

Circuite Integrate Monolitice pentru Microunde

Proiect

Tema de proiectare

Se proiectează circuite pasive realizate în tehnologia prezentată la curs (Plessey). Se folosește EmPro 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 **EmPro** (cel mai precis proiect din analiza de convergență, proiect **funcțional** – directorul corespunzător sau arhiva *.zep a proiectului) **și Advanced Design System** (proiect **funcțional** – directorul "*_wrk" corespunzător sau arhiva *.7zads 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	9
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	fig. 8 - 9
2	Utilizare structură cu cinci straturi (GaAs+Si+PI+Si)	+1	fig. 12 - 13
3	Utilizare model 2D pentru metalizări (PEC, h=0)	0	fig. 8 - 9
4	Utilizare model 3D pentru metalizări (Plessey, h=0.5/3μm)	+1	fig. 12 - 13
5	Utilizare materiale din bibliotecă (GaAs+ Si ₃ N ₄ +PI+Cu)	0	fig. 4
6	Utilizare materiale Plessey (GaAs+ Si ₃ N ₄ +PI+M2+M3)	+0.5	fig. 5 - 6
7	Utilizare 1 metodă (FDTD sau FEM)	0	
8	Utilizare 2 metode (FDTD și FEM)	+0.5	
9	Studiu de convergență în EmPro (minim 3 puncte)	+0.5	fig. 43
10	Studiu de convergență în ADS (minim 3 puncte)	+0.5	fig. 43
11	Implementare decapsulare în EmPro sau ADS	+0.5	fig. 38 - 41
12	Depășire termen limită de predare proiect	-1	13.01.2018

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: utilizare structură cu trei straturi (GaAs+PI+aer) se poate aplica doar pentru bobină și condensator PI nu și pentru condensator Si, sau utilizarea modelului 2D pentru metalizări (PEC) nu e compatibilă cu utilizarea materialelor Plessey (M2/M3)
- Toate componentele implică utilizarea a două nivele de metalizare (M2 și M3) dar în plus realizarea bobinei implică modelarea trecerilor (via-holes)
- Obținerea punctelor bonus pentru studiul de convergență în EmPro și/sau ADS necesită descrierea procesului în documentul predat (fișierele proiect nu conțin toate informațiile).

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 (nitrura de siliciu se depune deasupra acestor metalizări pentru a evita conexiuni electrice nedorite). În tabelul 3 sunt prezentate caracteristicile materialelor utilizate în tehnologia Plessey (ϵ_r și $\tan \delta$ sunt date la **5GHz**).

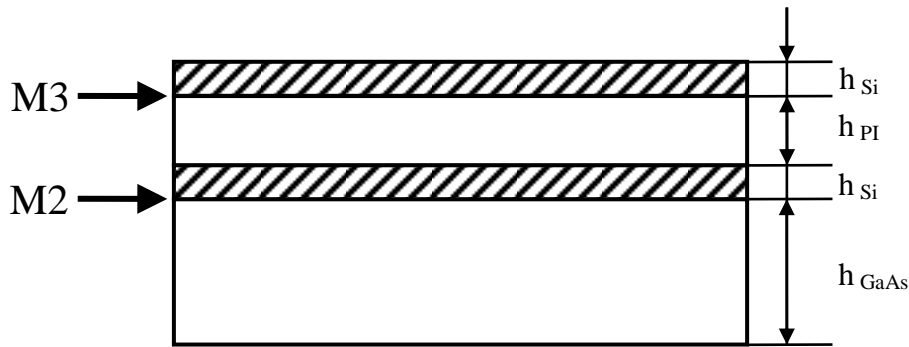


Fig. 1. Straturi dielectrice

Nr.	Material	ϵ_r	$\tan \delta$	$\sigma[S/m]$	$R_{sq}[m\Omega/sq]$	$h[\mu m]$
0	Ground			$3.3 \cdot 10^7$		10
1	GaAs	12.85	$0.3 \cdot 10^{-3}$			200
2	Si_3N_4	7.2	$15 \cdot 10^{-3}$			0.13
3	PI	3.4	$55 \cdot 10^{-3}$			1.4
4	M2			$3.6 \cdot 10^7$	55	0.5
5	M3			$3.3 \cdot 10^7$	10	3
6	Aer	1	0			2000

Tabel 3. Caracteristici materiale utilizate în tehnologia Plessey

La începutul utilizării EmPro este util să fie realizate câteva modificări pentru a ușura în continuare introducerea elementelor. În primul rând, în fereastra de creare a unui proiect nou se pot specifica limitele domeniului de frecvență în care se fac analizele. Banda de validitate a tehnologiei Plessey este 1÷20 GHz dar se recomandă să fie depășită în ambele direcții (la unele metode, de exemplu FDTD) rezultatele obținute la capăt de bandă sunt mai puțin precise. De aceea e recomandabil ca "Minimum frequency" să fie de ordinul 0.5GHz sau mai mic iar "Maximum frequency" să fie de ordinul 25GHz sau mai mare. Modificarea limitelor de calcul poate fi făcută și mai târziu din fereastra "Parameters" (accesibilă din butonul corespunzător din partea dreaptă a interfeței).

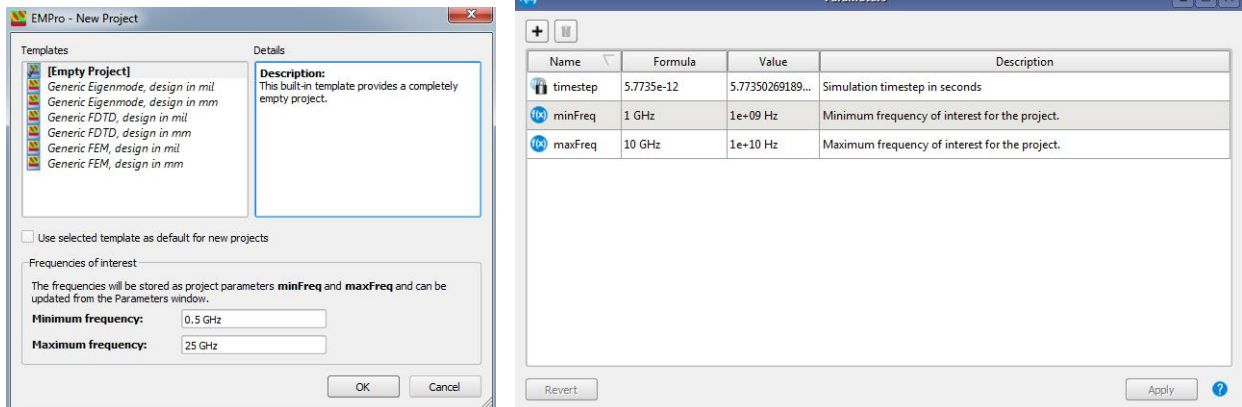


Fig. 2. Frecvențe de interes

Ținând cont că în tehnologia Plessey toate dimensiunile sunt nativ disponibile în μm se recomandă ca printre primele acțiuni în proiecte să fie schimbarea unităților de măsură utilizate pentru lungimi în micrometri pentru a evita conversii multiple în timpul desenării.

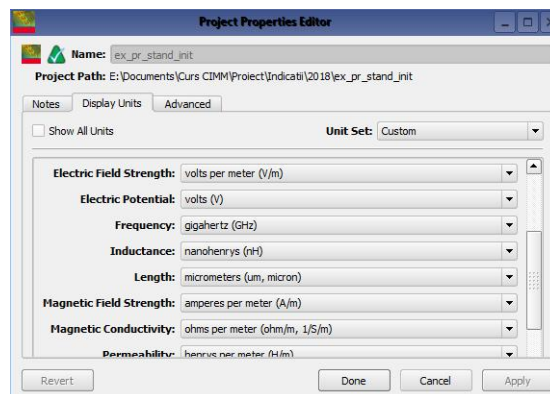


Fig. 3. Unități de măsură

Deoarece utilizarea materialelor proprii tehnologiei aduce puncte bonus, în figurile 4 și 5 sunt prezentate cele două posibilități. La selecția materialelor standard (Default material library) e necesar să fie adăugate materialele GaAs, Polyimide, (eventual) Silicon Nitride și Cu sau PEC.

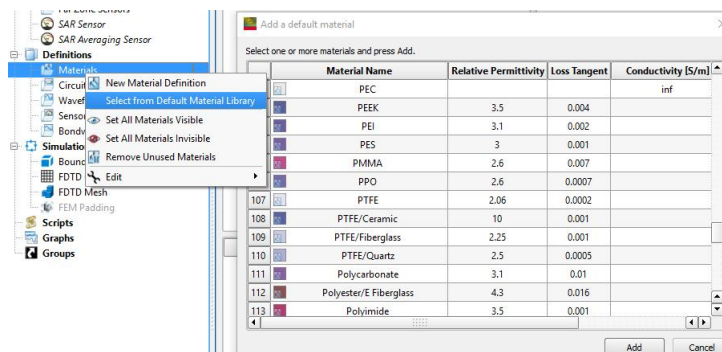


Fig. 4. Utilizare material standard

Definirea materialelor proprii tehnologiei este cel mai ușor de realizat prin utilizarea unui model echivalent pentru materialul definit (de ex. Cu pentru M2/M3 sau GaAs standard pentru GaAs/ Si_3N_4 /PI). Pentru metale definirea este de tip "Normal" (cu $\epsilon_r = 1$ și introducerea conductivității σ) iar pentru materialele dielectrice este esențial ca tipul să fie "Nondispersive" (proprietățile cât mai

constante cu frecvența) și definirea de tip "Loss tangent" cu specificarea tangentei unghiului de pierderi la 5GHz.

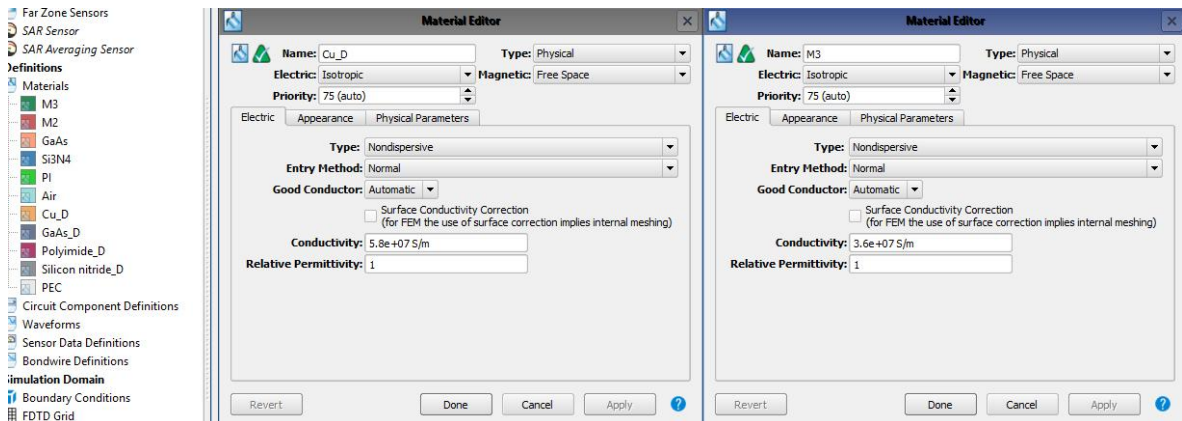


Fig. 5. Definire materiale Plessey utilizând model

Modelul utilizat în acest caz, intern, permite obținerea unor valori $\tan\delta$ și ϵ_r aproximativ constante cu frecvența așa cum se poate observa alegând: Click dreapta "pe material" > "Plot Broadband material properties" (Fig. 6).

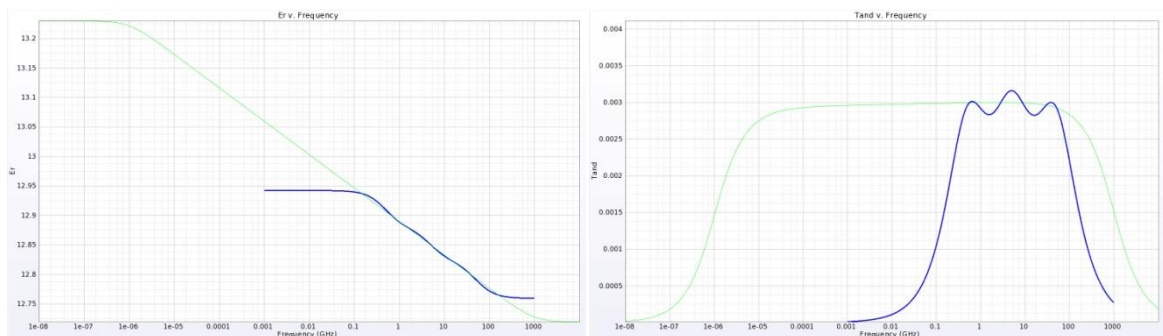


Fig. 6. Caracteristici materiale dielectrice

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 EmPro poate fi:

- Metal Ideal (2D, Sheet Body, PEC), pierderi nule, înălțime egală cu 0
- Modelarea pierderilor și a înălțimii liniei (3D, Box, Cu sau M2/M3),

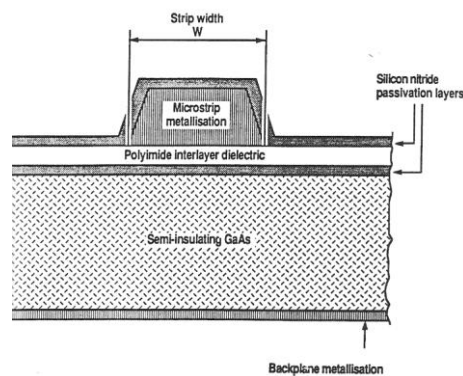


Fig. 7. Geometria reală în circuitul integrat

Pentru varianta mai rapidă (3 straturi: GaAs, Poliimidă, Aer) se introduc ca model paralelipiped (Box) straturile de dielectric conform valorilor din tabelul 3, după care se alocă materialele corespunzătoare (în funcție de punctajul dorit, materialele din biblioteca standard - fig. 4, sau cele definite anterior - fig. 5,6). Se lasă un spațiu suficient de mare în jurul componentei (egal cel puțin cu dimensiunea corespunzătoare a componentei) pentru a elimina influența pereților asupra rezultatelor. Urmează desenarea dreptunghiurilor (plane - Sheet Body) care realizează metalizările, inclusiv liniile de acces la armături/spire.

