

Evoluția simulatoarelor de circuit din familia SPICE

Programul SPICE – în diferitele sale versiuni – a fost și continuă să rămână principalul program de analiză asistată de calculator utilizat în proiectarea circuitelor electronice. În cele ce urmează se prezintă evoluția programului SPICE, începând de la stadiul de proiect de la sfârșitul anilor '60 și până astăzi.

SPICE este rezultatul activității unui grup de cercetători de la Departamentul de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor de la Universitatea Berkeley din California care, sub îndrumarea a doi renumiți profesori, D. Pederson și R. Rhorer, au avut sarcina de a realiza cel mai bun program pentru simularea circuitelor integrate (CI) reale.

Programul cunoscut astăzi ca SPICE a apărut pentru prima dată în anul 1970, sub numele CANCER (Computer Analysis of Nonlinear Circuits, **E**xcluding **R**adiation), dobândind numele de SPICE1 în 1972. În 1975 apare SPICE2, care cunoaște astăzi, sub diversele sale versiuni, cea mai largă utilizare în lume. Acceptarea universală a acestui program a fost determinată nu numai de robustețea și ușurința utilizării, ci și de faptul că el a fost distribuit gratuit de către Universitatea Berkeley. Este important de subliniat faptul că anii de început ai dezvoltării SPICE au fost dedicați investigării celor mai eficiente și precise metode numerice pentru descrierea circuitelor, a limbajului de intrare, a metodelor de rezolvare a ecuațiilor neliniare, a algoritmilor de integrare, a metodelor de rezolvare bazate pe utilizarea matricilor rare și de modelarea neliniară a dispozitivelor semiconductoare.

Obiectivul principal al proiectului SPICE a fost să asigure un instrument software eficient pentru simularea și proiectarea CI, care începeau să se dezvolte spre sfârșitul anilor '60 și începutul anilor '70. Alegerea descrierii prin intermediul admitanțelor la noduri a fost determinată de ușurința relativă cu care se putea scrie matricea circuitului și de rapiditatea cu care se poate calcula soluția circuitului (punctul static de funcționare). Determinarea punctului static de funcționare și realizarea analizei de semnal mic constituie etape esențiale în proiectarea unui CI liniar, cum este de exemplu amplificatorul operațional $\mu A741$.

Proiectul de realizare a programului de simulare CANCER la UC Berkeley a fost precedat de o serie de programe înrudite. Astfel, primul program dezvoltat a fost BIAS-3 care realiza analiza neliniară de c.c. a circuitelor cu tranzistoare bipolare; ulterior el a fost inclus în programul SLIC pentru a realiza analiza de c.c. a circuitelor bipolare liniare. Necesitatea simulării în domeniul timp în condiții de semnal mare, a unor circuite puternic neliniare – cum ar fi, de exemplu, oscilatoarele – a încurajat cercetarea metodelor de integrare numerică și a condus la dezvoltarea programelor TRAC (1968) la firma Autonetics – Rockwell Corporation și CIRPAC (1969) la Bell Labs. Dezvoltarea algoritmilor utilizați în programul TRAC a condus la realizarea programelor TIME (1971) și SINC la Motorola, respectiv UC Berkeley. Aceste dezvoltări au continuat în cursul anilor '70, rezultând programele MSINC la Stanford și MTIME la Motorola.

Cercetările referitoare la algoritmi, realizate în decursul dezvoltării acestor programe, au condus la utilizarea metodei Newton-Raphson pentru rezolvarea ecuațiilor neliniare, a tehnicilor de limitare, a schemelor implicite de integrare numerică folosind pași constanți de timp și a tehnicilor de reordonare pentru matrici rare.

Interesul pentru proiectarea de CI liniare bipolare explică prioritatea acordată implementării modelelor de diode, dispozitive bipolare și tranzistoare. Astfel, în programul

CANCER (1971) a fost implementat pentru tranzistorul bipolar modelul Ebers-Moll descris de 18 parametri. Mărimea circuitului era limitată la 400 de componente, având cel mult 100 de tranzistoare și diode și cel mult 100 noduri. Datele de intrare ale circuitului (*circuit decks*) erau introduse prin intermediul cartelelor perforate, iar programul a fost rulat inițial pe o mașină CDC6400.

La începutul anilor '70 la UC Berkeley s-a continuat dezvoltarea unui program de simulare de tip CANCER. Noua versiune rezultată a fost denumită SPICE – **S**imulation **P**rogram for **I**ntegrated **C**ircuit **E**mphasis (program de simulare destinat simulării circuitelor integrate). În luna mai 1972 a fost distribuit pentru prima dată în domeniul public SPICE1 (autori Nagel și Pederson).

