

POČÍTAČOVÉ SIMULACE V ELEKTROTECHNICE: ORCADSPICE VERSUS PROGRAMY TYPU „SPICE-LIKE“ A „SPICE-COMPATIBLE“

Dalibor Biolek

Katedra elektrotechniky, Univerzita obrany Brno, Kounicova 65, 612 00 Brno,
dalibor.biolek@unob.cz

Abstrakt:

V přednášce je uveden rozbor základních vlastností simulačních programů pro elektrotechniku se zaměřením na programy typu SPICE. Na základě této analýzy a dlouhodobých zkušeností autora jsou formulována doporučení pro využívání těchto programů na středních školách.

1. Úvod

V roce 1971 vytvořil student „University of California“, Berkeley, USA Larry Nagel program SPICE1 (SPICE = Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) jako vývojově vyšší verzi svého předchozího programu CANCER (Computer Analysis of Nonlinear Circuits Excluding Radiation). Program umožňoval analýzu dějů v obvodech, obsahujících zejména bipolární a unipolární tranzistory. O věrohodnost výsledků bylo usilováno propracovaností modelů i matematických algoritmů řešení rovnic. Uživatel měl navíc možnost prakticky neomezeného rozšiřování sortimentu analyzovaných součástek technikou makromodelů zakládáním tzv. podobvodů (subcircuits) SPICE.

Protože program byl v podstatě volně šířitelný, stal se brzo standardním simulačním nástrojem pro elektrotechnické úlohy. Usilovně se pracovalo na jeho zdokonalování.

V roce 1975 byla představena verze SPICE2 s podstatně vylepšenými modely i numerickými algoritmy. Tato verze byla v průběhu téměř 20 let postupně zdokonalována na Berkeleyjské univerzitě až do dnes všeobecně známého standardu SPICE2G.6, který byl v r. 1983 zpřístupněn k volnému používání.

Zdrojové texty SPICE1 a SPICE 2 byly napsány ve Fortranu. Vzhledem k zvýšenému využívání unixových pracovních stanic padlo v Berkeley rozhodnutí přepsat SPICE 2 do jazyka C. Tak začala vznikat verze SPICE3. Dnes je rozšířena verze SPICE3F.2. Oproti SPICE2G.6 se vyznačuje řadou vylepšení, ovšem z různých důvodů došlo k ztrátě zpětné kompatibility se SPICE2G.6.

S růstem výkonnosti počítačů PC byly programy, dosud běžící na výkonných pracovních stanicích, přepisovány na programy spustitelné na „PCčkách“. Tak vznikl standard PSpice.

Dnes existuje více simulačních programů, které využívají v podstatě tři ne zcela kompatibilní standardy: SPICE2, SPICE3, PSPICE. Všechny lze rozdělit na tzv. „Spice-like“ a „Spice-compatible“ simulátory [1].

Označení „Spice-like“ znamená, že simulátor je schopen generovat podobné výsledky analýzy jako SPICE, avšak nemusí být schopen číst standardní vstupní soubory SPICE. Typickými příklady jsou staré verze programů Micro-Cap nebo TINA, program SABER apod.

Termínem „Spice-compatible“ se označují simulační programy, které dokáží číst standardní vstupní soubory SPICE, provádět klasické SPICE analýzy, a generovat výsledky v standardním SPICE2G.6 tvaru. Ze současných programů jsou to například PSpice, HSpice (standard SPICE3), WINSpice (standard SPICE3), MicroCap od verze IV, Multisim a další.

Kromě toho existují programy pro simulaci obvodů, které nemají s výše uvedenými skupinami programů mnoho společného. Jedná se zejména o jednoúčelové programy, specializované na analýzy obvodů, které nelze realizovat programy typu SPICE.

Programy typu „SPICE-compatible“ jsou široce využívány mimo jiné proto, že umožňují neomezené rozšiřování sortimentu modelovaných součástek o nové typy, jejichž modely se průběžně objevují na webu a následně i v inovovaných knihovnách nových verzí programů. Na akademických pracovištích i v průmyslu je oblíbeným produktem OrcadPSpice. V současnosti je k dispozici verze 15.7. Tento program je vyučován například na FEKT VUT v Brně. Na UO v Brně dávají přednost programu Micro-Cap. Zřejmě nejrozšířenějším programem, využívajícím jazyka SPICE3, je známý HSpice. Hodně je oblíben i volně šířitelný WinSpice, zejména na FEL ČVUT v Praze. Tam se využívá i program CIA, vytvořený doc. Dobešem [2]. Tento program však spadá do třídy programů „SPICE-like“.