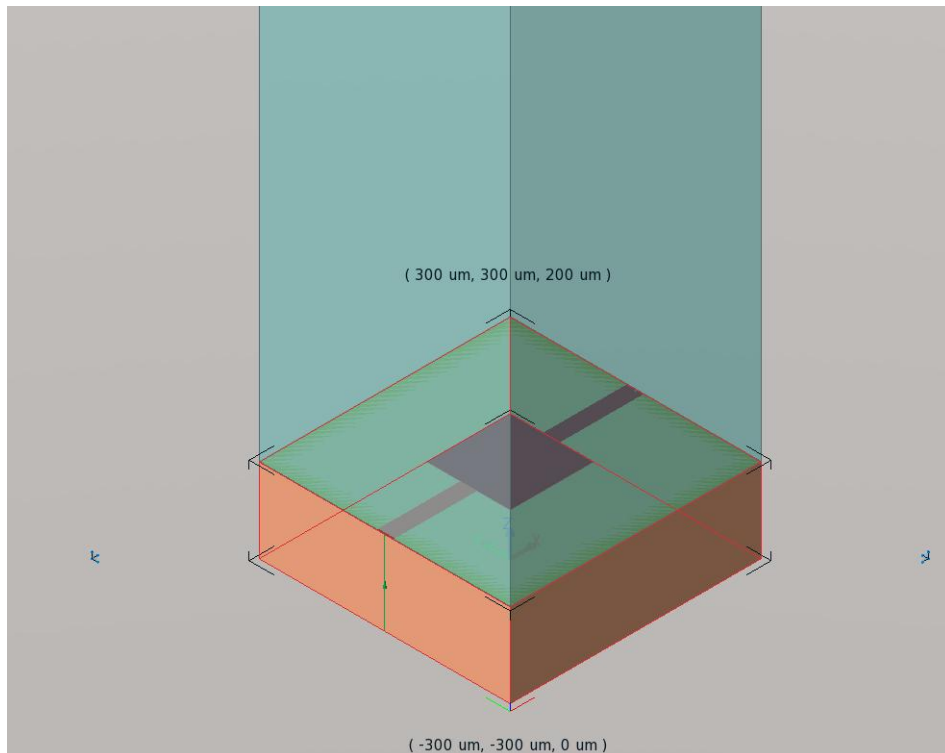


Fig. 8. Structură cu 3 straturi, metal ideal



Fig. 9. Structură cu 3 straturi, metal ideal (detaliu)

Pentru această modelare se poate folosi condiția la limită pentru $z=0$ pentru a modela planul de masă (de tip PEC) caz în care spațiul adăugat în partea de jos (Lower z) va fi egal cu 0 pentru a asigura faptul că planul de masă ajunge sub stratul de GaAs.

Pentru modelul cu punctaj mai ridicat (5 straturi, modelare metalizări 3D), mai asemănător structurii reale din fig. 7, se utilizează doar modelul de paralelipiped (Box) pentru introducerea straturilor de dielectric și pentru desenarea metalizărilor. Astfel vor apărea în ordine:

- un strat cu înălțimea de $10\mu\text{m}$ cu materialul M3 (planul de masă),
- un strat cu înălțimea $200\mu\text{m}$ (GaAs),
- primul strat cu înălțimea $0.13\mu\text{m}$ ($\text{Si}_3\text{N}_4 - 1$),
- un strat cu înălțimea $1.4\mu\text{m}$ (Poliimidă),
- al doilea strat cu înălțimea $0.13\mu\text{m}$ ($\text{Si}_3\text{N}_4 - 2$),
- ultimul strat, cu înălțimea $2000\mu\text{m}$ (Aer)

Considerând în continuare cazul condensatorului planar cu poliimidă (PI) de latură a armăturii L , se desenează metalizările M2, M3 (ca paralelipedele de laturi L și înălțimi de $0.5\mu\text{m}$ respectiv $3\mu\text{m}$, plasate central: x și y între $-L/2$ și $+L/2$). Liniile de acces la armături sunt de lățime $40\mu\text{m}$ și lungime egală cu spațiul lăsat până la marginea structurii (în principiu L). În acest moment există suprapunere între metalizarea M2 și paralelipedele SiN_1 , PI și între metalizarea M3 și paralelipedele SiN_2 și Aer.

Rămâne de modelat faptul că pasivizarea de Si_3N_4 înconjoară metalizarea (și M2 și M3 - fig. 5). Cea mai simplă metodă de desenare constă în a desena două paralelipede "temporare" cu material Si_3N_4 care să înconjoare paralelipedele metalizărilor, la o distanță de $0.13\mu\text{m}$ de acestea pe direcțiile laterale și în sus. De exemplu pentru armătura M2 se desenează un paralelipiped cu laturile $L + 2 \cdot 0.13\mu\text{m} = L + 0.26\mu\text{m}$ și de înălțime $0.63\mu\text{m} = 0.5\mu\text{m} + 0.13\mu\text{m}$ la același nivel după direcția z ca armătura M2. Similar pentru metalizarea M3 și pentru liniile de acces (liniile trebuie acoperite doar pe 3 suprafețe, deasupra și lateral, nu la capetele dinspre armătură și peretele structurii și nici dedesubt). Se introduce în acest fel o suprapunere suplimentară, dar în momentul în care se va "introduce" metalizarea în noile corpuri create se obține o formă foarte apropiată de fig. 7.

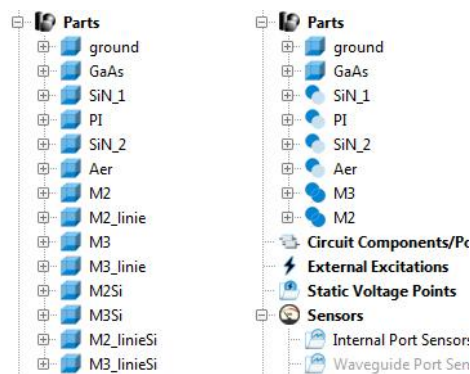


Fig. 10. Obiecte (inițial și final, după combinare)

Urmează un proces esențial, combinarea diverselor obiecte care să ducă la obținerea structurii dorite. Procesul combinării poate fi urmărit cel mai ușor în "Project Browser" (structura arborescentă din

partea stângă a interfeței), secțiunea "Parts" urmărind cum dispar/apar obiectele individuale și cum li se schimbă icoana asociată.

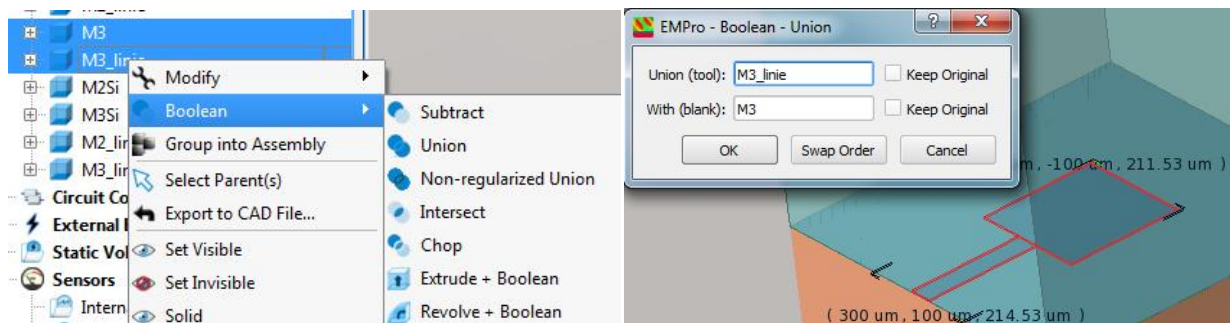


Fig. 11. Operații cu obiecte

Operațiunile de combinare a obiectelor se realizează selectând obiectele dorite din Project > Parts urmat de Right Click > Boolean > Operația dorită. Ca alternativă, după selecția obiectelor, fereastra de desenare "Geometry" are meniul "Boolean" care oferă acces la aceleași operații. La unele operații vom dori ca unul sau ambele din obiectele originale implicate să rămână în continuare în structură, caz în care vom selecta opțiunea "Keep Original" din dreptul obiectului respectiv. La unele operații (în special "Substract") ordinea obiectelor este importantă ca urmare se va apăsa butonul "Swap Order" pentru a obține ordinea corectă. Ordinea în care se realizează combinarea este (**trebuie** să fie) următoarea:

1. Unire ("Union") elemente de pasivizare Si_3N_4 de la nivelul M2, $\text{SiN}_1 + \text{M2Si} + \text{M2_LSi}$, fără "Keep original", se unesc toate obiectele de Si_3N_4 de la nivelul M2 într-un singur obiect
2. Unire ("Union") elemente de pasivizare Si_3N_4 de la nivelul M3, $\text{SiN}_2 + \text{M3Si} + \text{M3_LSi}$, fără "Keep original"
3. Unire ("Union") elemente metalice de la nivelul M2, $\text{M2} + \text{M2_L}$, fără "Keep original", se unesc toate obiectele de metalice de la nivelul M2 într-un singur obiect
4. Unire ("Union") elemente metalice de la nivelul M3, $\text{M3} + \text{M3_L}$, fără "Keep original"
5. Extragere ("Substract") element compus de pasivizare Si_3N_4 de la nivelul M3 **din** Aer, "Keep Original" selectat pentru SiN_2 (se realizează astfel o operație de "Introducere" SiN_2 în Aer cu decuparea acestuia nu doar o Extragere simplă), după operație rămâne obiectul Aer decupat pentru a face loc pentru SiN_2 dar și obiectul SiN_2 care ocupă exact locul creat
6. Extragere ("Substract") element compus de pasivizare Si_3N_4 de la nivelul M2 **din** poliimidă, "Keep Original" selectat pentru SiN_1 , obiectul SiN_1 va ocupa spațiul decupat din PI
7. Extragere ("Substract") element compus de metalizare M3 **din** elementul compus de pasivizare Si_3N_4 de la nivelul M3, "Keep Original" selectat pentru M3, obiectul M3 va ocupa spațiul decupat din SiN_2
8. Extragere ("Substract") element compus de metalizare M2 **din** elementul compus de pasivizare Si_3N_4 de la nivelul M2, "Keep Original" selectat pentru M2, obiectul M2 va ocupa spațiul decupat din SiN_1

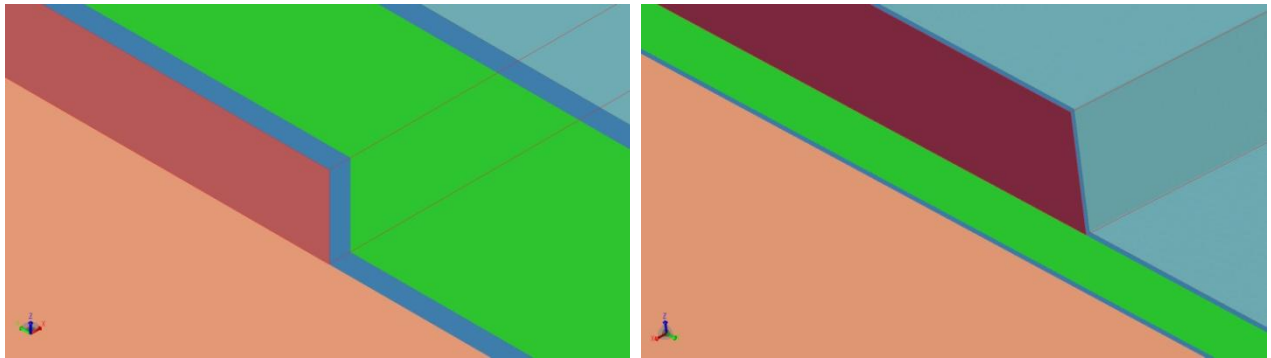




Fig. 12. Verificare structură la capete (linie de acces M2 sau M3)

Este recomandabil să se realizeze apoi verificarea corectitudinii operațiilor efectuate prin observarea detaliilor fizice ale structurii. Este relativ ușor de investigat zona în care structura desenată atinge marginile domeniului, de exemplu capetele liniilor de acces de pe nivelele M2 și M3 (fig. 12) prin deplasare, rotire și apropiere/depărtare ("Pan"/"Orbit"/"Zoom" ). Pentru a observa detalii din interiorul structurii este necesară activarea facilității de secționare ("Cutting Plane" ) urmat de deplasarea/rotirea planului de secționare pe o poziție convenabilă ("Edit Cutting Plane") - fig. 13.

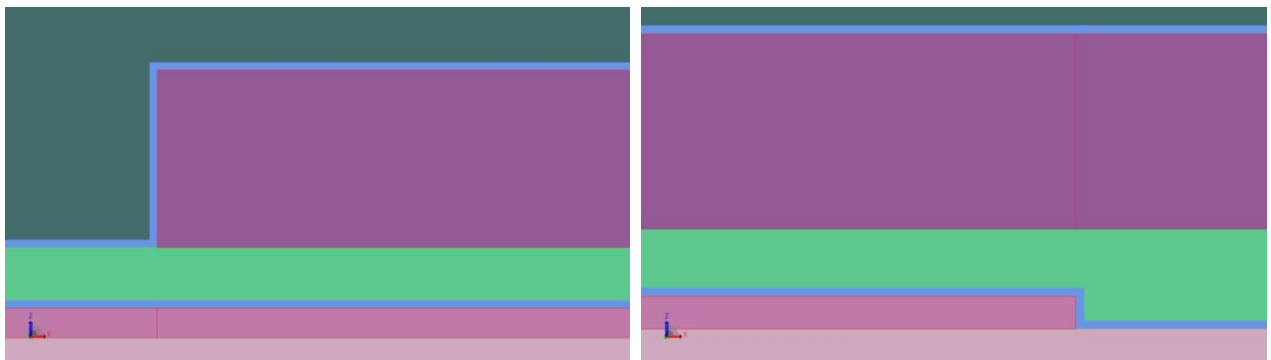


Fig. 13. Verificare structură în secțiune (armături M2 și M3)

Urmează (pași descriși în L2/2017 și L3/2017) introducerea porturilor, alegerea metodei de simulare și efectuarea efectivă a calculelor (FDTD și/sau FEM + analiză de convergență!)

