 10. Fereastra principala ADS

Fereastra principală a programului - **Advanced Design System (Main)** (fig. 10) permite gestionarea proiectelor (creare, ștergere, arhivare – în scopul transportului unui proiect pe un alt calculator există implementată o metodă de arhivare format zip, rezultând un fișier cu extensia "\*.zap" care va păstra structura internă de directoare a proiectului), accesul la fișierele individuale ale proiectului. Un proiect este constituit dintr-un director propriu cu numele "nume ales" + "\_prj", aflat în directorul ales la instalare, implicit "C:\users\default\" dar calea poate fi modificată (și cea implicită, de instalare, și individual la crearea unui proiect nou).

**Notă importantă:** Salvarea oricărui fișier în alt director decât cel propus de program în interiorul directorului proiectului curent (fig. 12) face ca fișierul salvat să fie decuplat de proiect, cu alterarea funcționalității (de ex. o schemă salvată în alt director **nu** va putea fi simulată).

Pentru a crea un proiect nou utilizați din meniu comanda **File > New Project**. Aceleași comenzi pot fi aplicate utilizând butoanele din bara de comenzi a programului. În fereastra care apare se introduce după calea deja afișată "C:\ users\default\" numele dorit al proiectului fără terminația "\_prj" care va fi adăugată automat de program. Din motive de compatibilitate cu versiunile anterioare, este o cerință a programului ca orice cale întâlnită în proiect să nu conțină spații. Ca urmare numele ales pentru proiect trebuie ales fără spații, ca și calea spre director (nu se pot utiliza locații ca "My Documents" sau "Desktop"). Exemplu: **C:\users\default\popescu5401**

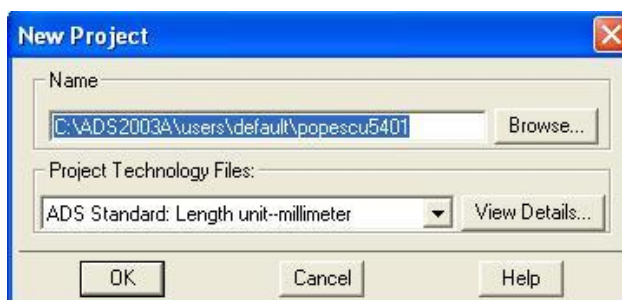




Fig. 11. Crearea unui nou proiect

Se creează astfel proiectul respectiv, care este deschis automat. Implicit se creează și o primă schemă, într-o fereastră nouă care poate fi utilizată pentru a desena schema ce urmează a fi simulată.

În caz că această fereastră nu a fost creată se poate alege butonul  pentru a genera această schemă sau comenzile **File > New Design** din meniu. Este recomandat să se salveze aceasta schemă (fereastra [popescu5401\_prj] untitled1)  pentru a avea un nume ce poate fi recunoscut. După salvare fișierul corespunzător va putea fi găsit în secțiunea **networks** din structura proiectului (fereastra principală - Main - fig. 10,12) în caz că îl veți închide din greșeală.

Ca și Sonnet, ADS este un program multi-fereastră, cu programe individuale care comunică între ele, astfel că vă puteți găsi frecvent în situația în care aveți 4 ferestre deschise simultan (fereastra principală, una sau mai multe scheme, simulatorul - fig. 15, programul de vizualizare a rezultatelor - fig. 16).

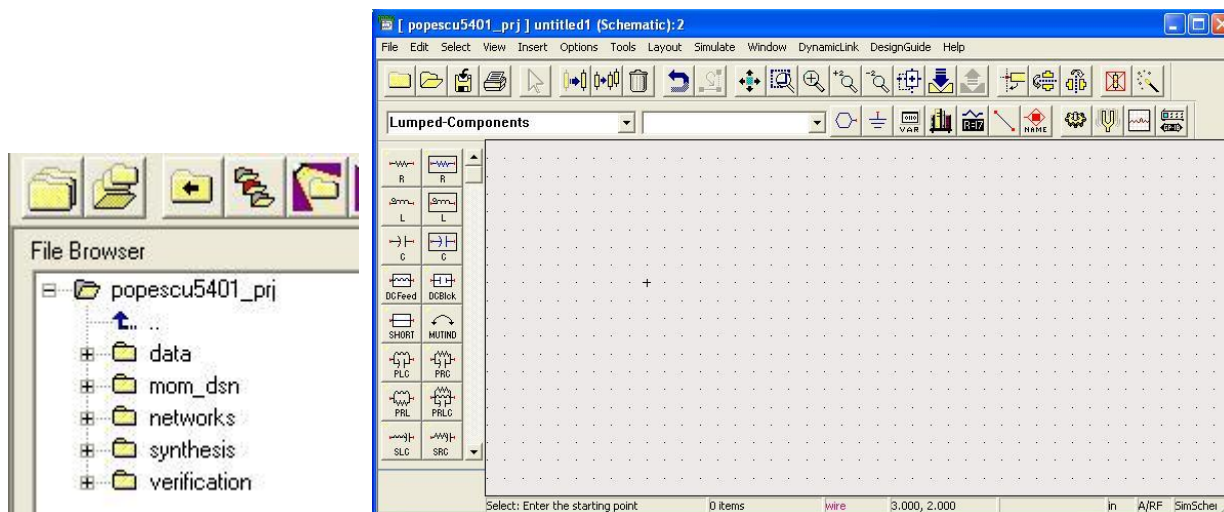


Fig. 12. Structura internă (obligatorie) a unui proiect și introducerea schemei

ADS are componentele grupate pe palete poziționate în partea stângă a interfeței, gruparea fiind în funcție de tipul componentei respective. Pentru introducerea schemei din această lucrare se vor folosi paletele (fig. 13):

- Lumped Components - Elemente concentrate (RLC)
- Simulation S\_Param - elementele de control al analizei, parametri S în acest caz, deoarece analiza electromagnetică cu care se compară schema oferă **numai** acești parametri



- Data Items - pentru introducerea rezultatelor analizei electromagnetice, un diport caracterizat prin fișierul cu parametri S obținut în Sonnet
- Optim/Stat/Yield/DOE pentru implementarea algoritmilor de variație a elementelor din schemă

Elementele comune, des întâlnite pot fi accesate din bara de butoane a programului de desenare a schemei (masa, fire, variabile, etc.)

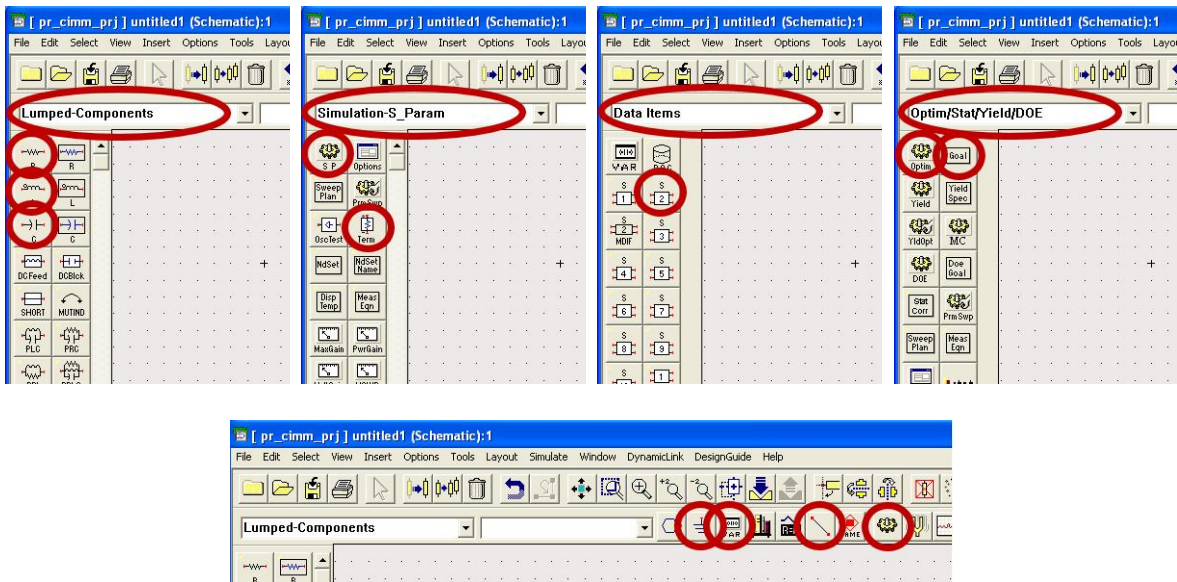


Fig. 13. Palete utilizate în realizarea schemei

Se introduce schema (din fig. 14) prezentată la curs, valorile inițiale fiind obținute cu ajutorul relațiilor de la curs (schema și valorile sunt diferite în funcție de tema aleasă).