Cea mai importantă completare a acestui program a avut loc în domeniul modelelor utilizate pentru dispozitivele semiconductoare. Astfel, în SPICE1 a fost introdus modelul cu control prin sarcină al tranzistorului bipolar, elaborat de H. Gummel și C. Poon în 1970. Acest model include efecte de ordinul doi, cum ar fi cele determinate de injecția la nivel mare și de recombinarea la nivel mic, reprezentând un progres major față de modelul Ebers-Moll. În SPICE1 au mai fost introduse modele și pentru tranzistoarele cu efect de câmp, atât cu grilă-joncțiune (TECJ), cât și metal-oxid-semiconductor (TECMOS). În această primă implementare, cele două modele erau foarte asemănătoare și se bazau pe modelul pătratic de prim ordin al lui H. Shichman și D. Hodges (1968).

În această perioadă a apărut o nouă abordare a modelării CI, cunoscută sub numele de macromodelare, care urmărea rezolvarea problemei duratei mari de simulare, determinată de utilizarea pentru circuit a schemei detaliate la nivel de tranzistor. Primele macromodele au fost elaborate pentru amplificatoare operaționale, prin înlocuirea unor grupuri de tranzistoare cu surse comandate, echivalente funcțional, care se simulează însă mult mai rapid. În prezent, macromodelele constituie metoda principală de reprezentare în SPICE a unei mari varietăți de CI complexe.

Următoarea versiune importantă a programului, SPICE2, a apărut în 1975 oferind îmbunătățiri semnificative față de SPICE1. Astfel, vechea analiză nodală (bazată pe TTN – teorema tensiunilor de noduri) a fost înlocuită de către o nouă variantă, cunoscută sub numele de *metoda nodală modificată* (MNA). Această nouă metodă a permis introducerea de surse de tensiune independente și comandate, precum și a bobinelor. De asemenea, în SPICE2 a fost implementat și un algoritm care permitea programului *să aloce dinamic întreaga memorie disponibilă* pentru rezolvarea circuitului. Această tehnică răspundea necesității de a proiecta și simula CI mai mari, limitarea privind numărul maxim de componente acceptat de SPICE1 devenind destul de critică. Totodată, *precizia și viteza de calcul* au fost îmbunătățite prin adăugarea unui mecanism de control al pasului de integrare și a metodei de integrare numerică de ordin superior stabilă a lui Gear.

Cercetări independente asupra simulării circuitelor, desfășurate la IBM, unde în 1975 a fost dezvoltat programul ECAP, au condus la realizarea în 1976 a programului ASTAP. Acest program utilizează metoda de reprezentare a ecuațiilor circuitului cu matrici rare, care permite accesul la toate variabilele de stare dorite, plătind însă cu timpul de rulare și memoria utilizată. Faptul că ASTAP și SPICE2 folosesc metode de integrare implicite de ordin variabil și metoda Newton-Raphson pentru ecuațiile algebrice neliniare a condus la clasificarea lor ca *simulatoare de circuit din generația a treia*.

La mijlocul anilor '70 NCSS a lansat programul ISPIICE (Interactive SPICE), constituind prima versiune comercială a unui program de tip SPICE. Acest demers s-a intensificat în mod consistent în anii '80, când tendința de apariție a versiunilor comerciale ale programului SPICE a crescut considerabil.

Dezvoltarea tehnologiei de fabricație a CI de la sfârșitul anilor '70 a împins complexitatea acestora la nivelul integrării pe scară mare (LSI – Large Scale Integration). Deoarece majoritatea acestor circuite se bazau pe tranzistoare TECMOS cu canal N, industria a început să preseze în direcția îmbunătățirii modelelor de dispozitiv din SPICE2, astfel încât acestea să țină pasul cu creșterea nivelului tehnologic.

Ca urmare, în acea perioadă a fost puternic îmbunătățită reprezentarea în SPICE2 a tranzistorului TECMOS. Astfel, s-au adăugat informații despre geometria dispozitivului, s-au introdus modele pentru conducția sub-prag, pentru fenomenul de limitare a vitezei purtătorilor de sarcină în canal, precum și pentru efectele de canal scurt și îngust.

Dezvoltarea tehnologică a avut aceleași efecte și pentru tranzistorul bipolar: dimensiunile s-au micșorat și frecvențele de lucru au crescut. Ca urmare, la modelul Gummel-Poon au fost adăugate efectul de împingere al emitorului, distribuirea capacității colector-bază, capacitatea de substrat și efectele generate de timpul de tranzit.