Note

- E obligatorie creșterea incrementală a complexității modelului ales (nr. de straturi, model metal, dimensiune celule, eroare necesară pentru convergență), 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 (12/40 μ m) la linia utilizată în circuit, etc. (fig. 14,15).
- Dimensiunile celulelor standard sunt:
 - bobină: lățimea traseelor 12 μ m, spațiul între trasee 12 μ m, latura trecerilor 40 μ m, diametru trecere (via) M3-M2 circulară cu diametru 30 μ m, prima spiră din jurul trecerii are latura internă 76 μ m (fig. 15), 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 $40\mu\text{m}$ (fig. 14)
- 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). Ca urmare vor exista două bucle de verificare a convergenței:
 - o primă buclă care va verifica obținerea unor **simulări corecte**, realizată în EmPro direct fără suport al unor programe externe, implementată intern în ambele module de simulare FEM/FDTD.
 - o a doua buclă care va verifica faptul că s-a realizat secționarea suficient de precisă (în celule suficient de mici) a structurii pentru a obține **modelul de circuit corect** (care necesită determinarea C/L echivalente)

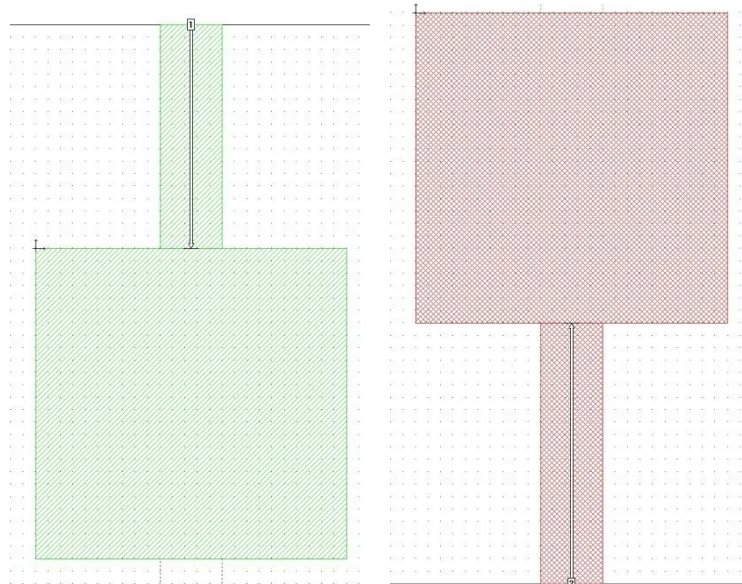


Fig. 14. Modelare condensator, plane de referință

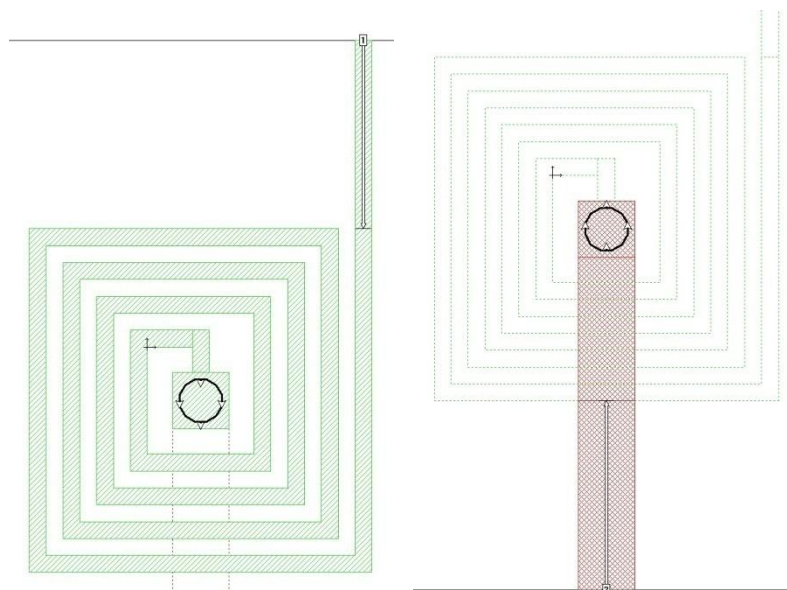
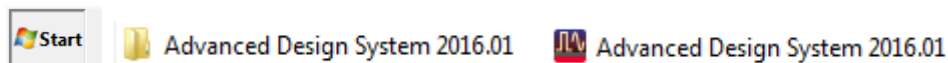


Fig. 15. Modelare bobină, plane de referință

Modelarea în simulatorul de circuit se realizează în ADS (Advanced Design System, versiunea 2016/2017). 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 EmPro
- variația valorilor elementelor din schema echivalentă în vederea suprapunerii în banda largă (1-20 GHz) a celor două rezultate
 - în cazul alegerii temeii cu bobină există o rezonanță a parametrului S_{21} la o frecvență în interiorul benzii tehnologice (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 produs de firma Keysight (companie separată din Hewlett Packard). Programul este instalat pe sistemul de operare Windows 7 64bit. Dacă doriți instalarea programului pe calculatorul personal, se urmează pașii descriși în fișierul "Indicatii instalare ADS si EmPro" de pe rf-opto.etti.tuiasi.ro (adresa server-ului de licență se poate obține prin email, versiunile active fiind 2016 sau 2017). Programul se pornește utilizând butonul de Start din Windows alegând succesiunea de comenzi **Start > Advanced Design System 2016.01 > Advanced Design System 2016.01**.



Fereastra principală a programului - **Advanced Design System (Main)** permite gestionarea proiectelor (creare, ștergere, arhivare – în scopul transportului unui proiect pe un alt calculator există implementată o metodă de arhivare format 7-zip, rezultând un fișier cu extensia "7zads" care va păstra structura internă de directoare a proiectului), accesul la fișierele individuale ale proiectului.

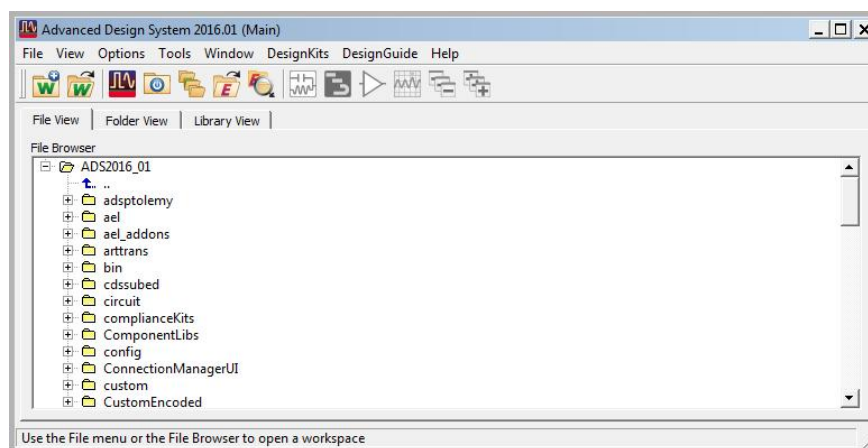






Fig. 16. Fereastra principală ADS

Fiecare proiect (**workspace**) va fi stocat/va consta într-un director propriu cu numele "nume ales" + "_wrk", implicit creat în directorul de instalare "C:\users\default\" dar calea poate fi modificată (și cea implicită, de instalare, și individual la crearea unui proiect nou). Fiecare proiect poate fi secționat după dorința în mai multe biblioteci (**library: File > New > Library**), măcar una, asociată proiectului, fiind creată inițial la crearea directorului "..._wrk". O bibliotecă va consta din diferite scheme care împart aceeași tehnologie de execuție, va reprezenta fizic un subdirector

"nume_biblioteca" + "_lib" în directorul proiectului și poate fi utilizată într-un alt proiect dacă este nevoie. O bibliotecă poate conține mai multe celule (**cells**). O celulă este echivalentă cu o schemă, este creată ca un subdirector "nume_celulă" în directorul bibliotecii părinte și poate conține mai multe vizualizări (**views**) ale aceleiași scheme. Vizualizările tipice includ: Schemă (**File > New > Schematic**), Layout (**File > New > Layout**) and Simbol echivalent (**File > New > Symbol**).

Pentru a asigura găsirea mai ușoară a fișierelor este recomandat să alegeți comanda **View > Startup Directory**  pentru a ajunge în directorul implicit urmată de comanda **File > New > Workspace**  pentru a crea un nou proiect. Crearea unui proiect constă din mai mulți pași ca în figurile următoare. La primul pas se poate introduce direct numele dorit pentru proiect (în acest caz terminația "_wrk" implicită este adăugată automat, se poate forța un nume de proiect fără "_wrk" dar nu este recomandat) și se alege directorul în care sa va salva proiectul (în discul D:\CIMM dacă în C: nu aveți drepturi de scriere). La prima creare de proiect puteți apăsa "Finish" după prima fereastră. Mai târziu, veți putea alege și un nume pentru bibliotecă, și o anume tehnologie dacă este nevoie.

Noul proiect și biblioteca implicită asociată sunt deschise automat. Se creează o primă schemă utilizând butonul  din bară sau comenzile **File > New > Schematic** din meniu. Alegeți un nume pentru celulă (vizualizarea implicită este **Schematic**). Salvați  schema. Dacă o veți închide din greșeală, o puteți deschide din fereastra principală, tab-ul "Folder View" sau "Library View".

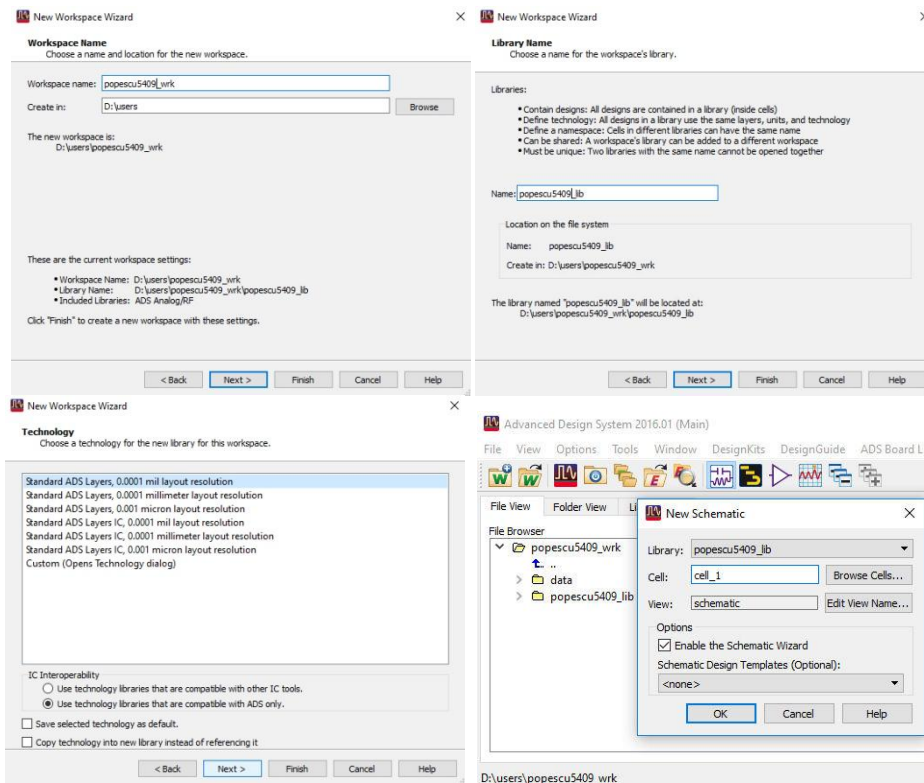


Fig. 17. Creare proiect nou în ADS

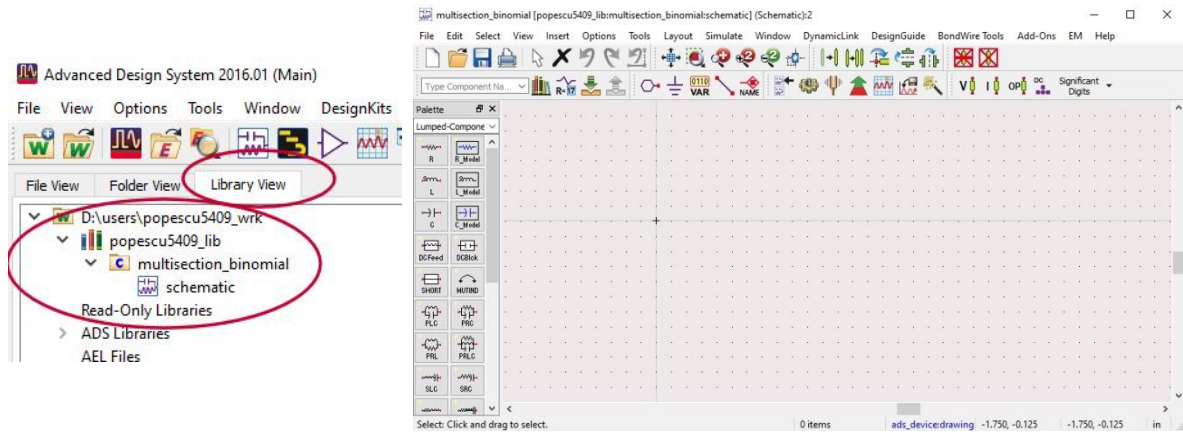


Fig. 18. Project Browser și scheme în ADS

Spre deosebire de EmPro, 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 - fig. 16, una sau mai multe scheme - fig. 18, simulatorul - fig. 24, programul de vizualizare a rezultatelor - fig. 25).