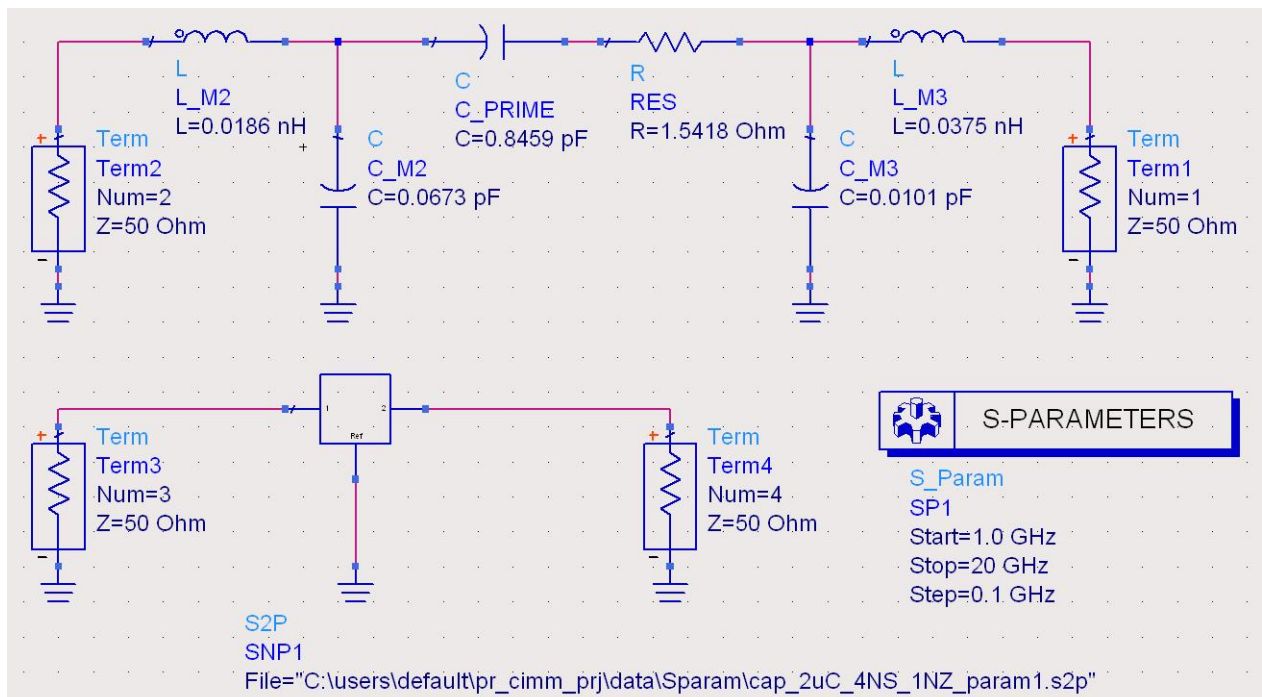



Fig. 14. Verificarea schemei echivalente pentru comparația cu rezultatul analizei electromagnetice

**Nota1:** Are importanță poziționarea corectă a porturilor astfel încât să corespundă cu notația porturilor în Sonnet, mai ales la schemele asimetrice (bobină și condensator PI). De exemplu în figurile 8,9 în Sonnet și 14 în ADS portul 1 (elementul Term cu "Num = 1") este pe nivelul de metalizare M3 iar portul 2 este pe nivelul M2.

**Nota2:** Chiar dacă unele valori pot fi modificate direct pe schemă, se recomandă utilizarea interfeței proprii pentru fiecare element pentru introducerea valorilor, interfață accesibilă prin dublu-click pe elementul respectiv.

Urmează simularea efectivă  , sau **F7** sau comanda din meniu **Simulate > Simulate**. Deoarece este o simulare de circuit, cu modele corespunzătoare dispozitivelor, vă puteți aștepta ca simularea să dureze puțin, de ordinul secundelor. Fereastra simulatorului prezentată mai jos (fig. 15) rămâne deschisă. Urmăriți mesajele pentru a identifica un eventual mesaj de eroare. Dacă e cazul, încercați să îl interpretați și să corectați eroarea, în caz de insucces apăsați la ajutorul cadrului didactic.

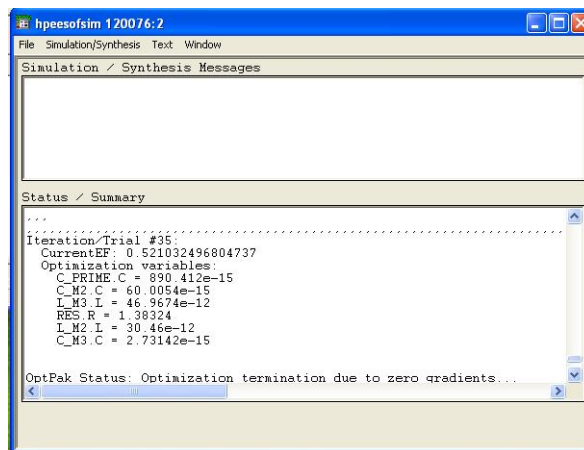


Fig. 15. Simulatorul ADS

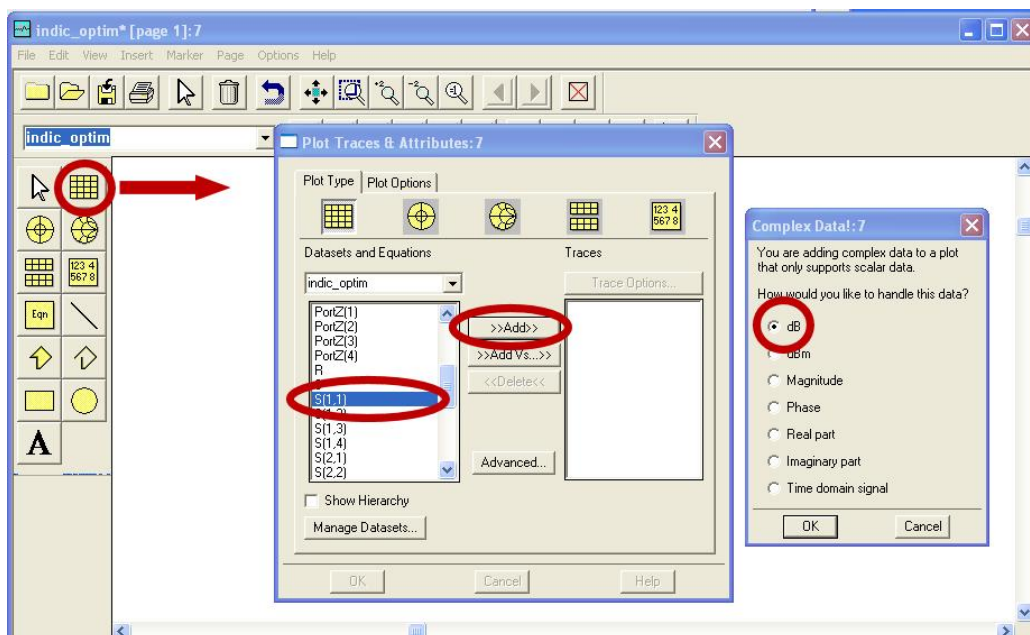


Fig. 16. Programul de vizualizare ADS

După terminarea **cu succes** a analizei se va deschide fereastra de vizualizare a rezultatelor (fig. 16). Vă interesează să reprezentați parametrii S pentru rezultatele din Sonnet și pentru schema echivalentă, pe același grafic, deci veți alege în momentul plasării graficului rectangular pe ecran S(1,1) și reprezentarea modulului (în dB). Se compară reflexia la intrare, nivelul de metalizare M3, pentru ambele scheme (portul 1 pentru schema echivalentă, portul 3 pentru parametrii S importați) deci  $S_{33}/S_{11}$ , și transmisia între intrare și ieșire (ieșirea e pe nivelul de metalizare M2, portul 2 pentru schema echivalentă, portul 4 pentru parametrii S importați) deci  $S_{43}/S_{21}$  (fig. 17).