2. Pro který simulační program se rozhodnout

Dalo by se lapidárně říci, že z hlediska výsledného efektu uživatel očekává od simulačního programu jedinou věc: Aby mu program ukázal co nejdříve a nejvhodnějším způsobem, jak se konkrétní obvod bude chovat ve skutečnosti. Dále se očekává, že cesta od „vlození“ zadání obvodu do programu až po získání výsledků bude rychlá, nenamáhavá a pokud možno příjemná.

Do jaké míry budou tato očekávání uživatele konkrétního programu naplněna, závisí na pěti faktorech:

1. Na sortimentu a kvalitě a možnosti získávání a rozšiřování matematických modelů součástek v programu a na způsobu, jak je uživatel použije k modelování svého obvodu.
2. Na kvalitě matematických algoritmů analýzy, které jsou zabudovány v programu.
3. Na sortimentu analýz, které jsou uživateli k dispozici.
4. Na sortimentu analyzačních režimů a módů v programu.
5. Na tom, jak se programátorům podařilo, aby byl program „user-friendly“.

Pro studenty, učitele a další běžné uživatele bude rozhodování o tom, s kterým programem pracovat, jistě ovlivněno dalšími faktory, zejména:

6. Zda je možno daný program získat zdarma a pokud ano, jaká má omezení oproti plné verzi.
7. Za jakou cenu je možné pořídit plnou verzi, zejména pro zabezpečení výuky na více počítačích, a jak je finančně náročný upgrade na nové verze.
8. Jaké jsou nároky na instalační proces (velikost instalačních souborů, legalizace licence, nároky na HW a SW), na provoz a na údržbu instalace v podmínkách výuky.
9. Jak rychle trvá zaškolení uživatele do základů práce s programem a kolik času tím pádem zbude učitelům na efektivní využívání programu pro výuku a studentům pro samostatnou práci. Jsou k dispozici kvalitní učební texty?
10. Jak je to s přenositelností datových souborů mezi profesionální verzí programu (na učebně) a omezenou studentskou verzí (na osobních počítačích studentů).

První dva faktory hovoří v prospěch „SPICE-compatible“ programu, prostě programu, který využívá standardních SPICE modelů součástek a jehož vnitřní matematické algoritmy řešení soustav rovnic jsou osvědčené a dostatečně spolehlivé. Jednotlivé programy se však liší

v naplňování dalších bodů. V následující kapitole 3 se proto zaměříme jednak na společné rysy programů „SPICE-compatible“, jednak na srovnání odlišností dvou typických produktů: programu OrcadPSpice, který představuje konvenční PSpice s relativně neměnnými výpočetními možnostmi, a Micro-Capu, což je dynamicky se vyvíjející produkt s pečlivě zabezpečenou SPICE-kompatibilitou.

Uvědomíme-li si, že od vzniku standardu SPICE již uběhlo více než 35 let, pak nás asi nepřekvapí, že programy, založené na tomto standardu, mají v některých situacích problémy s nalezením řešení v přijatelném čase. Na typické problémy je upozorněno v kapitole 4. K analýze obvodů určitého typu jsou dokonce zcela nepoužitelné. Pak je nutné využít jiných softwarových nástrojů, o nichž se stručně zmiňuje kapitola 5.

3. Co umí programy „SPICE-compatible“

3.1. Modelování součástek

Filozofie jazyka SPICE je jednoduchá: Prakticky jakýkoliv elektrický obvod lze modelovat na základě několika mála elementárních součástek, resp. bloků. Pro simulaci analogových obvodů jsou k dispozici:

- Pasivní prvky R, L, C. Induktory mohou mít definovány vzájemné magnetické vazby a nelineární jádra.
- Polovodičové prvky typu dioda a tranzistor (bipolární, MOSFET, JFET, IGBT, GaAsFET).
- Nezávislý zdroj napětí a nezávislý zdroj proudu.
- Zdroj napětí a zdroj proudu, řízený dalším napětím nebo proudem.
- Spínač řízený napětím a spínač řízený proudem.
- Přenosové vedení.

Další součástky či celé bloky lze získat skládáním z elementárních součástek do tzv. podobvodů (Subcircuits) SPICE, což jsou jakési makroobvody, komunikující s okolím pouze prostřednictvím vybraných pinů. Pomocí podobvodů jsou modelovány například operační zesilovače, napěťové reference a další komerční integrované obvody. Uživatel má možnost vytvářet vlastní podobvody.