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. 19):

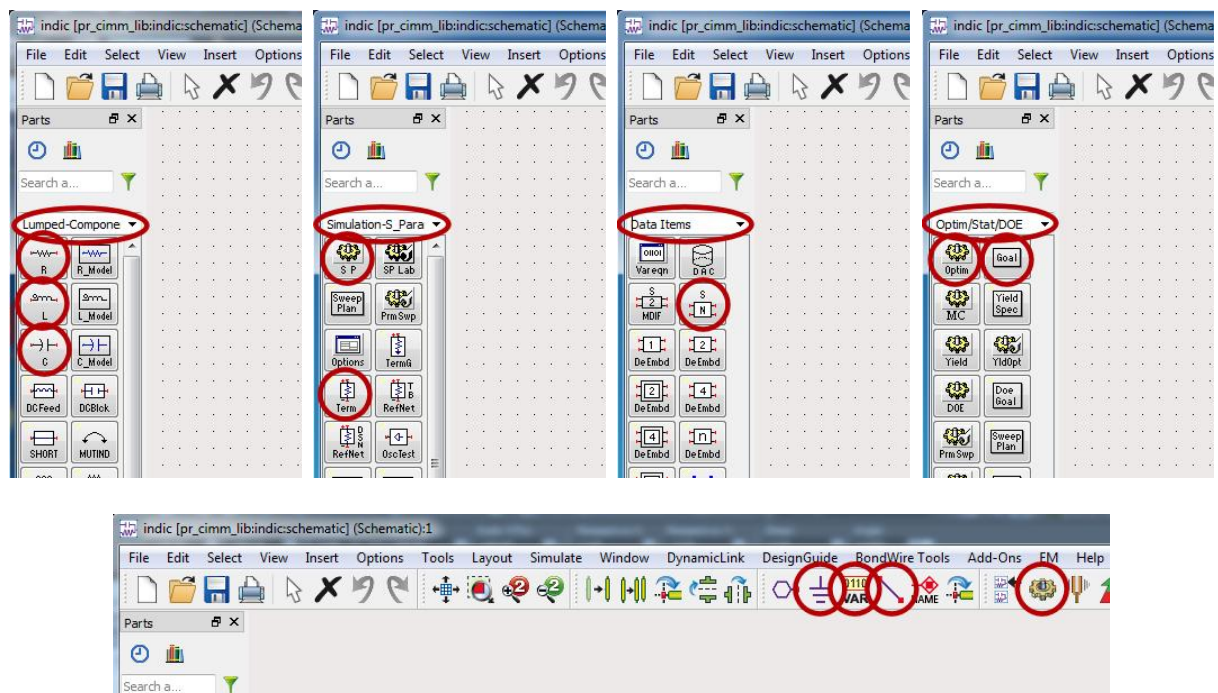


Fig. 19. Palete utilizate în realizarea schemei

- 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 EmPro (eventual)

- 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.)

Pentru introducerea rezultatelor simulărilor din EmPro există două posibilități. O primă variantă constă în salvarea din EmPro a parametrilor S rezultați ca fișier Touchstone. Pentru aceasta se afișează în EmPro fereastra "Results", în lista "Simulation" simularea care se dorește a fi exportată, în lista "Sensor" > "Circuit Results", în lista "Domain" > "All" sau "Frequency", în lista "Result Type" > "S-Parameters & Derived Results". În funcție de tipul de simulator apare în lista din partea de jos un rezultat "S-Parameters" pe care prin Right-Click se poate alege "Export > Export to Touchstone File". Deoarece componentele simulate au un comportament logaritmic în frecvență ($Z = j\omega \times L$ sau $Z = 1/j\omega/C$) e recomandabil să fie ales la export "Sampling Type" de tip logaritmic. În acest caz introducerea simulării în ADS se folosește paleta "Data Items", componenta corespunzătoare multiportului care permite deschiderea unui fișier extern în format Touchstone. Prin activarea ferestrei de proprietăți a multiportului (Dublu-Click) se poate seta numărul de porturi (2 în acest caz) operațiune care determină schimbarea simbolului din schemă astfel încât să corespundă numărului de porturi ales. Butonul Check/View S-Parameters pornește un instrument ajutător care permite inspectarea rapidă a fișierului cu parametri S încărcat (Browse).

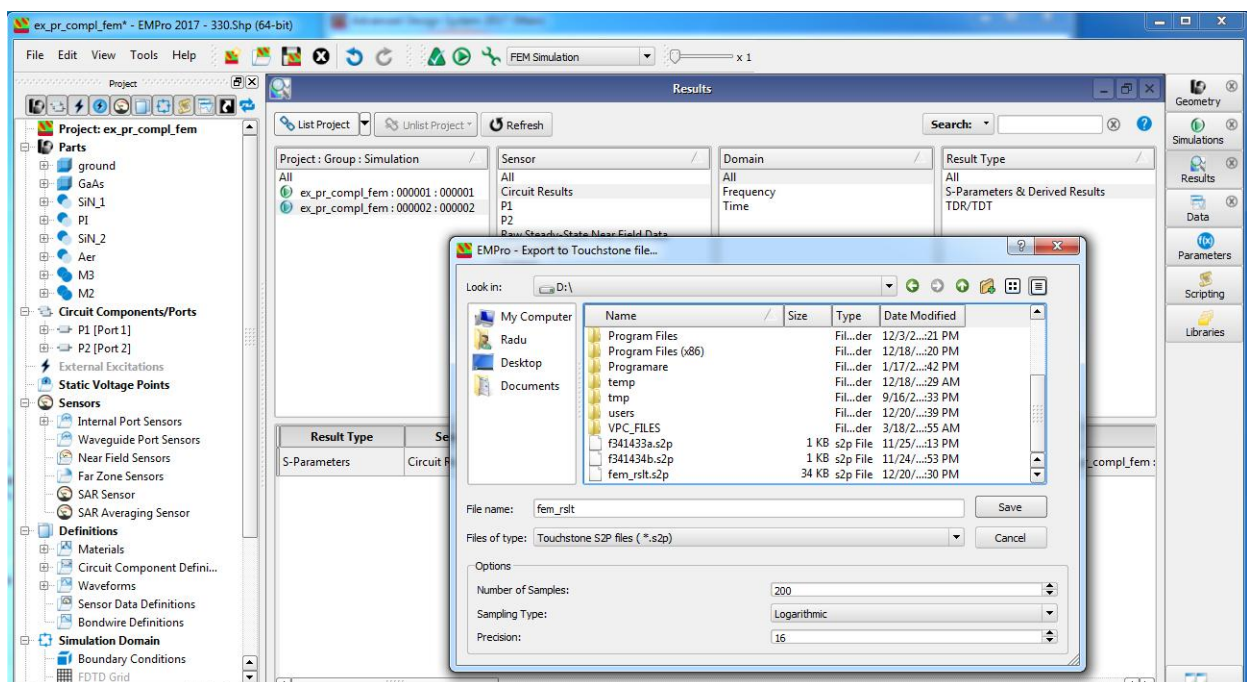


Fig. 20. Export fișier cu parametri S în EmPro

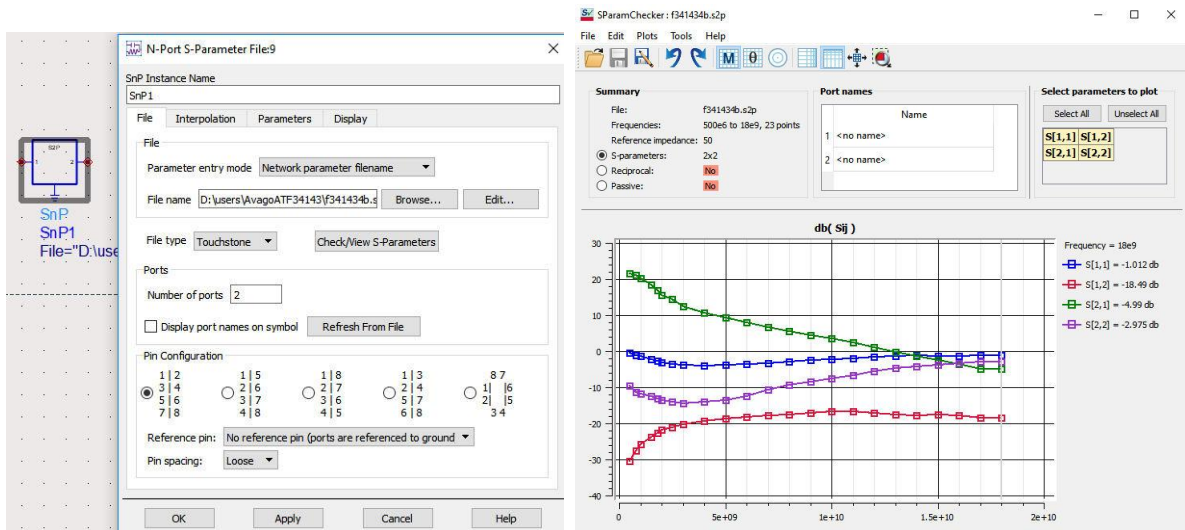


Fig. 21. Utilizare fișier cu parametri S în ADS

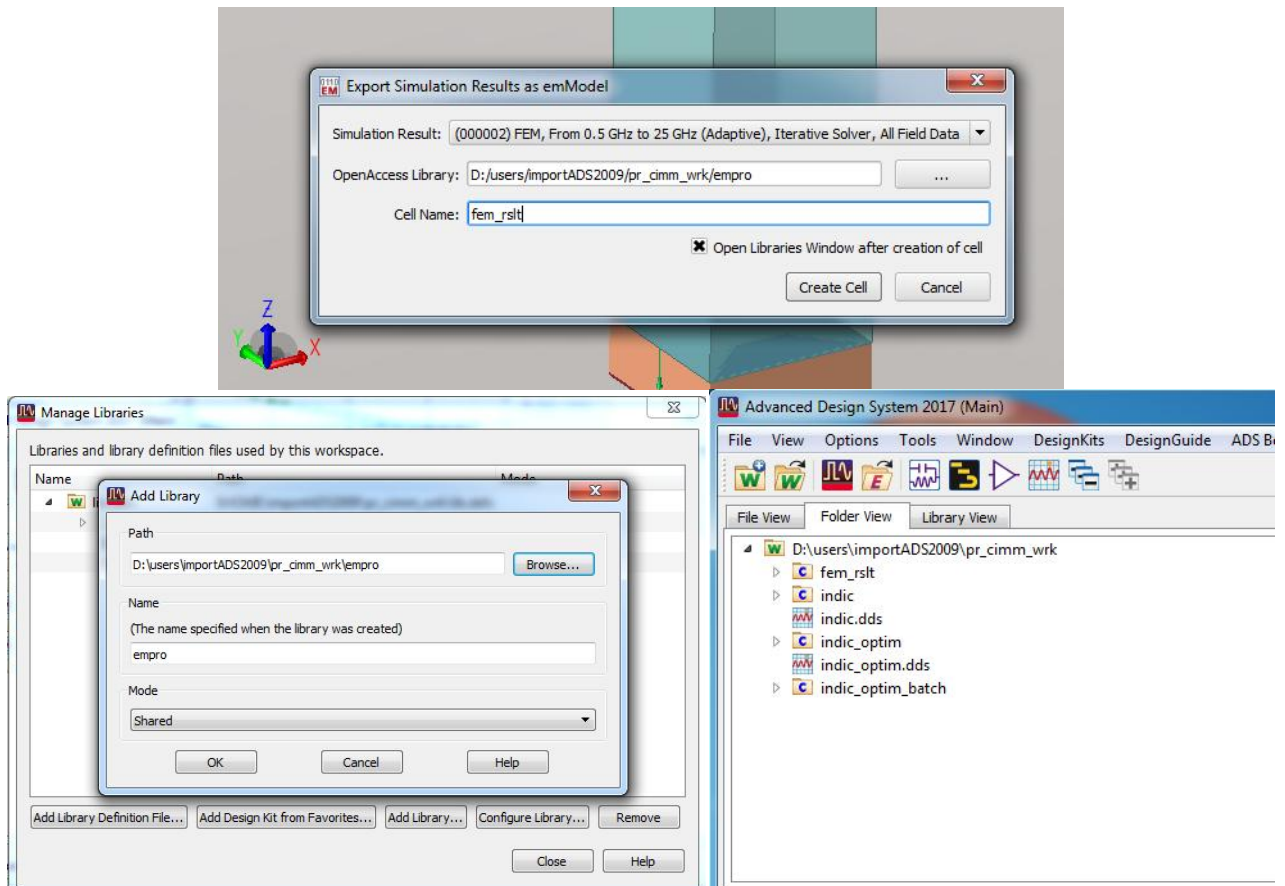


Fig. 22. Export (EmPro) și utilizare (ADS) a rezultatelor emModel

O a doua variantă constă în utilizarea comunicării native între cele două programe (create de același producător - Keysight) prin selectarea din meniul EmPro **File > Export > Simulation Results as emModel**. Se alege simularea dorită din listă și un nume (eventual schimbat la o denumire mai sugestivă), realizându-se în acest mod salvarea datelor ca bibliotecă standard ADS. În fereastra principală din ADS unde este deschis proiectul se alege din meniu **File > Manage Libraries > Add Library (Yes)**. Se verifică selecția corectă prin faptul că după alegerea directorului corespunzător în zona "Name" apare denumirea aceluși director (ADS detectează că acel director conține o bibliotecă

standard). În caz de succes va apărea o celulă cu numele ales în EmPro la export (de exemplu "fem_rslt" în figura 22).