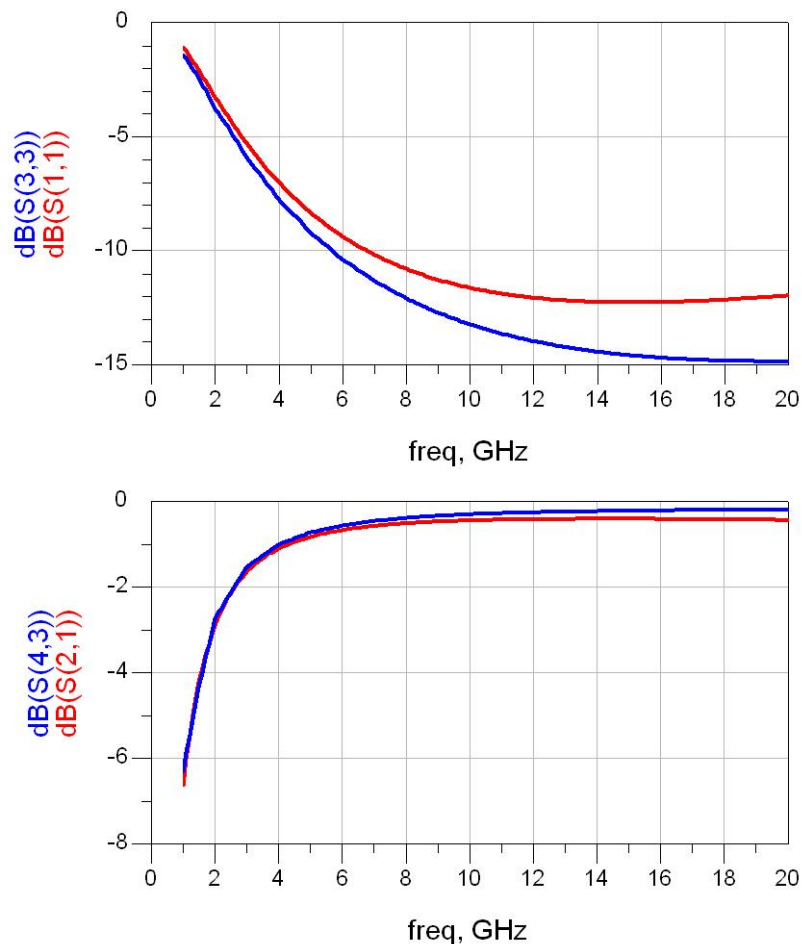


Fig. 17. Compararea simulării de circuit cu simularea electromagnetică pentru condensator PI

Scopul analizei va fi determinarea valorilor de componente care să conducă la suprapunerea cât mai exactă a celor două grafice. Această metodă de generare a modelelor poate fi la modul general aplicată și dacă setul de referință este obținut în urma măsurărilor și nu din simulări electromagnetice.

Algoritmii de optimizare necesită:

- indicarea elementelor care urmează a fi modificate,
- alegerea unei metode de modificare/mod de calculare a abaterii față de țintă, și
- indicarea obiectivului ce trebuie atins (goal)

Pentru a indica ce elemente trebuiesc modificate, se accesează interfața proprie fiecărui element (RLC - fig. 18 - butonul "... Optimization ...") și apoi interfața de optimizare, unde trebuie activat

("Enabled") respectiva componentă/valoare, urmat de limitarea intervalului de variație al componentei (posibilitatea variației nelimitate - "Unconstrained" - deși existentă în interfață, nu este recomandabilă într-un procedeu de optimizare). Ținând cont de faptul că relațiile de la curs oferă deja niște valori estimate, se poate defini în jurul lor un interval (min/max) sau o abatere procentuală sau absolută în jurul valorii de start. Alegerea (fig. 18) a unui interval, are avantajul obținerii unor limite cu valoare numerică "rotundă" ușor de remarcat în situația în care o componentă ajunge să atingă aceste valori în urma procesului de optimizare (situație care indică necesitatea schimbării intervalului).

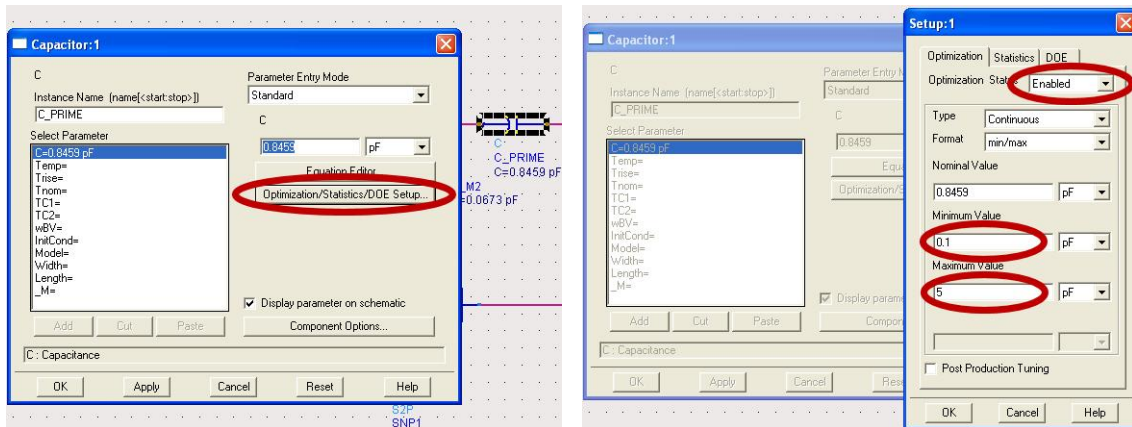


Fig. 18. Definierea variabilelor și a intervalului de variație ADS 2003/2009

Se remarcă faptul că versiunile de ADS de după ADS 2009 beneficiază suplimentar de o variantă îmbunătățită de a vizualiza și modifica variabilele utilizate în procesele de optimizare, accesibilă din meniu **Simulate > Simulation Variables Setup** (fig. 19)

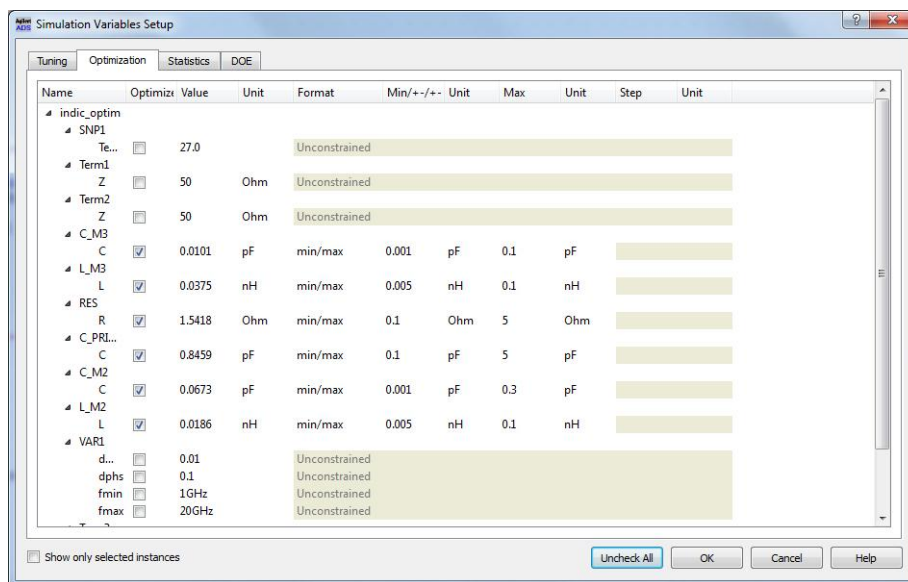


Fig. 19. Definierea variabilelor și a intervalului de variație (ADS 2009)

După indicarea elementelor ce urmează a fi modificate, în schemă (fig. 20) acestea vor putea fi identificate ca fiind incluse în procesul de optimizare (valoarea elementului este urmată de opt, împreună cu indicații ale intervalului de variație). Din paleta Optim/Stat/Yield/DOE (fig. 13) se



introduce controler-ul de simulare corespunzător (OPTIM), care, împreună cu indicarea obiectivelor procesului de optimizare, va completa schema utilizată în procesul de optimizare (fig. 20).

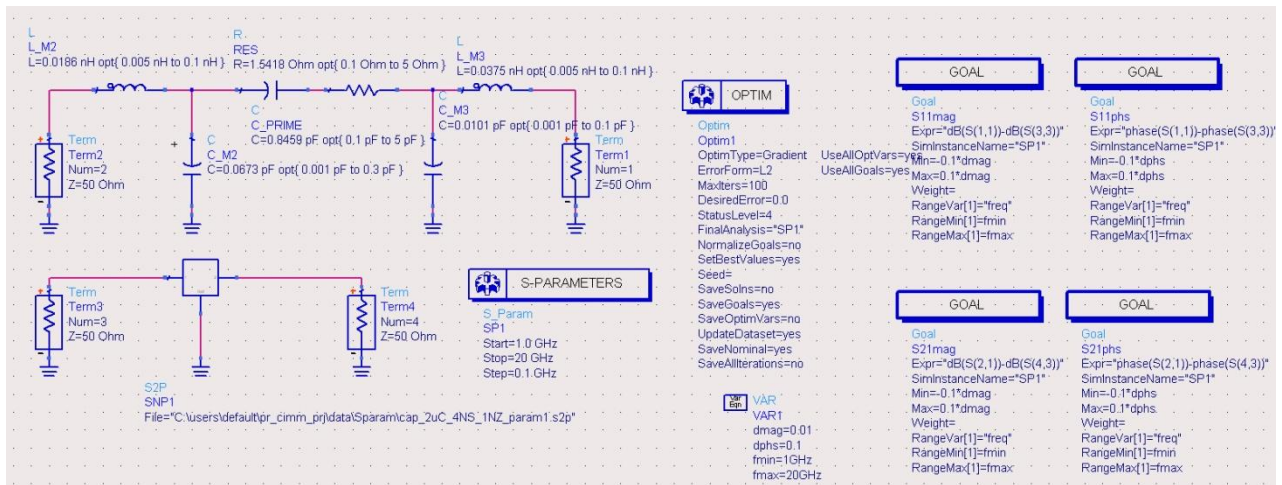


Fig. 20. Introducerea procedurii de optimizare (de suplimentat cu S<sub>22</sub>)

Pentru controler-ul de optimizare trebuie indicate (fig. 21) metoda de optimizare utilizată (pentru problema curentă metodele Gradient sau Random sunt suficiente), variabilele și obiectivele care se utilizează în algoritm și numărul (maxim) de iterații care trebuie realizate pentru a ajunge la rezultat.