K pasivním prvkům R, L a C je možné definovat teplotní součinitele odporu, indukčnosti a kapacity, jakož i tolerance jmenovitých hodnot. Indukčnost a kapacitu je možno modelovat jako lineárně nebo kvadraticky závislé na proudu, resp. napětí.

Polovodičové prvky mají relativně velmi složité modely s řadou fyzikálních parametrů, které jsou většinou extrahovány měřením přímo u výrobce nebo specializovanou firmou. Modely jsou pak uloženy v knihovnách, které bývají součástí instalačního programu a kromě toho jsou dostupné na Internetu. Existuje zde možnost modifikace modelů a tvorba modelů vlastních.

Nezávislé zdroje napětí a proudu jsou primárně určeny k modelování zdrojů konstantního napětí a proudu, ovšem není problém přiřadit těmto součástkám konkrétní časový průběh například pilovitého, obdélníkového nebo jiného tvaru. S využitím dalších standardních technik (řízení zdroje, STIMULY) jsou dosažitelné jakékoliv průběhy signálů včetně signálů, dopředu sejmutých například z digitálních osciloskopů a posléze v simulátoru použitých k buzení analyzovaného obvodu.

Často využívanou technikou modelování je tzv. „behaviorální modelování“, kdy nás nezajímají vnitřní děje ani vnitřní „podoba“ obvodu, pouze jeho vstupně-výstupní chování. Toto chování popisujeme bloky, definovanými jednoduchými vzorci. Například celou integrovanou analogovou násobičku, což je poměrně složitý integrovaný obvod se vstupy

Vin1 a Vin2 a výstupem Vout pak modelujeme jediným řízeným zdrojem napětí. Výstupní napětí je dáno například vzorcem $V_{out} = V_{in1} * V_{in2} / 10$. Většina modelů integrovaných obvodů od výrobců, které jsou ve formě podobvodů SPICE, využívá kombinace modelování na úrovni součástek (polovodičů) a behaviorálního modelování tak, aby výsledný model byl vyváženým kompromisem mezi složitostí a věrohodností modelování.

Z uvedeného vyplývá, že součástí behaviorálního modelování je arzenál matematických funkcí a operací, který je v PSpice poměrně rozsáhlý.

Kromě řízených zdrojů jsou důležitými prvky behaviorálního modelování i řízené spínače, jejichž stav (sepnuto, vypnuto) je řízen buď napětím, nebo proudem. V PSpice existují dva druhy modelů spínačů, buď se spojitou závislostí odporu spínače na řízené veličině, nebo s možnostmi modelovat hysterezi.

Přenosová vedení tvoří jediný prvek s rozprostřenými parametry, přímo modelovaný v SPICE. Jsou dostupné tzv. ideální modely, popsané charakteristickou impedancí a dalšími obdobnými parametry, a modely ztrátové, umožňující popsat vedení ztrátovým odporem, indukčností, kapacitou a svodovou vodivostí na metr délky.

Zde je třeba zdůraznit, že zejména modely polovodičů jsou precizně rozpracovány tak, aby v příslušných analýzách poskytovaly co nejvěrohodnější výsledky včetně efektů, spojených s teplotními změnami, s respektováním, že se jedná o zdroje šumu, apod.

V jednotlivých vývojových verzích programového produktu OrcadPSpice jsou prostředky modelování relativně neměnné, založené na standardu PSpice. Příliš se nerozšiřuje ani sortiment zabudovaných matematických funkcí pro behaviorální modelování. K výraznějšímu posunu došlo až přechodem verze 10.5 programu PSpice A/D programového balíku OrcadPSpice na verzi 15.7, kde přibylo několik matematických funkcí a autoři přistoupili k rozšíření množiny bloků pro behaviorální modelování v prostředí schématického editoru CAPTURE.

Současná verze 9 programu Micro-Cap má v sobě integrovány všechny výše popsané prostředky klasického i behaviorálního modelování SPICE a uživatel může rovněž využívat volně dostupné podobvody SPICE. Poradí si i se syntaxí jazyka SPICE3. Kromě toho využívá celou řadu svých dalších modelů, které v SPICE neexistují, např. modely operačních zesilovačů, speciálních funkčních zdrojů, transformátorů atd. Má rovněž daleko rozsáhlejší množinu matematických funkcí pro behaviorální modelování. Uživatelům programů SPICE umožňuje přímo práci na úrovni vstupního souboru SPICE. Pokročilý uživatel může kombinovat modelování v Micro-Capu s modelováním dílčích bloků přímo netlistem SPICE.