Creșterea complexității CI a impus și necesitatea creșterii preciziei soluției bazate pe utilizarea matricilor rare prin posibilitatea alegerii pivotului în timpul rezolvării, corectând astfel orice singularitate ce poate apărea în cursul simulării unui regim tranzitoriu de durată mare.

La începutul anilor '80, utilizarea programelor de tip SPICE a cunoscut o creștere extraordinară datorită apariției minicalculetoarelor, care au ușurat accesul inginerilor la resursele de calcul. Astfel, VAX 11/780 a devenit rapid platforma preferată pentru rularea programului SPICE.

O dată cu proliferarea numărului de utilizatori, lipsa suportului pentru utilizatorii de SPICE a devenit evidentă. Pentru inginerii din marile companii, suportul era asigurat de grupurile interne de *proiectare asistată de calculator* (Computer-Aided Design – CAD), dedicate susținerii și îmbunătățirii pachetelor software. Inginerii din companiile mici nu aveau însă nici un ajutor atunci când utilizau programe din domeniul public ca SPICE. Această situație a constituit forța motoare care a deschis un câmp nou de afaceri, focalizat pe ameliorarea și susținerea programului din domeniul public SPICE2. Un exemplu în acest sens îl constituie apariția programului HSPICE al firmei Meta-Software în 1991.

Deoarece simularea cu SPICE a circuitelor LSI din ce în ce mai complexe conducea la timpi de simulare destul de mari, în anii '80 s-au intensificat eforturile pentru dezvoltarea unor tehnici care să conducă la o reducere a timpului de simulare. Astfel, s-au utilizat abordări bazate fie pe relaxarea condițiilor de precizie, fie pe limitarea clasei de circuite. Câteva din simulatoarele dezvoltate în acest sens sunt: simulatorul temporal MOTIS (MOS Timing Simulator), simulatorul RELAX2 (1983), bazat pe metoda relaxării formelor de undă precum și simulatorul SPLICE (1984), bazat pe analiza temporală iterativă. În cazul circuitelor MOS digitale, această clasă de simulatoare electrice reușește să fie mai rapidă decât SPICE, cu cel puțin un ordin de mărime.

O abordare diferită pentru realizarea unei simulări mai rapide a CI complexe o constituie simularea mixtă sau hibridă. Principiul acestei metode constă în evaluarea diferită a diverselor blocuri din sistem: simularea electrică a blocurilor analogice și simularea logică a blocurilor digitale. Abordări în acest sens s-au realizat în simulatoarele SPLICE de la UC Berkeley, DIANA de la Universitatea din Leuven și SAMSON de la Universitatea Carnegie Mellon.

Un progres major înregistrat la mijlocul anilor '80, l-a constituit proliferarea utilizării în inginerie a calculatoarelor personale (PC – Personal Computer). Prima versiune SPICE pentru IBM PC-XT a fost furnizată de către firma MicroSim în anul 1991, sub numele

PSpice. PSpice a atras foarte mulți utilizatori noi și a extins considerabil popularitatea acestui simulator electric, cu toate că rula de opt ori mai lent pe PC decât pe o platformă VAX 11/780.

Dezvoltarea SPICE a fost impulsionată suplimentar de către trei companii: Daisy, Mentor și Valid, care au introdus sisteme software integrate pentru proiectarea electronică utilizând stații de lucru bazate pe microprocesoare. Domeniul pe care l-au dezvoltat se numește *inginerie asistată de calculator* (Computer-Aided Engineering – CAE). Astfel, s-au îmbinat într-un singur pachet editorul de schemă cu simulatorul SPICE și un utilitar de vizualizare a formelor de undă. De exemplu, Daisy a oferit o versiune îmbunătățită a SPICE2, numită DSPICE, care era parte a pachetului *Analog Virtual Lab Software*. De asemenea, în 1985, a apărut firma Analog Design Tools (ADT), care a oferit un produs CAE analog bine integrat, denumit *Analog Workbench*. Tehnologia SPICE a progresat și datorită contribuției grupurilor de CAD de la Bell Labs., Analog Devices, Texas Instruments, Hewlett-Packard, Tektronix, Harris Semiconductor și National Semiconductor. Contribuțiile acestora s-au materializat în dezvoltarea de utilitare de prezentare grafică a rezultatelor, îmbunătățirea convergenței algoritmilor de simulare, modelarea precisă a dispozitivelor semiconductoare precum și adăugarea de noi funcții și atribute, care să facă programul prietenos pentru utilizator.