The figure shows two screenshots of the 'Nominal Optimization:3' dialog box. The left screenshot shows the 'Setup' tab with the following settings:

- Optim Instance Name: Optim1
- Optimization Type: Gradient
- Optimization Goal and Variable Setup: Use All Goals in Design (checked)
- Stopping criterion: Number of iterations: 100

The right screenshot shows the 'Parameters' tab with the following settings:

- Output Data: Goal expressions (checked)
- Output Data Control: Save data for iteration(s): Nominal & Last
- Final Analysis: SP1
- Desired Error: 0.0
- Set best values for parent optimization (checked)

Below the screenshots, the VAR and GOAL definitions are shown:

**VAR**

```

VAR1
dmag=0.001
dphs=0.01
fmin=1GHz
fmax=20GHz
    
```

**GOAL S21mag**

```

Goal
S21mag
Expr="dB(S(2,1))-dB(S(4,3))"
SimInstanceName="SP1"
Min=-1*dmag
Max=dmag
Weight=
RangeVar[1]="freq"
RangeMin[1]=fmin
RangeMax[1]=fmax
    
```

**GOAL S21phs**

```

Goal
S21phs
Expr="phase(S(2,1))-phase(S(4,3))"
SimInstanceName="SP1"
Min=-1*dphs
Max=dphs
Weight=
RangeVar[1]="freq"
RangeMin[1]=fmin
RangeMax[1]=fmax
    
```


Fig. 21. Controlul procedurii de optimizare

În secțiunea "Parameters" se specifică care sunt datele care trebuie salvate (inițiale, intermediare, finale), dacă programul de vizualizare asociat va fi activ în timpul simulării sau nu, dacă trebuie realizată o analiză cu valorile finale obținute la optimizare. Activarea salvării unor date intermediare sau finale e necesară poate în etapa realizării proiectului pentru că permite urmărirea evoluției procesului (permițând eventual oprirea a unei analize care nu se desfășoară în direcția necesară).

Obiectivele pentru algoritmul de optimizare (pot fi oricât de multe, dar creșterea numărului acestora mai mult decât este necesar pentru rezolvarea problemei poate încetini sau chiar face imposibilă obținerea unui punct optim) se introduc prin introducerea elementului "Goal" din aceeași paletă Optim/Stat/Yield/DOE (fig. 13). Elementul "Goal" e caracterizat de o expresie matematică "Expr" care nu trebuie să scadă sub valoarea "Min" sau să crească peste valoarea "Max" când variabila independentă "RangeVar" (tipic această variabila este frecvența - "freq") variază între "RangeMin" și "RangeMax". Pot fi mai multe variabile independente dacă problema de rezolvat o necesită.

În cazul temei curente, se ține cont de faptul că parametrii S sunt numere complexe, caracterizate de modul și fază, deci pentru fiecare parametru care se cere modelat în schemă apar două obiective, unul în care expresia caracterizează abaterea modulului, un al doilea în care expresia caracterizează abaterea fazei. Ținând cont că schema implementată e un circuite reciproc (fără circuite active, ferite)  $S_{12} = S_{21}$ , deci condițiile de coincidență trebuie puse doar pentru 3 parametri:  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  și  $S_{22}$  ( $S_{22}$  nu apare în fig. 20 dar intervine cu două obiective la fel ca ceilalți parametri S). Pentru a ușura modificarea simultană a tuturor obiectivelor se folosește un bloc VAR pentru a defini variabile pentru eroare modul (dmag), eroare fază (dphs), frecvență minimă (fmin), frecvență maximă (fmax). O schimbare în acest bloc va fi automat transferată la toate cele 6 elemente obiectiv "Goal".

Valorile obținute în urma procesului de optimizare pot fi afișate (varianta recomandată este sub formă tabelară - fig. 22) și pot eventual fi preluate în schemă cu comanda **Simulate > Update Optimization Values** (comandă necesară doar dacă se utilizează mai departe aceste valori, în alte condiții fiind preferabilă păstrarea valorilor inițiale în schemă pentru realizarea unei scheme echivalente pentru un alt set de parametri S). Numărul de iterații parcurse poate furniza informații importante. Astfel, optimizarea cu metode de gradient caută un minim al obiectivelor pentru toată gama de frecvență, în mod normal la atingerea acestuia procedeul se oprește. Încheierea cu succes a acestui algoritm se poate observa dacă numărul de iterații parcurs e mai mic decât cel indicat la pasul anterior (fig. 21). În caz contrar trebuie repetată simularea cu un număr mai mare de pași, sau cu intervale mai largi pentru componente, sau cu abatere permisă mai mare. Dimpotrivă la optimizarea cu metode aleatorii (Random) se parcurg toți pașii indicați, fără condiții de oprire, deci numărul de iterații trebuie să fie egal cu cel maxim.



C_M2.C	C_M3.C	...PRIME.C	L_M2.L	L_M3.L	R	InitialEF	FinalEF	NumIters
6.001E-14	2.732E-15	8.904E-13	3.046E-11	4.697E-11	1.383	9.454	0.521	41.000

Fig. 22. Valorile optimizate din schema echivalentă pentru condensator PI

Fie prin realizarea unei analize de parametri S finale (fig. 21) fie prin preluarea în schemă a valorilor optimizate și realizarea manuală a unei analize de parametri S, se poate verifica potrivirea între seturile de parametri S (fig. 23) și obține modelul echivalent al componentei simulate/măsurate (fig. 24).