3.2. Kvalita matematických algoritmů analýzy

Matematickým základem veškerých analýz SPICE jsou metody řešení rozsáhlých soustav rovnic různého typu, od lineárních rovnic s reálnými a komplexními koeficienty až po nelineární rovnice. Vnitřní algoritmy v „SPICE-compatible“ programech je možné považovat za malý zázrak. Kladou se na ně extrémní požadavky, totiž nalezení řešení za každých okolností, nezávisle na charakteru modelovaného obvodu.

Uživatel může ovlivnit způsob výpočtů modifikací tzv. globálních podmínek simulace, což je řada čísel, definujících např. velikosti přípustných chyb, maximální počty iterací apod. Tyto hodnoty jsou standardně přednastaveny tak, že představují optimum při řešení typických obvodů.

Zdrojové texty k SPICE jsou volně dostupné na Internetu, takže se dá očekávat, že základ matematických algoritmů bude v řadě „SPICE-compatible“ programech tvořen jednotným a léty ověřeným jádrem. Porovnááme-li výsledky analýz téhož modelu obvodu různými programy při stejných globálních podmínkách simulace, nedospíváme k zásadně odlišným

výsledkům. Při testování programů OrcadPSpice 15.7 a Micro-Cap 9 na extrémně náročných úlohách, jako je třeba rozběh krystalového oscilátoru, měl první z programů problémy s konvergencí řešení a našel ustálený stav, zřetelně se lišící od výsledků z programu Micro-Cap, které se zdály být fyzikálně v pořádku. Analýza Micro-Capem trvala asi o třetinu kratší dobu. O tomto programu se tvrdí, že je vůbec nejrychlejším „SPICE-compatible“ simulátorem, běžícím pod Windows.

Závěrem je možné shrnout, že omezujeme-li se na analýzu běžných elektrotechnických úloh, poskytují různé programy, založené na algoritmech SPICE, prakticky totožné výsledky. Kvalita algoritmů pak není rozhodujícím hlediskem pro volbu programu.

3.3. Sortiment analýz v „SPICE-compatible“ programech

Společnou vlastností „SPICE-compatible“ programů je schopnost realizace tří **základních analýz**:

- DC neboli stejnosměrná analýza: Program simuluje funkci **charakterografu**, neboli snímače stejnosměrných charakteristik součástek nebo celých obvodů. Příklad: analýza ampérovoltové charakteristiky diody.
- TRANSIENT neboli přechodová nebo taky časová analýza: „Softwarová náhrada“ **osciloskopu**. Příklad: analýza přechodového jevu v obvodu.
- AC neboli střídavá nebo taky kmitočtová analýza: Program imituje **obvodový analyzátor** k snímání kmitočtových charakteristik obvodů. Příklad: amplitudová kmitočtová charakteristika hifi zesilovače, nebo rozložení střídavých napětí a proudů v obvodu v harmonickém ustáleném stavu pro konkrétní kmitočet budících signálů.

K těmto analýzám přistupuje několik **rozšiřujících analýz**:

Standardní součástí časové analýzy je analýza FOURIER neboli spektrální analýza časových průběhů, získaných během časové analýzy. Program tak zastává funkci **spektrálního analyzátoru**.

Standardní součástí střídavé analýzy je analýza NOISE neboli šumová analýza. Program analyzuje kmitočtové rozložení výkonu šumu, generovaného interními součástkami, a z něj odvozených dalších charakteristik šumu. Program tak mj. využíváme jako **analyzátor spektrální výkonové hustoty** šumového výkonu.

Standardní součástí stejnosměrné analýzy, které se však dají na rozdíl od předchozích případů spouštět nezávisle na základní analýze, jsou analýzy TRANSFER FUNCTION (přenosová funkce) a SENSITIVITY (citlivostní analýza). Přenosová funkce počítá poměr dvou čísel: ve jmenovateli je „malá“ změna stejnosměrného napětí nebo proudu zdroje. V čitateli je změna výstupní veličiny, která je vyvolaná změnou napětí nebo proudu zdroje. Takto lze například počítat diferenciální vstupní odpor tranzistoru v okolí nastaveného stejnosměrného pracovního bodu, ovšem na nízkých kmitočtech. Citlivostní analýza počítá rovněž poměr dvou podobných změn, ale nyní může být „příčinná“ změna ve jmenovateli dána variací (téměř) libovolného parametru obvodu, například odporu rezistoru. Citlivostní analýzou tak například můžeme zjistit, jak se změní stejnosměrné napětí na kolektoru tranzistoru, když se kolektorový odpor zvětší o 1%.