Se introduce schema (din fig. 23) prezentată la curs, valorile inițiale fiind obținute cu ajutorul relațiilor de la curs (schema și valorile **sunt** diferite în funcție de tema aleasă). Modelul emModel se introduce prin Drag'n'Drop pe schemă de la celula corespunzătoare modelului importat (fem_rslt în exemplu), vizualizarea "Symbol".

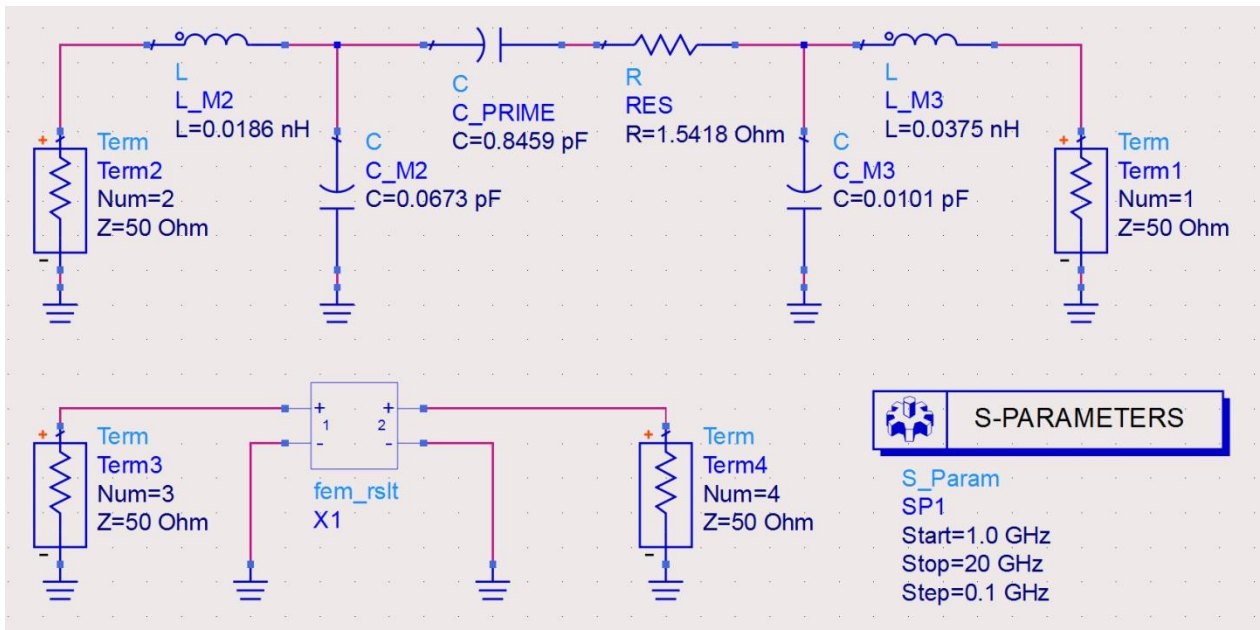



Fig. 23. Verificarea schemei echivalente pentru comparația cu rezultatul analizei electromagnetice

Nota1: Are importanță poziționarea corectă a porturilor astfel încât să corespundă cu notația porturilor în EmPro, mai ales la schemele asimetrice (bobină și condensator PI). De exemplu în EmPro portul 1 este pe nivelul de metalizare M3 iar portul 2 este pe nivelul M2 ca urmare în figura 23 în ADS portul 1 (elementul Term cu "Num = 1") este conectat în poziția corespunzătoare din schemă (similar și portul 2).

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 în ADS:  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. 24) 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 apelați la ajutorul cadrului didactic.

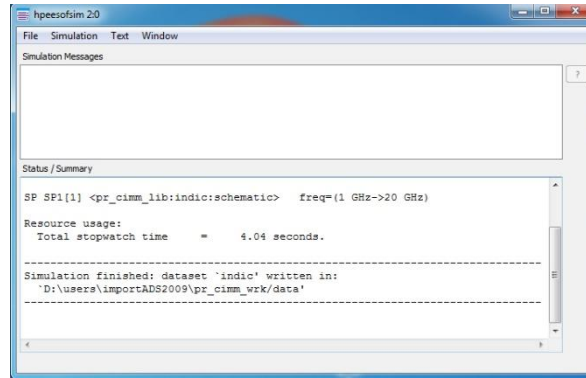


Fig. 24. Simulatorul ADS

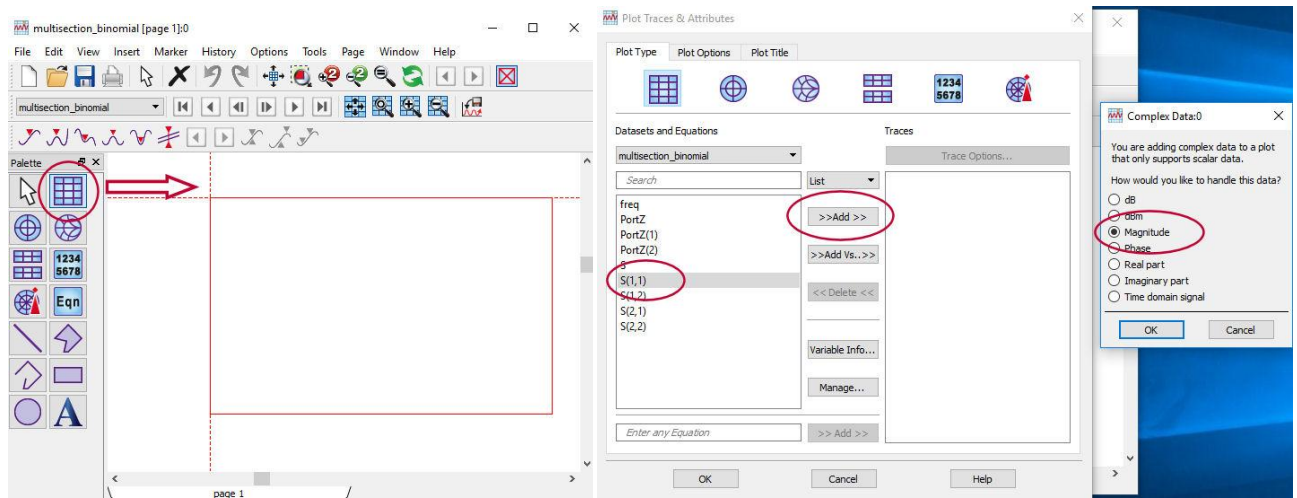
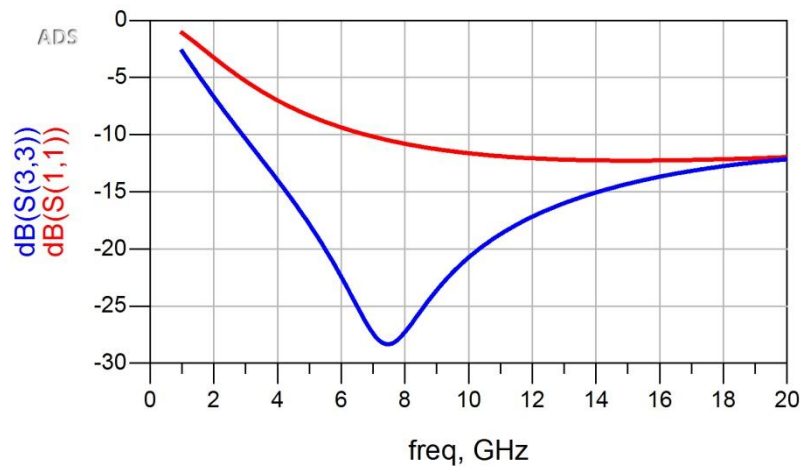


Fig. 25. Programul de vizualizare ADS

După terminarea **cu succes (!)** a analizei se va deschide fereastra de vizualizare a rezultatelor (fig. 25). Vă interesează să reprezentați parametrii S pentru rezultatele din EmPro 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 modelul emModel importat) 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. 26).



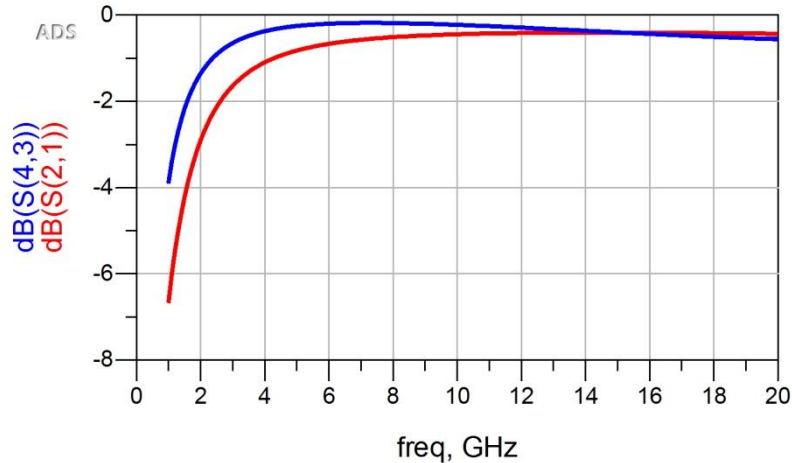


Fig. 26. Compararea simulării de circuit cu simularea electromagnetică pentru condensator PI

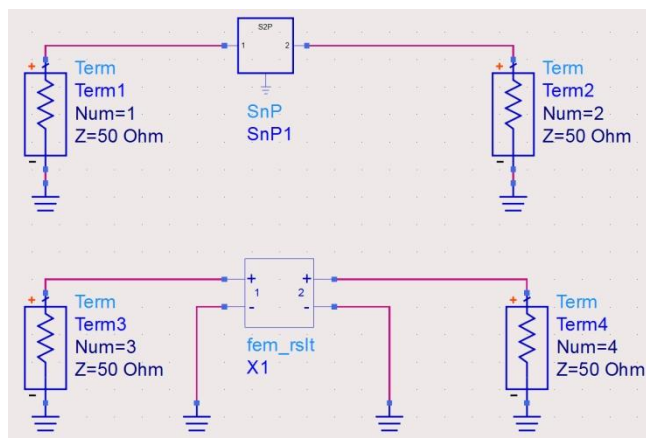


Fig. 27. Compararea emModel/șișier cu parametri S

Se menționează în acest moment că utilizarea fișierului cu parametri S oferă exact aceleași valori. Comparația între cele două metode de a introduce datele din EmPro (fig. 27) oferă exact aceleași rezultate (în graficele din fig. 28 se introduce forțat o diferență de 1dB/0.1dB pentru a putea vizualiza ambele rezultate, în caz contrar graficele se suprapun exact).

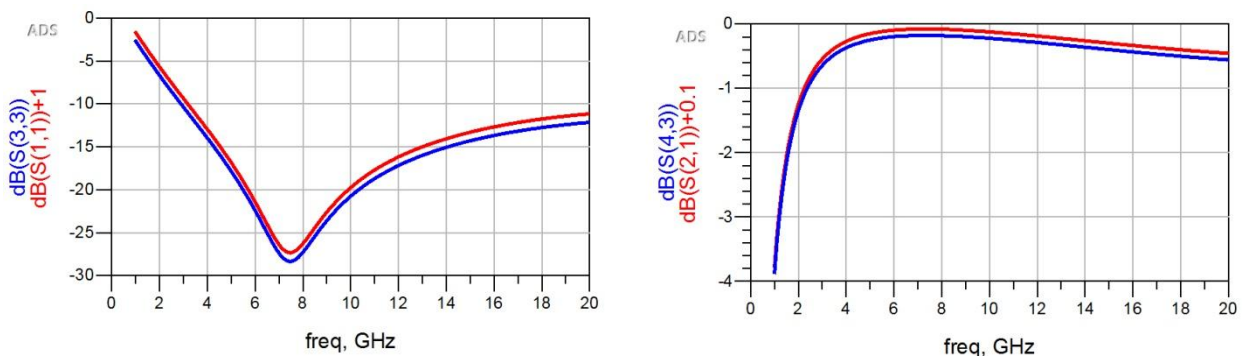


Fig. 28. Compararea emModel/șișier s2p (deplasare forțată a graficelor pentru vizualizare)

Scopul analizei va fi determinarea valorilor de componente care să conducă la suprapunerea cât mai exactă a graficelor pentru model și pentru simularea electromagnetică. Această metodă de generare a modelelor poate fi la modul general aplicată și dacă setul de referință este obținut în urma măsurătorilor 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")

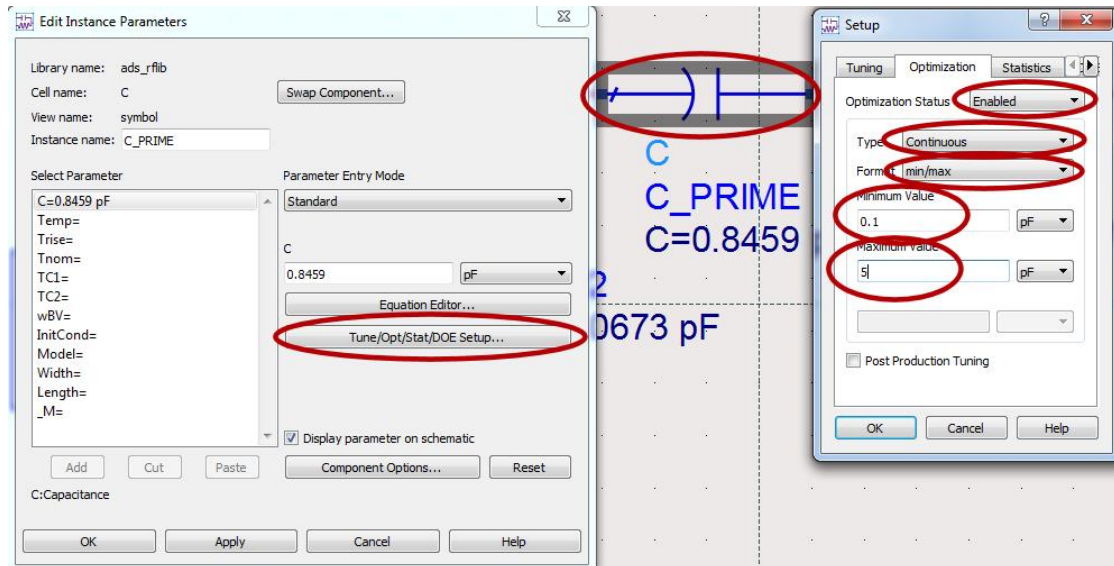


Fig. 29. Definirea variabilelor și a intervalului de variație ADS > 2003

Pentru a indica ce elemente trebuie modificate, se accesează interfața proprie fiecărui element (RLC - fig. 29 - butonul "Tune/Opt/...") și apoi interfața de optimizare (tab "Optimization"), 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. 29) 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).