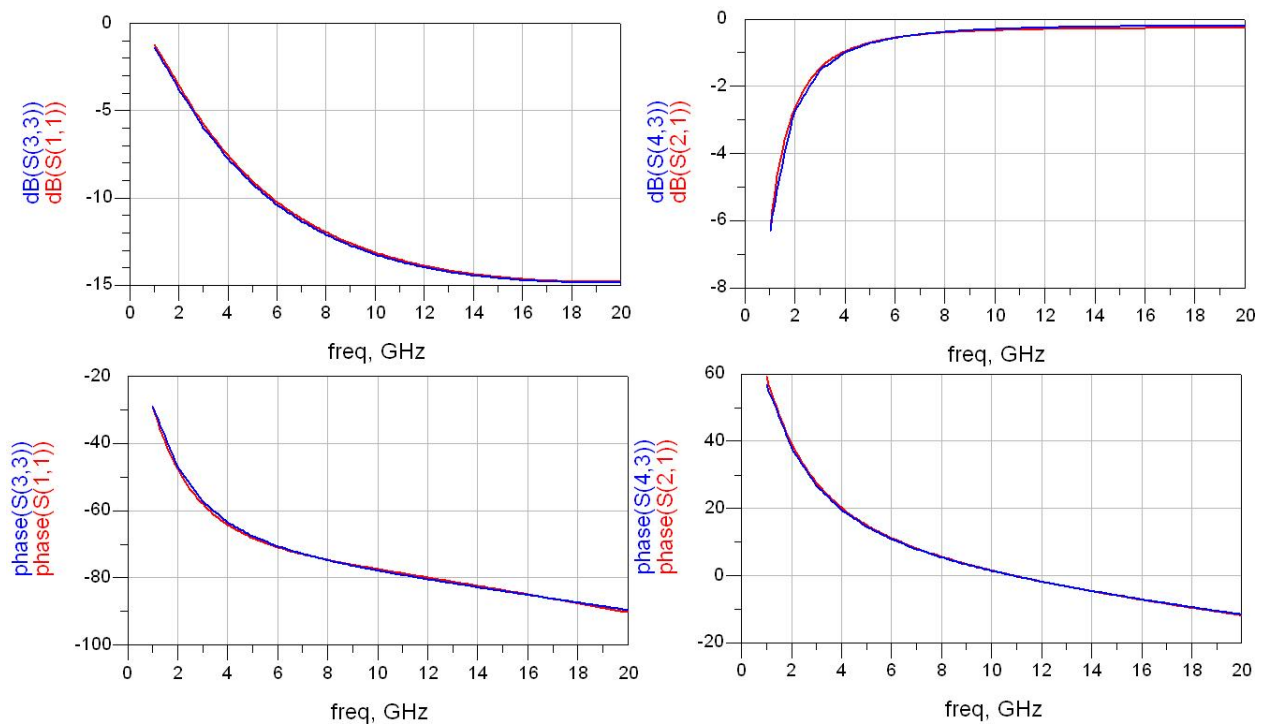


Fig. 23. Rezultatele optimizării pentru condensator PI

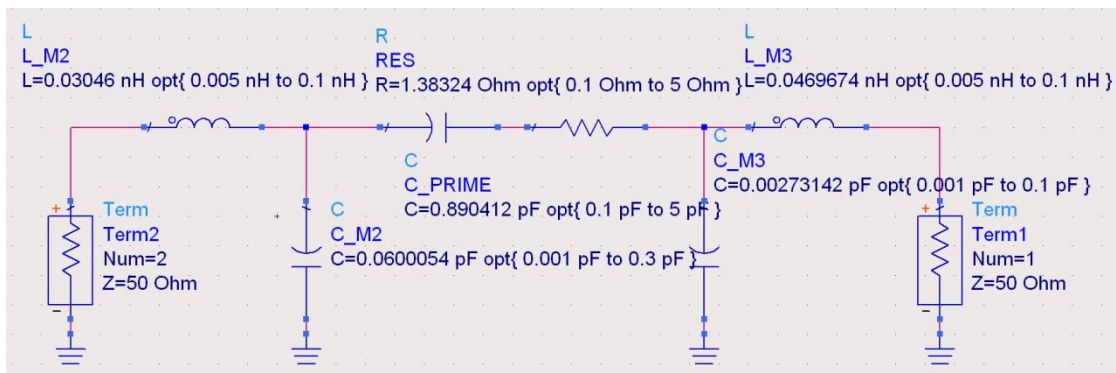


Fig. 24. Modelul final pentru condensatorul PI

## Exemplu de proiectare

Să se proiecteze un condensator planar (sandwich) cu poliimidă cu latura armăturii de  $X \mu\text{m}$ .

Se încearcă obținerea notei maxime, deci la nota de bază 6p se adaugă bonus-urile pentru "Utilizare structură cu nouă straturi" (+1p, Fig. 7b), "Utilizare model Thick metal" (+2p, Fig. 3,4) și "Utilizare model Dielectric Brick" (+1p, Fig. 6,7b).

Se desenează structura în Sonnet conform indicațiilor anterioare. Structura de bază va fi cea corespunzătoare complexității maxime țintite (Fig. 7b), fiind relativ ușor de eliminat straturi, blocuri dielectrice, modificat model de metal pentru a realiza analize simplificate.

O primă alegere care trebuie realizată este cea a dimensiunii celulei, deoarece desenarea se face prin nodurile unui grilaj existent. În acest moment trebuie ținut cont de cum va fi modificată celula pe

viitor, deoarece la modificarea celulei se schimbă și grilajul asociat, și e mai comod ca structura desenată să se potrivească și cu grilajele viitoare, evitând astfel desenarea din nou a structurii de fiecare dată.

Se alege celula cea **mai mare preconizată** a fi utilizată ca divizor al laturii armăturii și a altor dimensiuni din structură, chiar dacă numerele rezultate nu vor fi tocmai "rotunde". În continuare orice înjumătățire a celulei va păstra desenul ancorat pe grilaj.

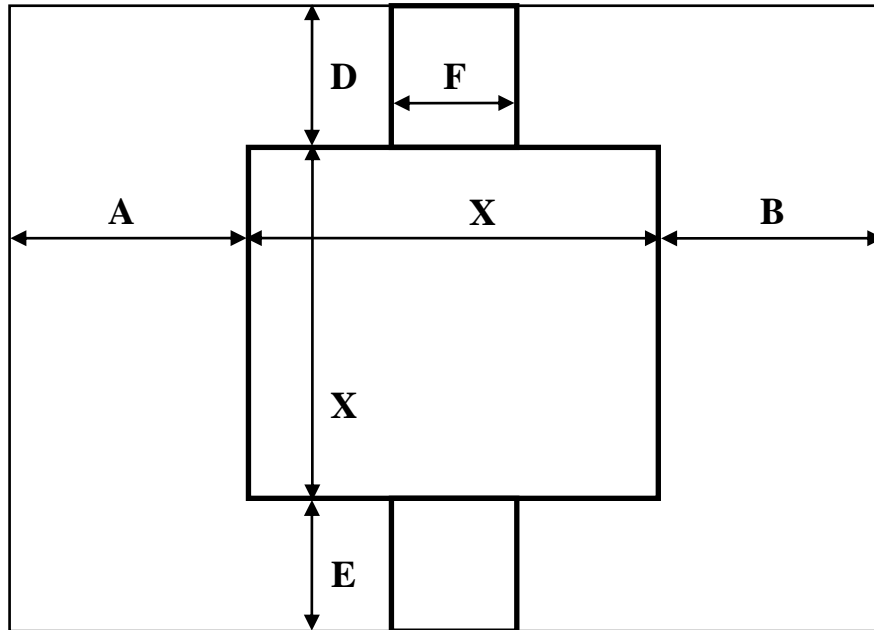


Fig. 25. Alegerea dimensiunii maxime a celulei

$$\frac{X}{C_0} = k \in N \quad \frac{A}{C_0} = l \in N \quad \frac{B}{C_0} = m \in N \quad \frac{D}{C_0} = p \in N \quad \frac{E}{C_0} = q \in N \quad \frac{F}{C_0} = r \in N$$

$$C_i = C_0 \cdot 2^{-i} \rightarrow \frac{X}{C_i} = \frac{X \cdot 2^i}{C_0} = k' \in N \quad \frac{A}{C_i} = l' \in N \quad \frac{B}{C_i} = m' \in N \quad \dots$$

Dacă structura o impune, celulele nu trebuie neapărat să fie pătrate, discuția fiind similară dar separată pe cele două direcții, apărând două grade de libertate suplimentare ( $C_0 \rightarrow C_0^x, C_0^y$ ;  $i \rightarrow i, j$ ):

$$\frac{X}{C_0^x} = k \in N, \frac{A}{C_0^x} = l \in N, \frac{B}{C_0^x} = m \in N, \frac{F}{C_0^x} = p \in N \quad \frac{X}{C_0^y} = q \in N, \frac{D}{C_0^y} = r \in N, \frac{E}{C_0^y} = s \in N$$

$$C_i^x = C_0^x \cdot 2^{-i}; \quad C_j^y = C_0^y \cdot 2^{-j}; \quad i, j \in N$$

Se reamintește puterea "magică" a puterilor lui 2 în ceea ce privește alegerea unei dimensiuni inițiale. Se recomandă îndeplinirea, dacă e posibil, ca fiecare din valorile întregi ale rapoartelor din relațiile anterioare ( $k, l, m, p, q, r, s$ ) să fie o putere a lui 2. În acest caz, dacă alegerea inițială se dovedește a fi prea mică, este posibilă dublarea dimensiunii celulei de un număr de ori (variabil) cu păstrarea condiției de ancorare a desenului structurii pe nodurile grilajului.

$$\frac{X}{C_0} = k = 2^t \rightarrow C_i = C_0 \cdot 2^i \rightarrow \frac{X}{C_i} = \frac{X}{C_0 \cdot 2^i} = \frac{2^t}{2^i} = k' \in N; \quad \forall i < t \quad \dots$$

Regulile amintite creează o serie geometrică pentru dimensiunile celulei, utilizând 2 ca bază. Orice număr întreg poate fi folosit ca bază, dar utilizarea unui număr mai mare duce la obținerea unei scăderi a celulei mult prea rapidă care crește prea brutal memoria și timpul necesare pentru analiză (ex: 1,2,4,8,16... / 1,3,9,27,81...)

**Notă importantă:** Sub nici un motiv **nu** se dezactivează opțiunea Snap (din meniu Tools > Snap Setup sau - mai ușor de apăsăat din greșeală - din butonul din bară). Dacă nu se poate desena dimensiunea dorită pe grilajul curent, e un semn că alegerea inițială a celulei a fost greșită.