O contribuție importantă la dezvoltarea tehnologiei SPICE în anii '80 a continuat să o aibă și cercetarea universitară. Răspândirea sistemului de operare UNIX a oferit baza pentru creșterea interacțiunii între utilizator și programul de simulare. Deoarece SPICE2 era un program scris în limbajul FORTRAN și era dificil de modificat și interfațat cu un interpretor de comenzi C, la Universitatea Berkeley s-a rescris și îmbunătățit versiunea 2G6 a SPICE2 utilizând limbajul C, rezultatul fiind un program interactiv, modular, ușor de înțeles și structurat, având și un utilitar grafic pentru afișarea rezultatelor. Noul program scris în C a fost denumit SPICE3 și a fost distribuit în domeniul public în martie 1985.

Spre sfârșitul anilor '80 a câștigat teren un nou concept în relația utilizator-simulator, acela de a da utilizatorului posibilitatea să descrie funcțiile care guvernează funcționarea dispozitivelor sau blocurilor utilizate în simulare. Această facilitate a fost disponibilă mai întâi în programul ASTAP și a fost dezvoltată ulterior în simulatorul SABER (1987) al firmei Analogy. SABER, dezvoltat inițial ca un simulator analogic bazat pe caracteristici liniare pe porțiuni a dispozitivelor de circuit, a promovat reprezentarea comportamentală a unui întreg bloc de circuit prin ecuații în domeniul timp sau în domeniul frecvență. Modelarea unor blocuri complete de circuit la nivel funcțional și nu la nivel de tranzistor determină o creștere semnificativă a vitezei de simulare. Merită menționat faptul că în SABER modelarea componentelor și blocurilor de circuit se realizează în cadrul unui limbaj propriu, denumit MUST. Acest limbaj permite modelarea atât a componentelor și blocurilor analogice cât și a celor digitale. În consecință, SABER poate fi considerat primul simulator mixt analog-digital. De altfel, limbajul MUST a stat la baza extinderii în anii '90 a limbajelor de descriere a sistemelor digitale, pentru a include și componente analogice. De exemplu, limbajul VHDL, devenit standard industrial și folosit strict la modelarea și simularea sistemelor digitale, a fost extins la domeniul sistemelor mixte sub denumirea VHDL-AMS (Analog Mixed Signals).

În cursul anilor '90, pe lângă numeroasele variante de SPICE furnizate de firme mai puțin reprezentative, producătorii importanți de software CAD/CAE în domeniul analogic au oferit diverse versiuni îmbunătățite ale SPICE2 sau SPICE3 și consultanță pentru utilizatori. Astfel, firmele Cadence și Mentor au oferit versiuni SPICE de firmă ca parte integrantă a produselor lor de CAE analogic: *Analog Workbench* și *Analog Artist* de la Cadence și *Accusim* de la Mentor. Începând cu această perioadă, accentul s-a pus în principal pe

creșterea funcționalității programelor, pe modelarea de nivel înalt și pe o integrare mai puternică atât cu editorul de schemă, utilitățile de prezentare grafică, bibliotecile de componente, cât și cu programele de proiectare fizică, de exemplu, a cablajelor sau a layout-ului CI. Un exemplu în acest sens este pachetul *OrCAD-Spice* furnizat de firma OrCAD, specializată în software pentru realizarea de cablaje, după ce a achiziționat simulatorul *PSpice* de la MicroSim. Acest pachet software conține module pentru reprezentare grafică a schemei și rezultatelor, modulul de simulare PSpice, module de generat modele, respectiv forme de undă, modul pentru realizare de layout (cablaje), precum și biblioteci mari de componente și modele sau macromodele. Ulterior, firma OrCAD a fost preluată de Cadence, astfel încât, în prezent pachetul *OrCAD-Spice* este deținut de această renumită firmă.

Cercetări importante s-au realizat în perioada anilor '90 în vederea extinderii funcționalității simulării electrice dincolo de modurile de analiză clasice din SPICE, adică analiza neliniară de c.c., analiza în domeniul timp și analiza de semnal mic în domeniul frecvență. Un exemplu de astfel de extindere este analiza neliniară în domeniul frecvență. Soluția în domeniul frecvență este utilă în special pentru determinarea răspunsului staționar (permanent) al circuitelor cu constante distribuite și a circuitelor rezonante cu factor de calitate mare. O altă direcție este constituită de analiza de regim permanent, care rezolvă în domeniul timp problemele menționate anterior. Această analiză este importantă în special pentru circuitele de radiofrecvență și cele care ating regimul permanent de funcționare după o evoluție tranzitorie îndelungată cum sunt, de exemplu, sursele în comutație. În consecință, pe lângă variantele SPICE clasice, producătorii importanți de software din domeniu au furnizat variante pentru domeniul radiofrecvență. Amintim aici, simulatorul HSPICE-RF, în prezent produs la firmei Synopsys, această firmă fiind al treilea producător important de software pentru proiectarea circuitelor integrate alături de Mentor Graphics și Cadence.