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. 30)

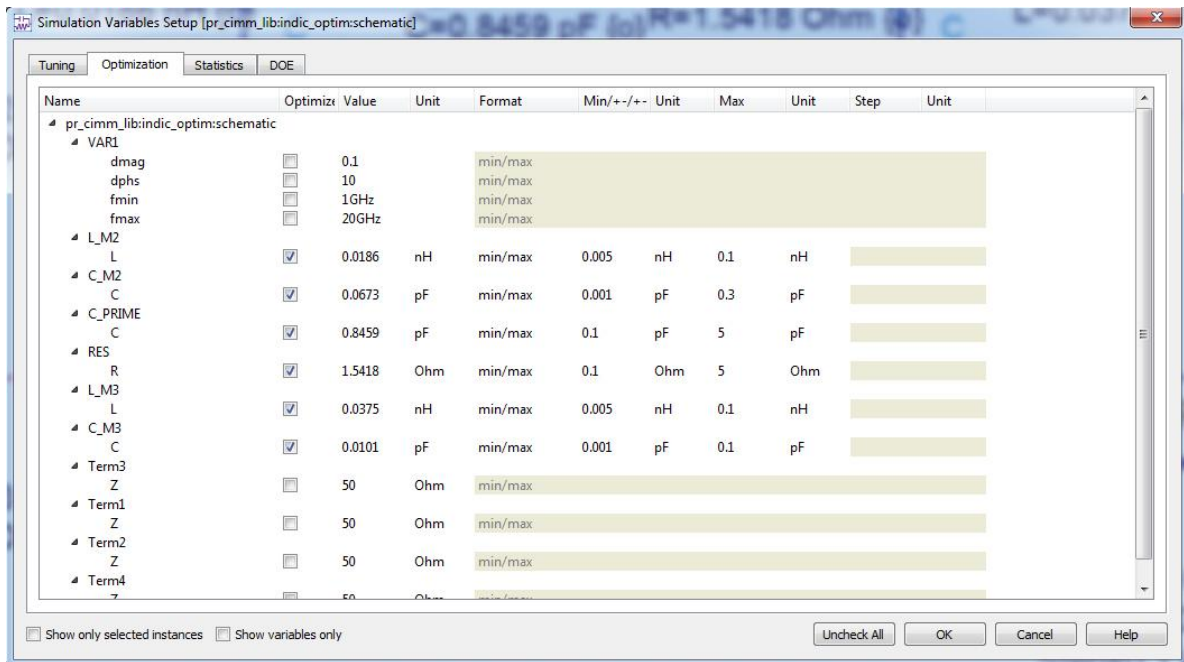


Fig. 30. Definirea variabilelor și a intervalului de variație ADS > 2009

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 {o}). Din paleta Optim/Stat/Yield/DOE (fig. 19) se introduce controler-ul de simulare corespunzător (OPTIM), care, împreună cu indicarea obiectivelor (GOAL) procesului de optimizare, va completa schema utilizată în procesul de optimizare (fig. 31).

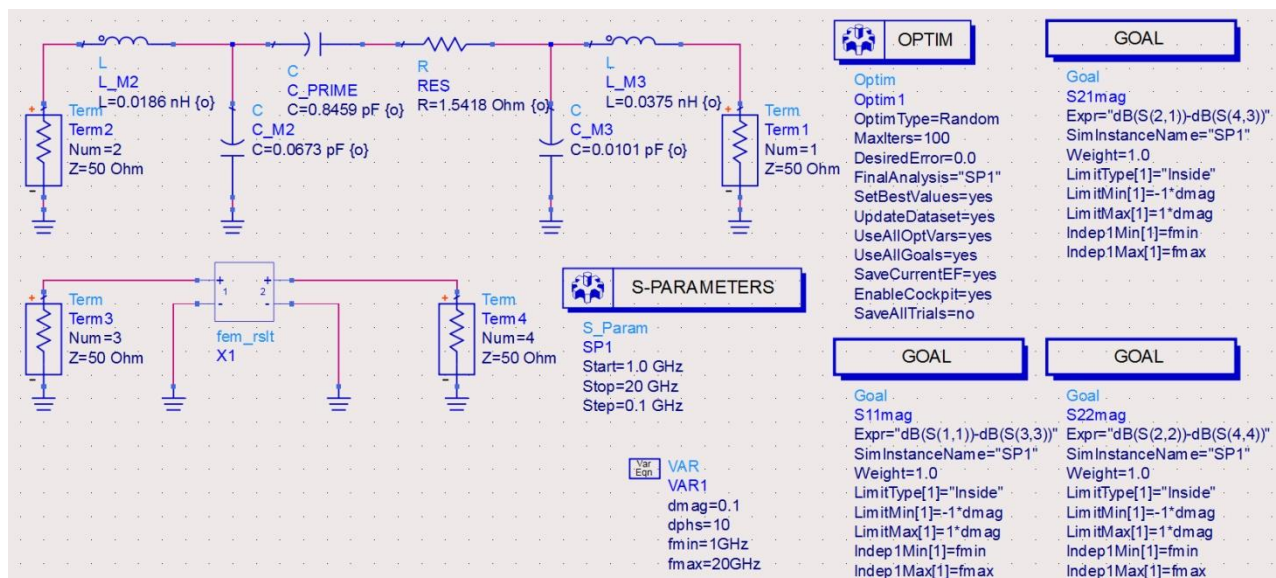


Fig. 31. Introducerea procedurii de optimizare

Pentru controler-ul de optimizare trebuie indicate (fig. 32) 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.

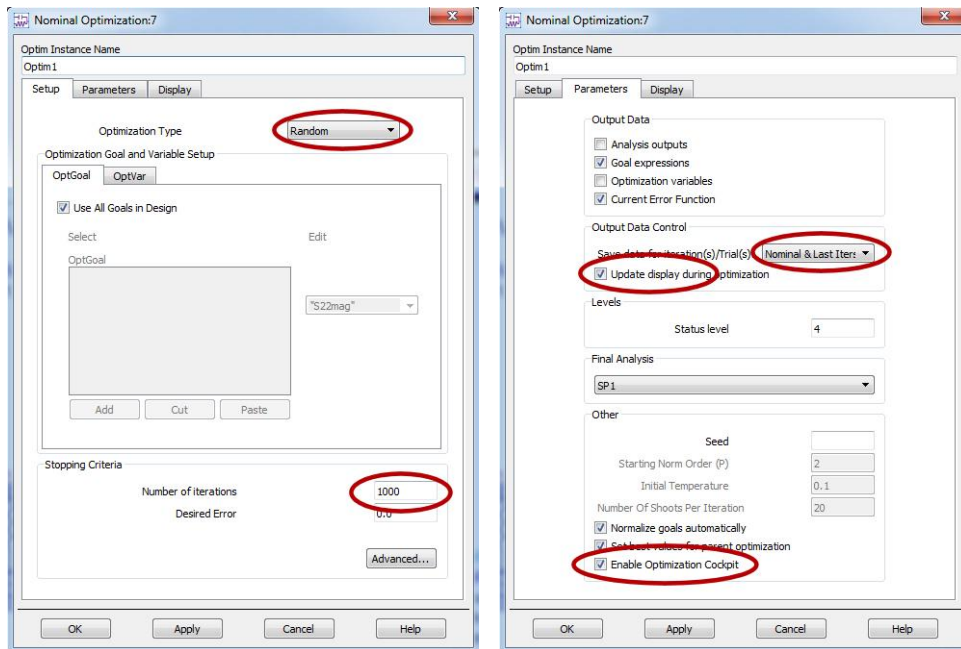


Fig. 32. Controlul procedurii de optimizare

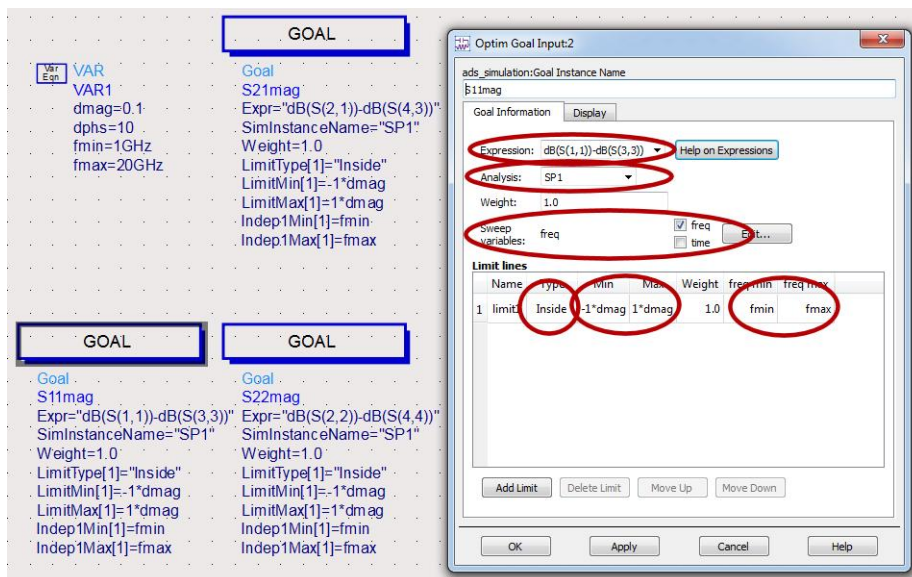



Fig. 33. Controlul obiectivelor

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. 19). Elementul "Goal" (fig. 33) e caracterizat de o expresie matematică "Expression" și una sau mai multe limite (<, >, =, Inside, Outside) care trebuie îndeplinite când variabila independentă "Sweep variable" (tipic această variabila este frecvența - "freq") variază între

valorile "freq min" și "freq max". Pot fi mai multe variabile independente dacă problema de rezolvat o necesită. Orice element obiectiv și orice limită au o pondere asociată "Weight" care poate fi utilizată pentru a forța algoritmul să urmărească preferențial îndeplinirea în special a anumitor obiective (de exemplu, în cazul de față mărimea de interes, capacitatea, se găsește între porturile 1 și 2 ca urmare $|S_{21}|$ ar putea primi o pondere mai mare, de exemplu 100 - ținând cont și de faptul că valorile numerice pentru S_{21} sunt mai mici - fig. 28).

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 elementele obiectiv "Goal" care folosesc aceste variabile. Soluția de optimizare obținută este dependentă de cerințele impuse și poate apărea necesitatea de a forța intervale diferite de variație a mărimilor independente, sau cerințe diferite relativ la abateri.

Pentru realizarea optimizării comanda este în meniu **Simulate > Optimize** sau utilizând butonul  din bară. În funcție de opțiunea "Enable Optimization Cockpit" (fig. 32) se realizează procesul numai în simulator (fig. 24) sau folosind utilitarul "Optimization Cockpit" (fig. 34), varianta din urmă fiind recomandată pentru ADS 2016/2017 deoarece oferă posibilitatea vizualizării convergenței sau nu spre o soluție, oferă un punct centralizat din care se pot schimba toate obiectivele, metodele de optimizare, se pot adăuga pași etc.