Pentru schema realizată se alege celula cea mai mare de dimensiune 8μm, pătrată, cu îndeplinirea condițiilor anterioare. Vom putea apoi micșora celula prin înjumătățire (4μm, 2μm, 1μm, 0.5μm) fără a mai fi necesară redesenarea structurii. Se utilizează frecvent comanda View > View 3D pentru a verifica poziționarea corectă a elementelor (Fig. 26 - după direcția Z scala este exagerată pentru observarea detaliilor subțiri).

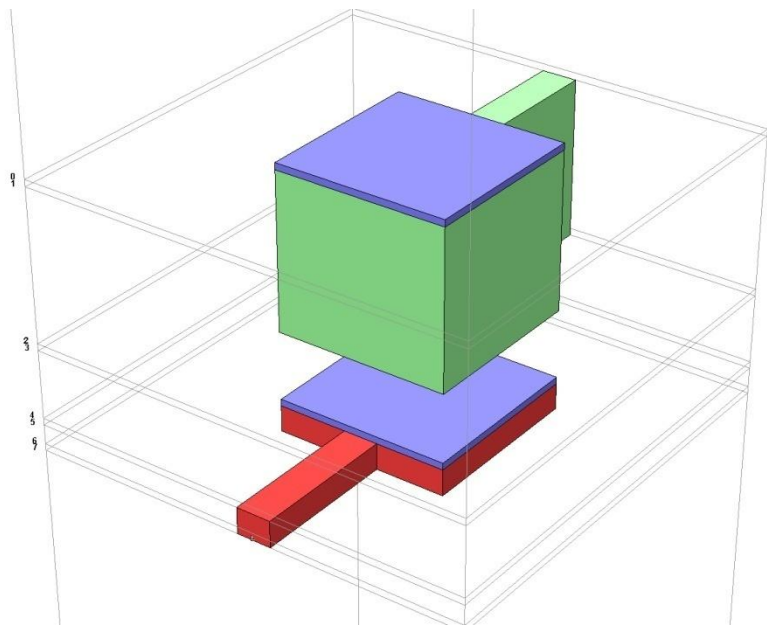


Fig. 26. Structura desenată: 9 straturi (8 nivele), Thick Metal, Dielectric Brick

Urmează realizarea unei analize de convergență pentru a determina nivelul de detalii necesar de a fi introdus în analiză. Mărimea primară de interes pentru dispozitivul simulat este capacitatea primară. Pentru fiecare analiză electromagnetică se vor salva parametri S într-un fișier Touchstone care va fi folosit în ADS pentru optimizarea schemei echivalente și obținerea parametrilor din schemă. Valorile calculate cu relațiile din curs pentru modelul echivalent (valorile de start din ADS) sunt cele din figura 14:

$$C\_PRIME = 0.8459 pF, L\_M2 = 0.0186 nH, L\_M3 = 0.0375 nH$$

$$RES = 1.5418 \Omega, C\_M2 = 0.0673 pF, C\_M3 = 0.0101 pF$$

E momentul să menționăm că ținta analizelor nu va fi să obținem exact aceste valori prin simulare, deoarece caracteristicile tehnologiei Plessey ar putea să fie puțin diferite de caracteristicile menționate în tabelul 3.

Investigarea efectului modelării metalizărilor se face pentru o structură cu celula de 4μm, cu modelul Thick metal cu un număr variabil de folii metalice (NS = 2,4,8,16), pe o structură fără utilizarea blocurilor dielectrice (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> aplicat pe metalizări) pentru accelerarea analizelor. Vom verifica și situația utilizării unor modele mai puțin performante pentru metalizări (NS = 0, metalizare ideală - LossLess - sau normală - Normal Metal). Pentru aceste modele, trebuie să ținem cont de dispariția înălțimii metalizărilor, care nu sunt neglijabile, acest lucru putând fi realizat prin eliminarea straturilor de dielectric de înălțime  $h_{PI1} = h_{M2} - h_{Si}$  și  $h_{a1} = h_{M3} - h_{Si}$  din figura 7b. Deoarece mărimea capacității unui condensator planar depinde explicit de distanța dintre armături, în acest mod asigurăm cu aproximație aceeași înălțime de poliimidă între acestea. Rezultatele analizei de convergență sunt prezentate în tabelul 4 și figura 27.

Nr	Cell [μm]	NS	NZ	Mem. [MB]	Timp/f [s]	C_PRIME [pF]	Obs.
1	4	0	0	8	1	0.8155	0 (LL)
2	4	0	0	8	1	0.8157	0 (NM)
3	4	2	0	49	6	0.8491	2 (TM)
4	4	4	0	94	13	0.8492	4 (TM)
5	4	8	0	226	42	0.8492	8 (TM)
6	4	16	0	662	170	0.8493	16 (TM)

Tabel 4. Analiză de convergență, caracteristici metalizări

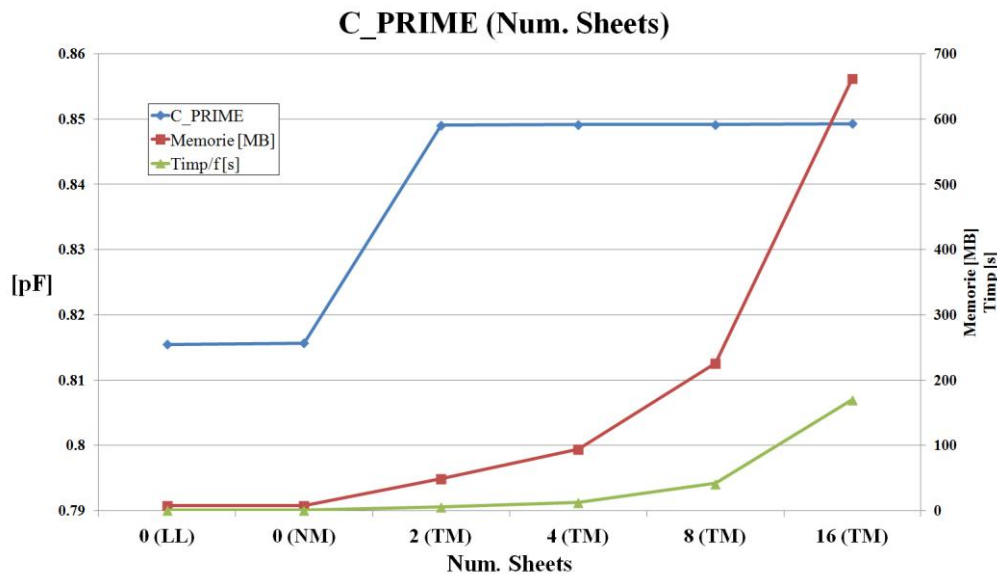


Fig. 27. Analiză de convergență, caracteristici metalizări

Analiza de convergență arată importanța utilizării modelului "Thick Metal", dar demonstrează de asemenea faptul ca un număr de două nivele de metalizare ar fi suficiente pentru structura analizată (cu mai multe nivele apare o variație a capacității dar nu este esențială). Vom alege totuși 4 nivele de metalizare pentru a îndeplini condițiile de obținere a punctelor bonus.

Investigarea dimensiunii celulei necesară pentru analiză va fi făcută de asemenea în lipsa blocurilor dielectrice aplicate pe metalizări pentru accelerarea analizelor. Rezultatele sunt prezentate în tabelul 5 și figura 28. Se observă că variația capacității determinate este de ordinul 0.5% între celula de 8 $\mu$ m și cea de 0.5 $\mu$ m deci o dimensiune de 8 $\mu$ m ar putea fi suficientă. Totuși celulele fixate în planele de metalizare vor genera secționare corespunzătoare și a blocurilor de dielectric care vor fi aplicate pe metalizări. Avem anumite informații legate de necesitățile de memorie și timp de calcul și o indicație relativ la valoarea aproximativă a celulei care trebuie utilizată (~4 $\mu$ m) dar o decizie definitivă trebuie luată cu structura completă (inclusiv cu blocurile de dielectric)

Nr	Cell [ $\mu$ m]	NS	NZ	Mem. [MB]	Timp/f [s]	C_PRIME [pF]
1	8	4	0	46	6	0.8483
2	4	4	0	94	13	0.8492
3	2	4	0	196	42	0.8506
4	1	4	0	422	175	0.8519
5	0.5	4	0	910	795	0.8530

Tabel 5. Analiză de convergență, dimensiune celulă, fără "Dielectric Brick"