În ultimii ani nu au existat modificări majore în ceea ce privește structura programelor SPICE. Diversele variante care au apărut au permis implementarea noilor modele de tranzistoare MOS, care au evoluat o dată cu dezvoltarea tehnologică ce a condus la micșorarea drastică a dimensiunilor geometrice și, implicit, la apariția de fenomene suplimentare în comportarea acestor dispozitive.

În concluzie, în ciuda tendințelor existente în domeniul simulării de circuit, acestea reprezintă mai degrabă soluții complementare, fără ca SPICE să poată fi considerat perimat. Programul SPICE va continua să fie principalul simulator electric al circuitelor analogice, deoarece acesta are la bază și rezolvă ecuațiile fundamentale ce caracterizează un sistem electric. Într-un raport din anii '90 asupra simulării analogice bazată pe PC s-a ajuns la concluzia că "este probabil că în viitor nimic nu va înlocui SPICE din poziția sa de standard industrial pentru simularea circuitelor analogice". Această concluzie, după mai bine de 15 ani de progrese, este încă valabilă.

Versiuni comerciale ale programelor din familia SPICE

- **MultiSIM** (simulator mixt de la Electronics Workbench, acum deținut de National Instruments);
- **HSPICE** (produs inițial de Meta Software, apoi Avant!, acum deținut de Synopsys);
- **PSpice** (produs inițial de MicroSim, apoi OrCAD, acum deținut de Cadence Design Systems);
- **SmartSpice** (produs de Silvaco);
- **T-Spice** (produs de Tanner EDA);

- **Spectre** (simulator analogic general și pentru RF produs de Cadence Design Systems);
- **Eldo** (simulator tip SPICE pentru domeniul analog-mixt și RF produs de Mentor Graphics);
- **UltraSim** (simulator rapid tip SPICE produs de Cadence Design Systems);
- **LTspice** (Simulator produs de Linear Technology);
- **NanoSim** (Simulator SPICE rapid, inițial de la EPIC, acum deținut de Synopsys);
- **NSPICE** (Apache Design Solutions);
- **HSIM** (Simulator SPICE rapid, inițial produs de Nassda, acum deținut de Synopsys);
- **B2SPICE** (Beige Bag);
- **ICAP/4** (simulator de circuite și semnale analogice și mixte de la Intusoft);
- **TINA Design Suite** (Simulator Spice în pachetul DesignSoft produs de Tina);
- **TINA-TI** (simulator free bazat pe DesignSoft's Tina Spice Simulator);
- **SPICE OPUS** (simulator mixt cu utilitare de optimizare încorporate);
- **SIMatrix** (Schematic editor și simulator de la Catena Software);
- **Micro-Cap** (Spectrum Software);
- **WinECAD** (simulator versiune franceză de la Mircelc pentru scop educațional);
- **EDSPICE** (simulator produs de EDWinXp, acum deținut de Visionics);
- **5Spice** (simulator analogic produs de 5Spice);
- **mSPICE** (simulator rapid, de mare capacitate, produs de Fastrack Design);
- **NGSPICE** (simulator de circuit mixed-level/mixed-signal bazat pe Spice3f5 de la Berkeley și XSPICE de la Georgia Tech);
- **E8884A High-Frequency SPICE** (simulator pentru circuite mari, oscilatoare, circuite digitale de mare viteză, circuite în comutație, produs de Agilent EEsof EDA);
- **TopSPICE** (simulator mixt analog-digital pentru Windows produs de Penzar Development);
- **Nascim** (simulator Spice rapid produs de Nascentric).

Versiuni SPICE necomerciale

În general, versiunile SPICE necomerciale sunt dezvoltate în cadrul centrelor de cercetare din diverse universități. Cele mai reprezentative versiuni necomerciale sunt:

- **spice 3f5** (simulator analogic cu scop general bazat pe SPICE2, dezvoltat la UC Berkeley – multe versiuni comerciale au la bază acest simulator);
- **XSPICE** (simulator analog-digital dezvoltat ca extensie a simulatorului SPICE3 la Georgia Institute of Tehnology).