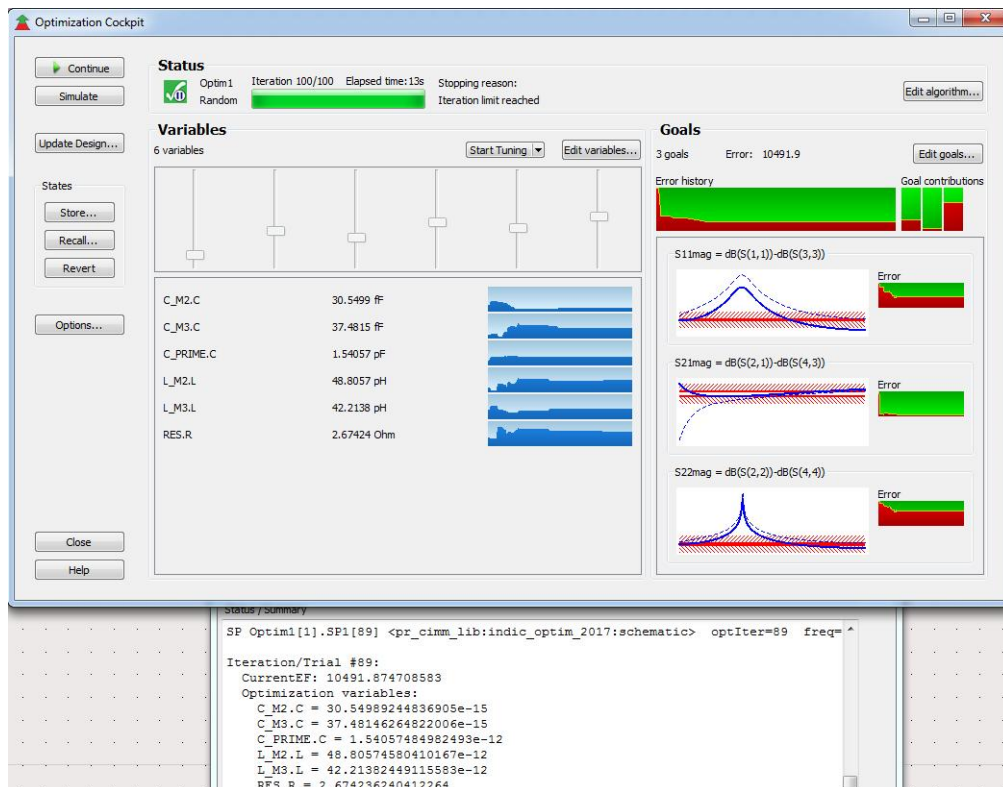
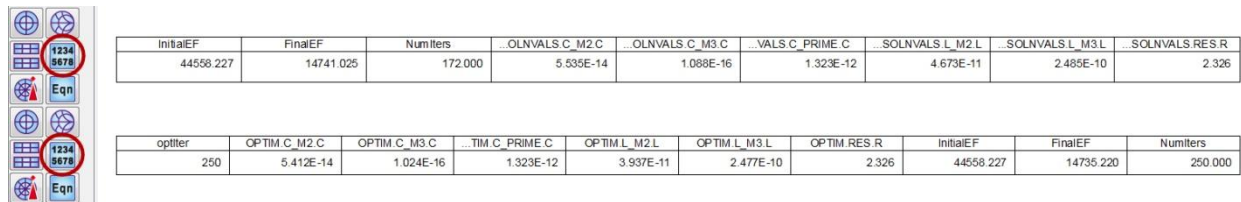


Fig. 34. Utilitarul "Optimization Cockpit"

Valorile obținute în urma procesului de optimizare pot fi afișate (varianta recomandată este sub formă tabelară - fig. 35, anumite soluții sunt disponibile în timpul procesului de optimizare, de exemplu OPTSOLNVARs, altele numai după finalizarea algoritmului de optimizare - OPTIM) 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). Dacă se folosește utilitarul "Optimization Cockpit" se poate folosi butonul "Update design" sau la închiderea utilitarului se oferă opțiunea salvării valorilor în schemă.



InitialEF	FinalEF	Numiters	..OLNVALS C_M2 C	..OLNVALS C_M3 C	..VALS C_PRIME C	..SOLNVALS L_M2 L	..SOLNVALS L_M3 L	..SOLNVALS RES R
44558.227	14741.025	172.000	5.535E-14	1.088E-16	1.323E-12	4.673E-11	2.485E-10	2.326

optiter	OPTIM_C_M2 C	OPTIM_C_M3 C	..TIM_C_PRIME C	OPTIM_L_M2 L	OPTIM_L_M3 L	OPTIM_RES R	InitialEF	FinalEF	Numiters
250	5.412E-14	1.024E-16	1.323E-12	3.937E-11	2.477E-10	2.326	44558.227	14735.220	250.000

Fig. 35. Valorile "în curs de optimizare"/"optimizate" din schema echivalentă pentru condensator PI

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 procedul 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. 32). 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.

Se realizează procedura de optimizare. În exemplul următor se utilizează metoda "Random" cu 100 de iterații, urmată de "Gradient" cu 150 iterații (metodele de gradient depind de un punct de pornire aflat în apropierea soluției pentru a găsi minimul local al funcției, punct de pornire obținut prin metode aleatorii). Obiectivele sunt realizate pentru o abatere țintă a parametrilor S de 0.01dB ($d_{mag} = 0.01$ în blocul VAR). Datorită valorilor numerice mai mici și mai ales a prezenței componente țintă (condensator PI) **între** cele două porturi, obiectivul corespunzător lui S_{21} va primi o pondere egală cu 10 și o abatere țintă mai mică ($0.1 * d_{mag}$). Valorile optimizate se preiau în schemă obținându-se astfel modelul de circuit (fig. 36) care corespunde cel mai bine rezultatelor simulărilor (sau ale măsurătorilor, procedura de obținere a modelului echivalent este aceeași dacă se realizează măsurători de componente).

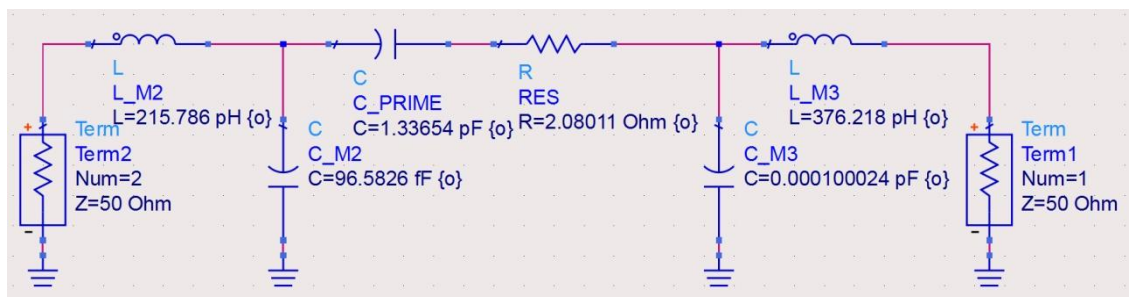


Fig. 36. Modelul final pentru condensatorul PI

Fie prin realizarea unei analize de parametri S finale ("Final Analysis" - fig. 32) fie prin preluarea în schemă a valorilor optimizate și realizarea manuală a unei analize de parametri S cu modelul echivalent al componente simulate/măsurate, se poate verifica potrivirea între seturile de parametri S obținute pentru model și cele obținute prin simulare/măsurători (fig. 37).

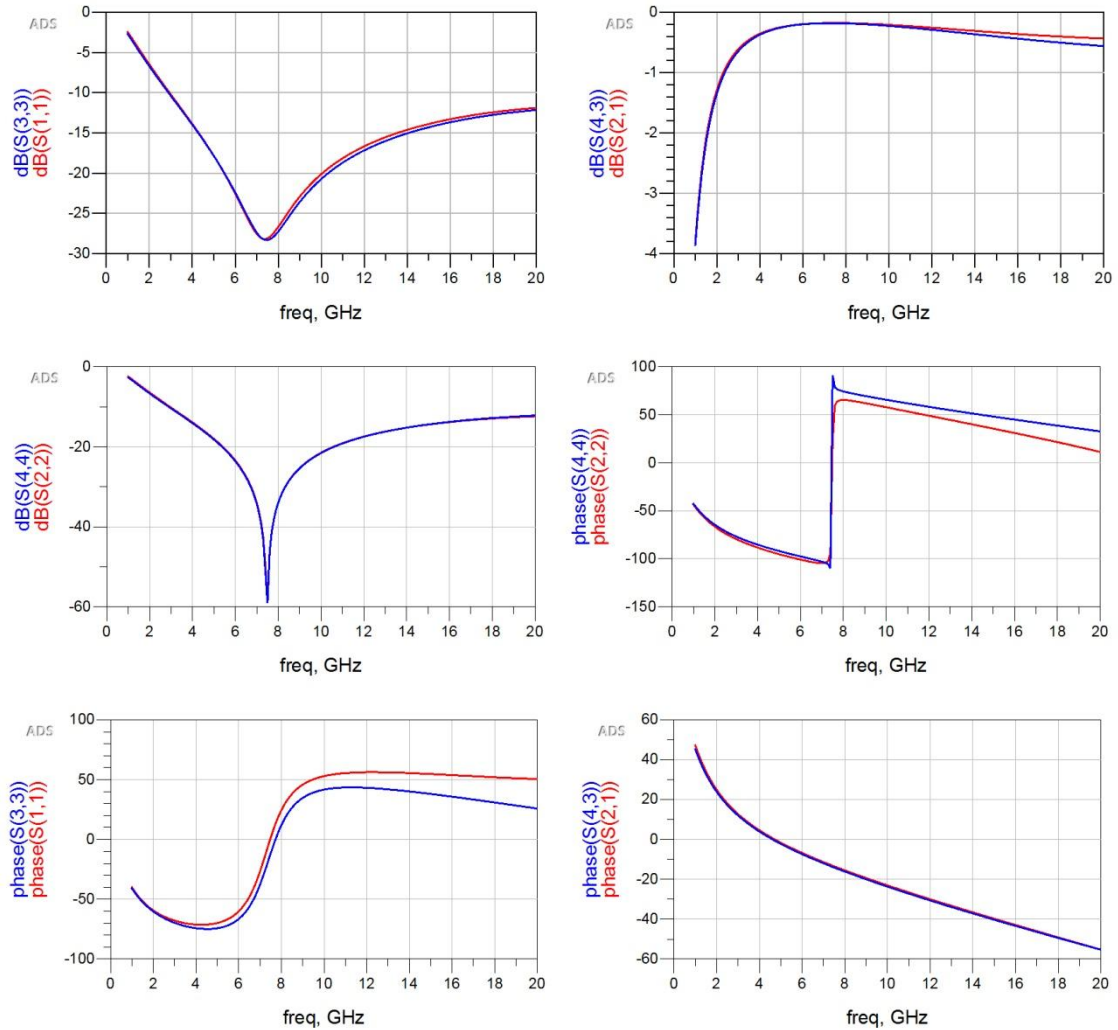


Fig. 37. Rezultatele optimizării pentru condensatorul PI

Fiind vorba de numere complexe, coincidența trebuie verificată și la nivelul argumentului parametrilor. Dacă se observă o diferență semnificativă la nivelul argumentelor este necesară o repetare a procedurii de optimizare, cu adăugarea unor obiective care să impună abateri maxime la nivelul argumentelor, de exemplu în schema din fig. 31 ar fi necesară utilizarea unor elemente "Goal" care să aibă expresia de forma: $-1 * dphs < phase(S(2,1)) - phase(S(4,3)) < 1 * dphs$ cu parametrul dphs în blocul VAR cu valori de ordinul unități sau zecimi (corespunzător unor abateri dorite de ordinul 1 grad, zecimi de grad).

O ultimă procedură care poate fi efectuată constă în eliminarea din rezultat a liniilor de acces la armături, procedeu numit decapsulare ("de-embed" în engleză). În momentul de față structura simulată conține efectul celor două linii de lățime 40μm de acces la armături. Aceste linii nu pot fi eliminate din structura simulată deoarece ele **întotdeauna** vor exista în practică, ca urmare cuplajul între aceste linii, și între fiecare linie și armături este un fenomen pe care ne dorim să îl modelăm prin schema echivalentă.

Realizarea decapsulării poate fi realizată în două moduri:

- în simulatorul electromagnetic, prin specificarea planelor de referință astfel încât să se elimine efectul liniilor (fig. 14-15)
- în simulatorul de circuit prin introducerea liniilor în model

În simulatorul electromagnetic EmPro procedura de specificare a planelor de referință există doar pentru metoda FEM de simulare, prin utilizarea porturilor de tip ghid de undă (fig. 38a.). "Waveguide Port" are în tab-ul "Properties" opțiunea "Reference Offset" cu care se poate specifica poziția planului de referință. Pentru FDTD (și pentru FEM) se pot utiliza porturile standard ("Feed") dar pot fi amplasate la nivelul armaturilor (fig. 38b), astfel liniile vor exista și vor fi simulate dar parametrii S vor fi corespunzători doar componente simulate.

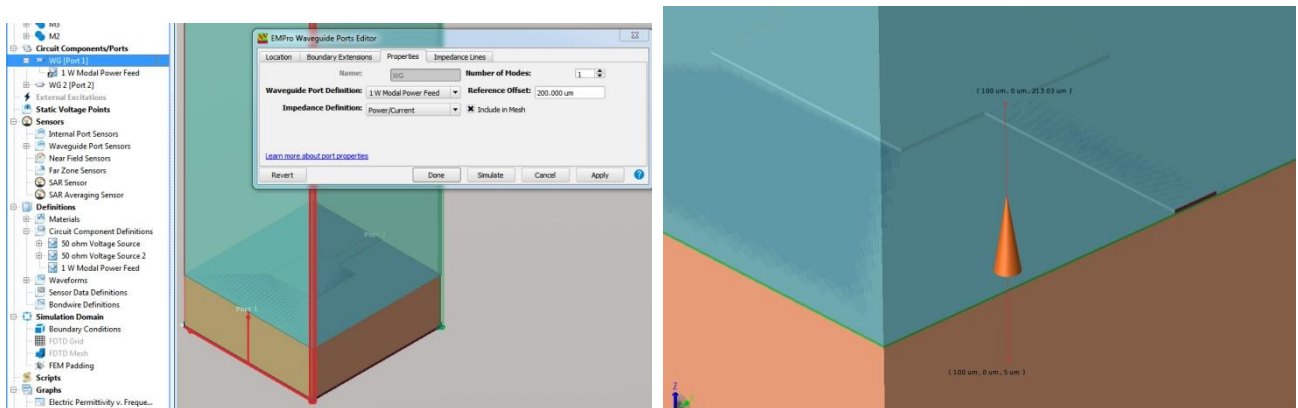


Fig. 38. Realizare decapsulare în EmPro

Introducerea liniilor în simulatorul de circuit se poate baza pe folosirea utilitarului "Linecalc" **Tools > Linecalc > Start Linecalc** (fig. 39) și obținerea unor modele echivalente pentru linii, care să se introducă în schema echivalentă (fig. 40). Pentru liniile cu lățimea de $40\mu\text{m}$ și lungimea corespunzătoare se obține (cu relațiile/graficele din curs sau cu Linecalc) o impedanță caracteristică de aproximativ 80Ω și o lungime electrică de aproximativ 7° la 10GHz.