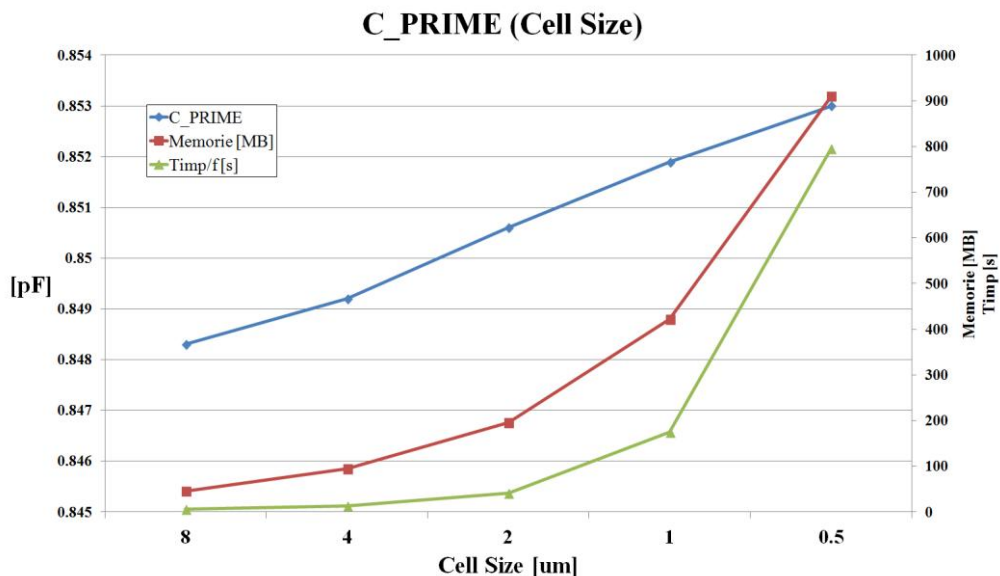


Fig. 28. Analiză de convergență, dimensiune celulă, fără "Dielectric Brick"

Investigarea efectului partiționării pe verticală a straturilor de dielectric care vor conține blocuri dintr-un alt dielectric (model "Dielectric Brick") se face cu o dimensiune a celulei mare (8 $\mu$ m), pentru a nu genera analize excesiv de lungi și consum excesiv de mare de memorie. Rezultatele sunt prezentate în tabelul 6 și figura 29. Se observă importanța deosebită pe care o are introducerea blocurilor de dielectric (în principal stratul depus pe metalizarea M2 care joacă rol de dielectric dintre armăturile condensatorului), în schimb pentru această structură particulară partiționarea suplimentară pe verticală a blocului în 2 sau mai multe nivele nu aduce deloc modificarea rezultatelor. Deci blocurile de dielectric vor trebui să apară dar nu este necesar să fie partiționate suplimentar, e suficient Z Parts = 1.

Nr	Cell [ $\mu\text{m}$ ]	NS	NZ	Mem. [MB]	Timp/f [s]	C_PRIME [pF]	Obs.
1	8	4	0	46	6	0.8483	fără Dielectric Brick
2	8	4	1	150	13	0.8882	
3	8	4	2	272	22	0.8882	
4	8	4	4	629	60	0.8882	

Tabel 6. Analiză de convergență, partiționare pe verticală a "Dielectric Brick" (Z Parts)

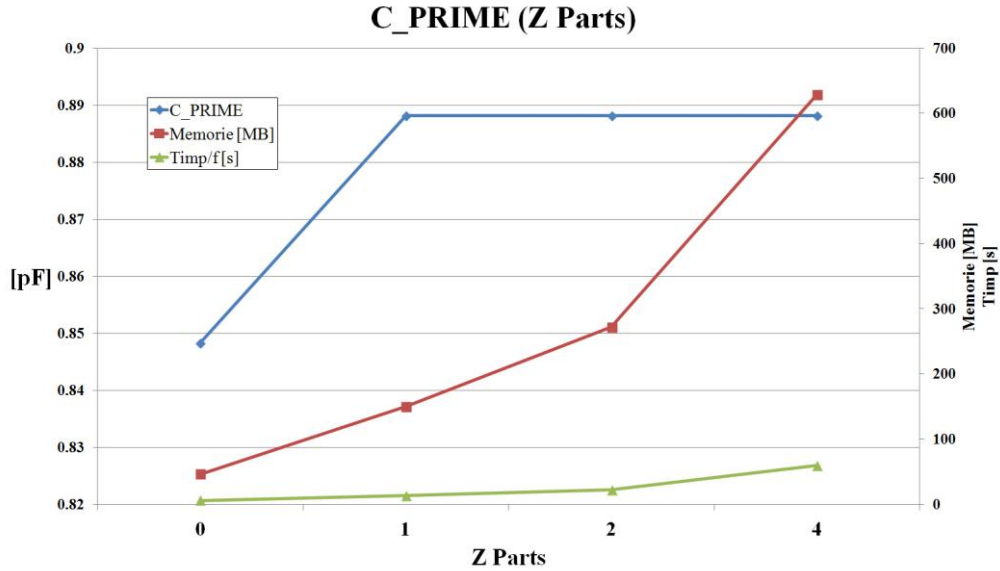


Fig. 29. Analiză de convergență, partiționare pe verticală a "Dielectric Brick" (Z Parts)

În acest moment se cunoaște că e nevoie de metalizare "Thick Metal" cu 4 nivele de metalizare, blocuri de dielectric fără secționare suplimentară (Z Parts = 1) și o dimensiune a celulei de ordinul 8-4-2 $\mu\text{m}$ . O analiză de convergență pe structura completă (figura 26) este necesară pentru o decizie finală asupra dimensiunii celulei. Rezultatele unei astfel de analize sunt prezentate în tabelul 7 și figura 30. Se utilizează mărimile (Num. Sheets și Z Parts) determinate anterior și se variază dimensiunea celulei. Variația se oprește la celulă pătrată cu latura de 2 $\mu\text{m}$ , necesarul de memorie pentru a realiza analiza cu o celulă de 1 $\mu\text{m}$  fiind prea mare pentru a efectua calculele (61565MB). Variația capacității primare de la 8 la 2 $\mu\text{m}$  este foarte mică (0.24%) deci inclusiv analiza cu celulă de 8 $\mu\text{m}$  oferă valoarea acestei capacități cu precizia dorită.

Nr	Cell [ $\mu\text{m}$ ]	NS	NZ	Mem. [MB]	Timp/f [s]	C_PRIME [pF]
1	8	4	1	150	13	0.8882
2	4	4	1	724	80	0.889
<b>3</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>5540</b>	<b>2012</b>	<b>0.8904</b>

Tabel 7. Analiză de convergență, dimensiune celulă, cu "Dielectric Brick"



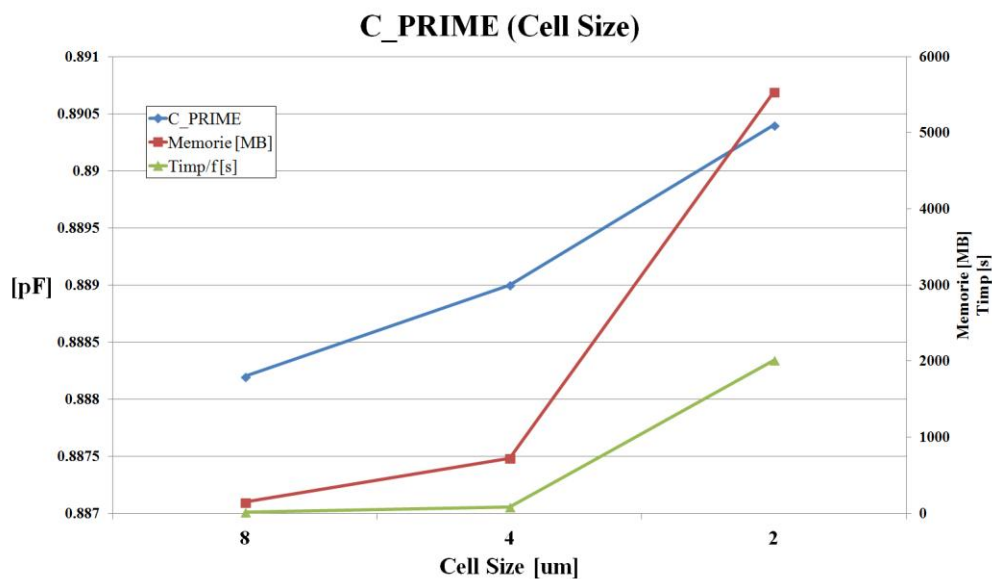


Fig. 30. Analiză de convergență, dimensiune celulă, cu "Dielectric Brick"

Putem păstra ca analiză finală pe cea corespunzătoare celulei de 2 $\mu$ m deoarece:

- a fost deja realizată
- chiar dacă precizia de determinare a capacității nu a fost prea mult îmbunătățită, un efect se poate observa la nivelul elementelor parazite din schemă.

Reprezentarea valorilor elementelor parazite pentru toate analizele menționate anterior sunt prezentate în tabelul 8 și figura 31.

Nr	Cell [ $\mu$ m]	NS	NZ	LM2	LM3	CM2	CM3	R
1	8	4	0	0.02998	0.04836	0.06003	0.002304	1.459
2	4	4	0	0.02969	0.04786	0.06016	0.002467	1.47
3	2	4	0	0.0295	0.0476	0.06019	0.002602	1.476
4	1	4	0	0.02958	0.04747	0.06021	0.002671	1.485
5	4	0	0	0.02721	0.05065	0.06088	0.001595	1.648
6	4	0	0	0.03019	0.04919	0.06013	0.001923	1.371
7	4	0	0	0.02745	0.05059	0.06093	0.001625	1.734
8	4	0	0	0.0304	0.04916	0.06018	0.001952	1.455
9	4	2	0	0.02989	0.04784	0.06014	0.002482	1.475
10	4	8	0	0.0297	0.04778	0.06018	0.002467	1.487
11	4	16	0	0.02977	0.04773	0.06019	0.002467	1.512
12	8	4	1	0.03094	0.04772	0.05982	0.002447	1.366
13	4	4	1	0.03067	0.04721	0.05996	0.002613	1.378
<b>14</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>0.03046</b>	<b>0.04697</b>	<b>0.06001</b>	<b>0.00273</b>	<b>1.383</b>
15	8	4	2	0.03094	0.04772	0.05982	0.002447	1.366
16	8	4	4	0.03094	0.04772	0.05982	0.002447	1.366
17	0.5	4	0	0.02963	0.04738	0.06023	0.002692	1.491

Tabel 8. Analiză de convergență, valori elemente parazite

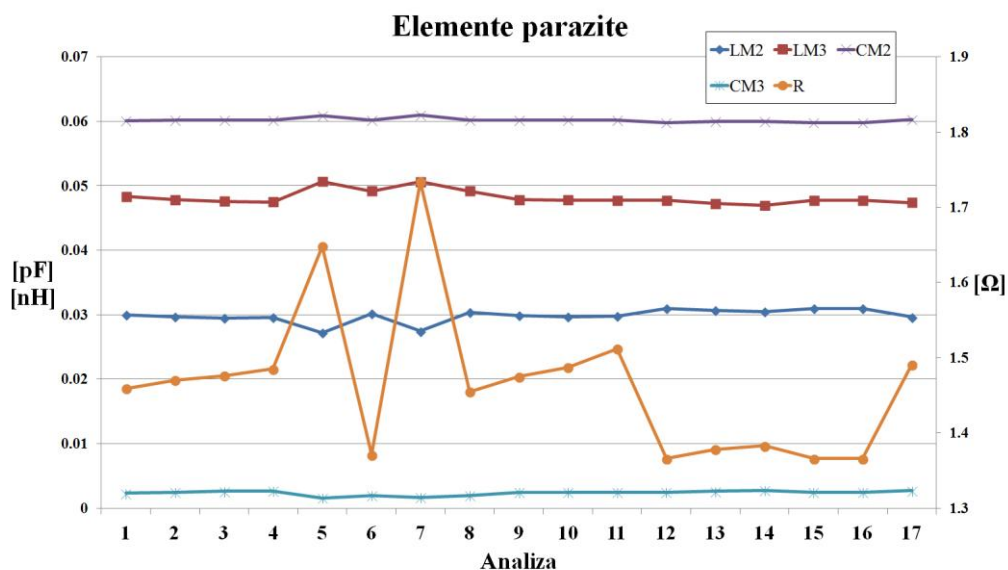


Fig. 31. Analiză de convergență, valori elemente parazite

Se observă că valorile elementelor parazite sunt consistente între analize pentru elementele reactive, cu excepția pierderilor în structură caracterizate de rezistența serie, a cărei valori depind destul de mult de modelarea pierderilor prin metalizări și de prezența pasivizărilor de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  aplicate pe metalizări (reprezentare pe axa secundară din dreapta în fig. 31). Mai ales valoarea rezistenței beneficiază de micșorarea celulei la  $2\mu\text{m}$  (index 14 în tabelul 8), rezistența crescând cu 1.25% față de analiza cu  $8\mu\text{m}$  celulă.

### Note finale

- Pentru interpretarea timpului necesar pentru analiză și scalarea acestui exemplu la sistemul de calcul propriu: analizele au fost realizate pe un sistem cu două microprocesoare fizice X5450 @ 3.00GHz, fiecare microprocesor având 4 nuclee fizice distincte. Fiecare din cele 8 nuclee a fost folosit în proporție de 100% pe parcursul analizelor. Memoria fizică prezentă: FB-DDR2, 32GB @ 333MHz, sistem de operare Windows 7, 64 biți.
- Optimizările în Advanced Design System au fost realizate folosind metoda "Gradient", Number of Iterations:1000, dmag:0.01, dphs:0.1 . Valorile obținute nu sunt mai precise (în limita atinsă la analize: 1%) și nu justifică obligatoriu alegerea acestei metode pentru optimizare. A fost aleasă deoarece spre deosebire de utilizarea analizei "Random" rezultatele sunt repetabile (fără implicarea numerelor aleatorii). În general se poate utiliza fără probleme "Random" cu un număr mai mare de iterații (10000) deoarece algoritmul de optimizare este mult mai rapid.
- Majoritatea timpului total de analiză a fost folosit pentru cele două analize cu necesar de memorie ridicat, ca urmare recomandarea de a realiza majoritatea analizelor de convergență pe modele simplificate la maxim oferă un câștig de timp destul de ridicat. În exemplul prezentat se observă că la investigarea unui parametru (C, NS, NZ) ceilalți doi sunt reduși la minimum posibil.
- Respectarea inițială a indicațiilor cu privire la alegerea dimensiunilor celulei în funcție de dimensiunile fizice din circuit și relativ, pe cât posibil, la puterile lui 2, reduce extrem de

mult timpul consumat cu desenarea schemei pentru multiplele structuri din analiza de convergență.

- Simulatorul din Sonnet are prevăzută funcționalitatea de rulare automată, succesivă a mai multor proiecte (fig. 32 - butonul Batch List). Se pot salva mai multe proiecte fără a realiza și simularea (diverse dimensiuni de celulă, număr de straturi, de nivele de metalizare etc.), iar cu "Add Project" se pot adăuga în listă, chiar și în timp ce un alt proiect este analizat. Acest lucru oferă posibilitatea de a folosi timpul în care calculatorul simulează un proiect pentru a desena un altul și a-l adăuga la listă ș.a.m.d. (! util mai ales dacă simulatorul nu reușește să folosească 100% toate procesoare existente)
- Informațiile despre Memorie/Timp se pot obține din simulator > butonul "Timing Info" sau după simulare, din orice program din suita Sonnet din meniu: "Project > View Log > Timing Info"

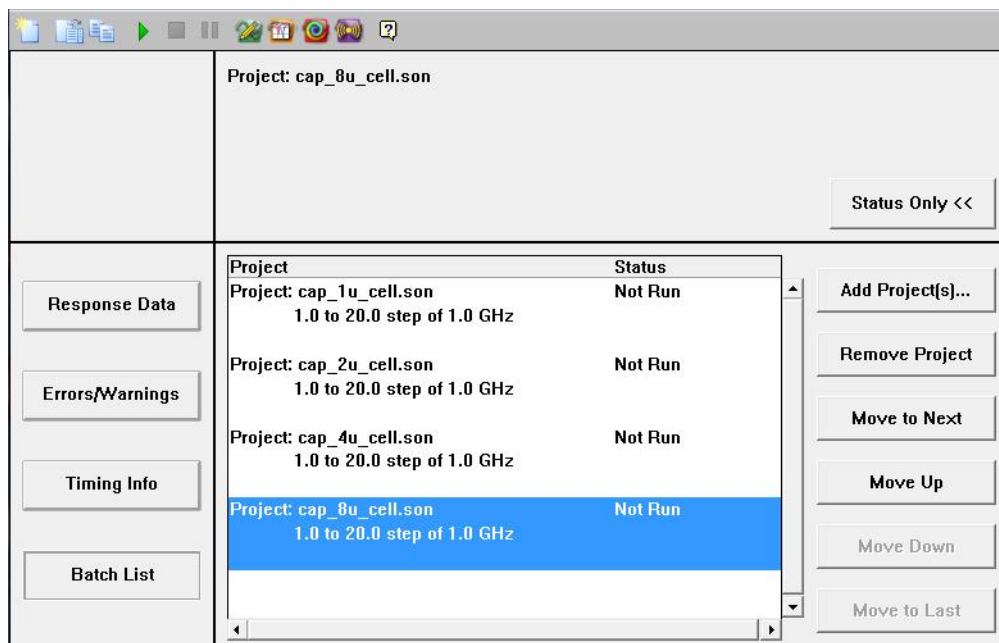


Fig. 32. Simulator Sonnet em, listă de proiecte (Batch List)