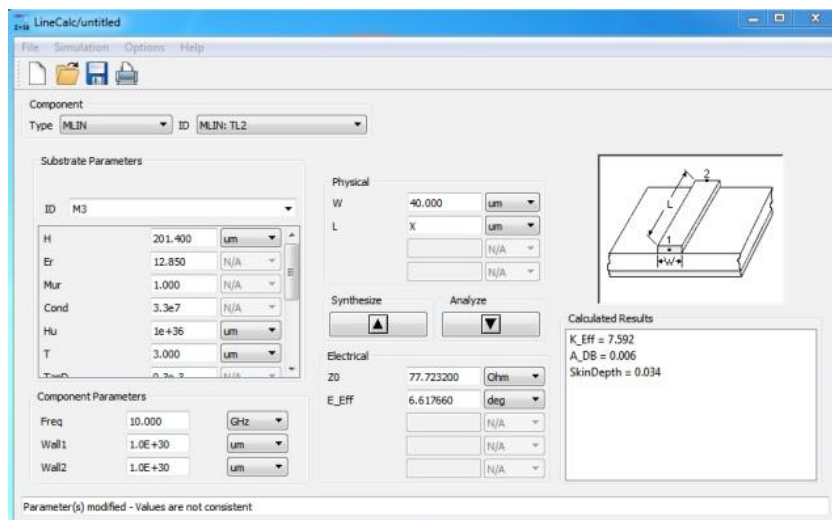


Fig. 39. Utilitarul "Linecalc"

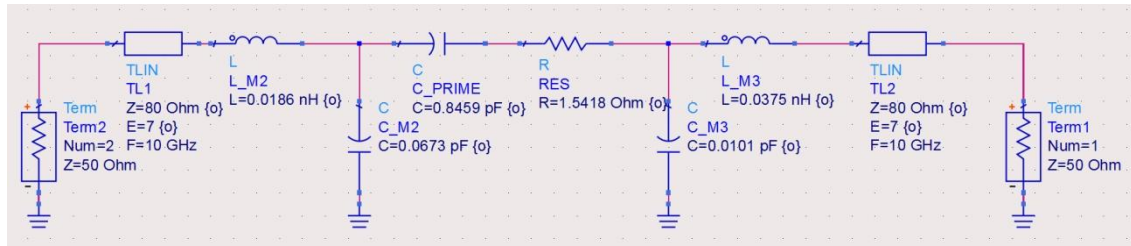


Fig. 40. Realizare decapsulare în ADS, linii ideale

Dezavantajul utilizării liniilor ideale este că trebuie introduse în procesul de optimizare (ceea ce va duce la variația parametrilor de lungime/lățime, lucru care nu se întâmplă în practică). De asemenea liniile ideale nu modelează dispersia liniilor microstrip, dispersie care își face simțită prezența în special la frecvențe înalte, exact unde suprapunerea parametrilor din fig. 37 oferă mici diferențe. Se preferă ca urmare utilizarea modelului de linie microstrip (fig. 41).

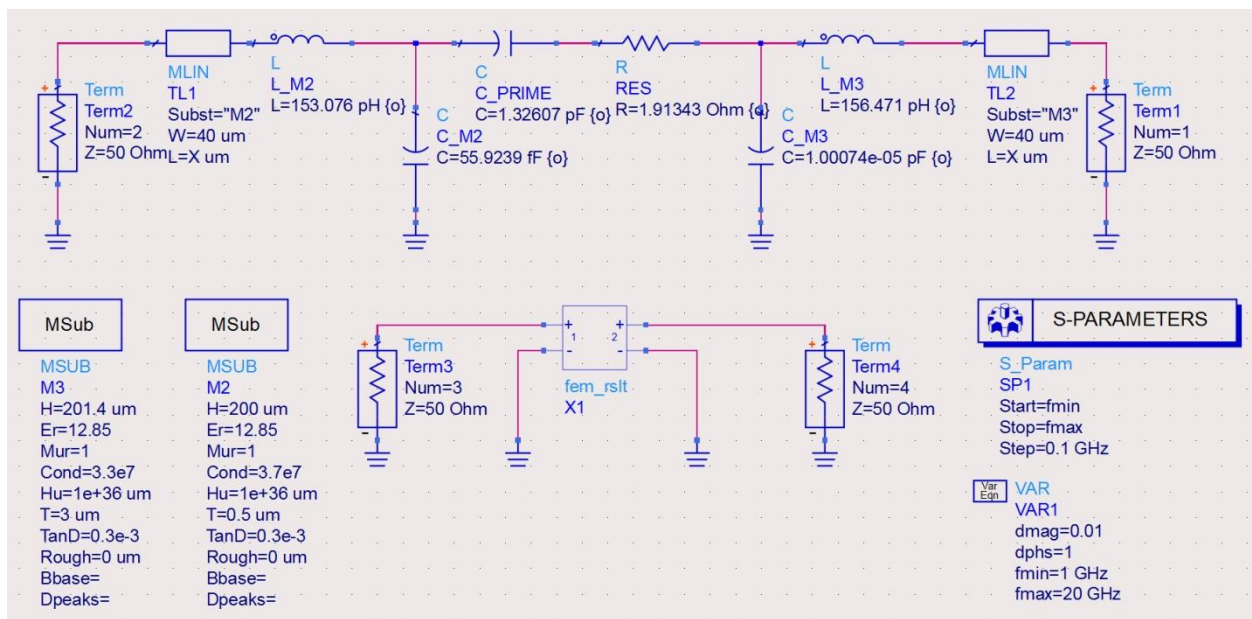


Fig. 41. Realizare decapsulare în ADS, linii microstrip

Comparând rezultatele obținute prin optimizare (fig. 42) cu cele fără decapsulare (fig. 37) se poate observa o modelare mai bună la frecvențe înalte, mai ales în cazul obținerii defazajului introdus de circuit. La nivelul elementelor de circuit, efectul eliminării liniilor sunt vizibile mai ales în ceea ce privește valorile inductanțelor serie L_{M2} și L_{M3} care sunt reduse în schema obținută prin decapsulare ceea ce era de așteptat, dimensiunile tipice ale liniilor (sute de μm) reprezentând lungimi electrice mici, de ordinul gradelor în tot intervalul de frecvență analizat.

Schema din figura 41 oferă valorile componentelor din schema echivalentă a structurii analizate, după recuperarea ("Update Optimization Values") valorilor din algoritmul de optimizare.

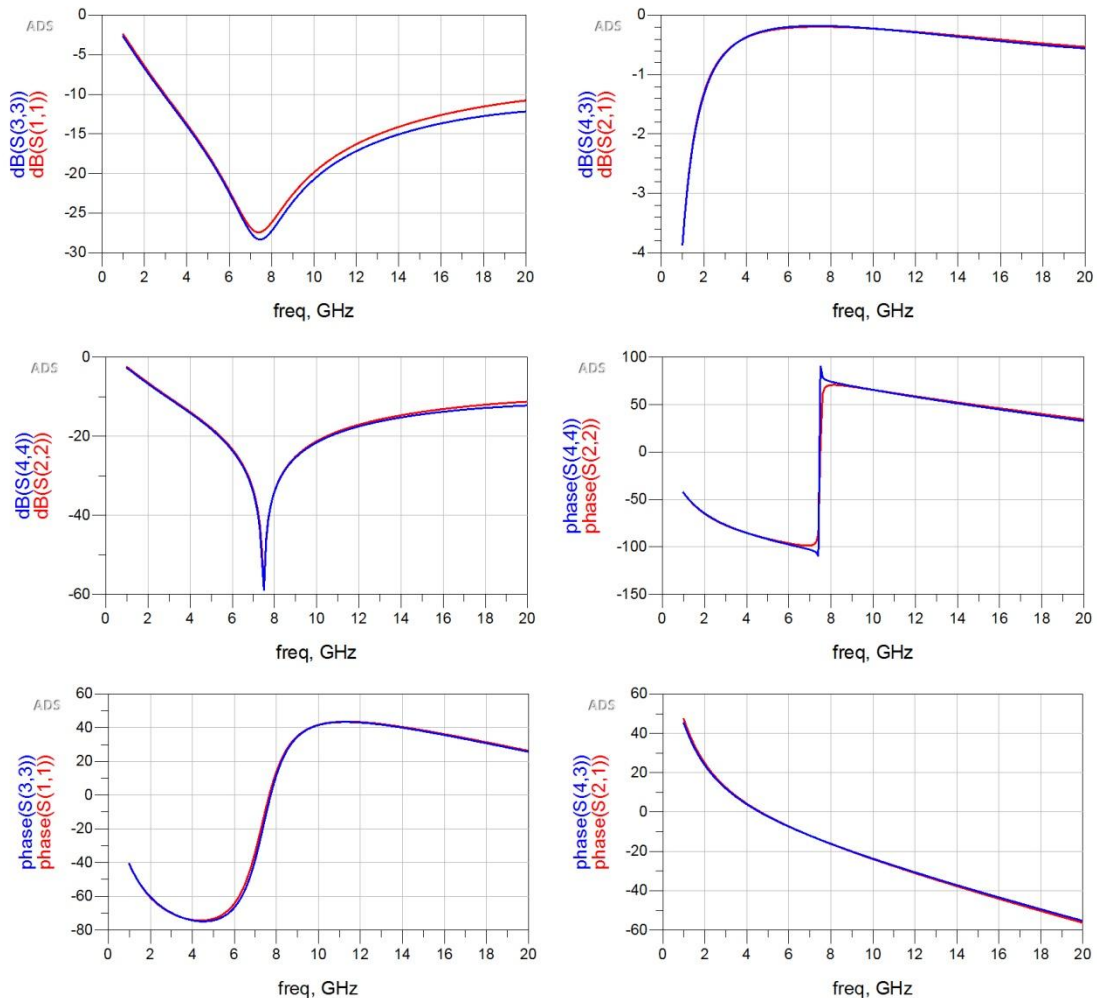


Fig. 42. Rezultatele optimizării cu decapsulare pentru condensatorul PI

Note finale

- Ambele programe au nativ facilitatea de arhivare a proiectului **File > Archive Project/Workspace**. Arhivele EmPro trebuie realizate cu opțiunea păstrării rezultatelor ("Archive simulation results") și pot atinge dimensiuni destul de mari, pentru trimitere pe email fiind nevoie de obicei de apelarea la un serviciu extern de transfer fișiere (transfer.ro, wetransfer.com sau echivalent)
- Termenul limită pentru predarea proiectului este ultima zi din semestru (13.01.2018). În cazul în care e posibilă extinderea acestui termen până la data examenului, acest lucru va fi anunțat prin email
- Obținerea unor rezultate valide în FDTD necesită celule de dimensiuni mici pe verticală **în zona** (și **numai** în această zonă) straturilor de dielectric dintre cele două nivele de metalizare. Această secționare generează o convergență mai dificilă, necesitând un număr mai mare de pași pentru a obține convergența (**Setup FDTD Simulation > Specify Termination Criteria > Maximum Simulation Time** >> 50,000 * timestep)
- Utilizarea GPU cu tehnologie CUDA pentru FDTD poate aduce viteză semnificativ mai mare de calcul (o placă video "Gaming" medie poate crește viteza de ~10 ori)

- EmPro are implementată nativ o facilitate de rulare automată, succesivă, a mai multor simulări. Acest lucru oferă posibilitatea de a folosi timpul în care calculatorul simulează un o versiune a proiectului pentru a modifica setările de convergență/secționare și a adăuga o nouă simulare la lista de execuții ("Create & Queue Simulation"). Este recomandabil să se folosească această facilitate **numai după** ce s-a verificat rapid pe o versiune mai puțin "fină" a simulării că structura este corect introdusă și se obțin rezultate corecte dpdv fizic (corespunzătoare tipului de componentă simulată). O astfel de procedură e utilă pentru parcurgere pașilor necesari (minim 3) pentru investigarea convergenței în EmPro
- Se reamintește că descrierea procedurii de convergență poate fi făcută numai într-un document suplimentar, proiectele EmPro/ADS nefiind suficiente. Un exemplu de prezentare justificare a convergenței în EmPro și ADS este cel din figura 43. Detalii suplimentare pe rf-opto.etti.tuiasi.ro > CIMM > secțiunea "Ani anteriori" > Proiect CIMM 2016 (alt soft utilizat dar principiul este similar)
- Condiția **minimă** pentru obținerea notei 5 este ca dimensiunile structurii simulate în EmPro și valorile inițiale din schema ADS să corespundă temei individuale a fiecărui student (fiecare temă are **alte dimensiuni fizice** pentru componente)

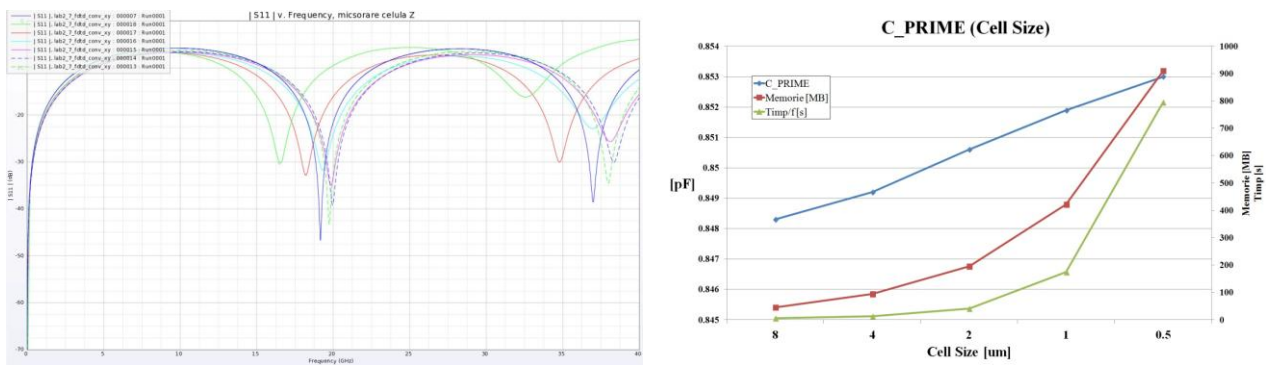


Fig. 43. Exemplu de prezentare a analizei de convergență în EmPro / ADS