U programů, které jsou založeny na standardu SPICE3, jsou navíc k dispozici analýzy POLEZERO (hledají se tzv. nulové body a póly linearizovaných obvodových funkcí) a DISTORTION (počítají se zkreslení signálů, vyvolané nelineárním chováním obvodů).

Některé „SPICE-compatible“ programy nabízejí nad rámec uvedených rozšiřujících analýz další analýzy. Z těch uživatelsky velmi atraktivních to jsou **dynamická stejnosměrná** (Dynamic DC) a **dynamická střídavá** (Dynamic AC) analýza v programu Micro-Cap.

Uživatel nejenže vidí přímo ve schématu hodnoty napětí a proudů, případně dalších veličin v stejnosměrném a střídavém režimu, ale tyto hodnoty se dynamicky mění podle toho, jak uživatel schéma upravuje, modifikuje hodnoty součástek, doplňuje zapojení apod.

Oproti Micro-Capu nabízí OrcadPSpice další typy analýz, jako je třeba analýza „Smoke“, ovšem jen v rámci nadstandardního programového balíku „Advanced Analysis“, který je třeba dokoupit k základní sestavě programu.

<i>analizační módy</i>	<i>základní typy analýz</i>	<i>analizační režimy</i>
- Klasický - Probe (sonda)	- Transient (časová)... + ss. prac. bod + Fourier. analýza a DSP - AC (kmitočtová, střídavá) + šumová analýza a DSP - DC (stejnosměrná)	- Klasický - Stepping (krokování jednoduché a vícenásobné) - Teplotní analýza - Performance Analysis (vyhodnocovací analýza) - Monte Carlo a Worst Case (statistická analýza) - Optimization (optimalizace)
	<i>rozšiřující typy analýz</i> - Transfer Function (přenosová funkce) - Sensitivity (citlivostní analýza) - Dynamic DC (dynamická stejnosměrná) - Dynamic AC (dynamická střídavá) 	

Obr. 1. Typy analýz, analizační režimy a módy pro „Spice-compatible“ program Micro-Cap. Škrty jsou vyznačena omezení Pspice [3].

3.4. Sortiment analyzačních režimů a módů v „SPICE-compatible“ programech

Na obr. 1 je znázorněno, že základní analýzy je možno „provozovat“ v klasickém režimu (analýza proběhne jednou), v režimu krokování nebo teplotní analýzy (analýza je opakována s různými hodnotami krokované veličiny, například napětí baterie nebo teplota). S krokováním je spojena vyhodnocovací analýza, kdy zkoumáme závislost sledované veličiny na krokované veličině a vynášíme ji do grafu (například závislost rezonančního kmitočtu RLC obvodu na napětí, které „ladí“ varikap). Statistická analýza zkoumá závislost fungování obvodu na tolerancích součástek a na statistickém rozložení parametrů těchto součástek v okolí jmenovitých hodnot. Velmi praktický je optimalizační režim, kdy program „doladí“ vybrané součástky tak, aby celý obvod splňoval určité kritérium, například aby jeho kmitočtová charakteristika procházela definovanými body.

Srovnáme-li programy OrcadPSpice15.7 (1) a Micro-Cap 9 (2), pak:

- možnosti teplotní analýzy jsou rovnocenné,
- statistická analýza probíhá v obou programech obdobně, různé pojetí je však u metody Worst Case,
- krokovat je možné současně jen jeden parametr (1), resp. 20 parametrů (2),
- vyhodnocovací analýza je podstatně lepší v OrCADu díky koncepci tzv. měřicích funkcí v postprocesoru PROBE,
- optimalizace je lepší v OrCADu, ovšem v demo verzích obou programů jsou možnosti optimalizace omezeny.

Na obr. 1 je znázorněno, že základní analýzy TRANSIENT, DC a AC mohou být uskutečněny v klasickém a Probe módu. Slovo Probe zde nemá nic společného s grafickým postprocesorem PROBE, který je součástí OrcadPSpice. Jde o interaktivní mód, kdy klikáním

myší na jednotlivé součástky ve schématu obvodu simulujeme přikládání měřicí sondy (Probe) a okamžité vykreslování příslušného grafu, například časového průběhu proudu danou součástkou. Tento mód je specialitou programu Micro-Cap.

3.5. Je program „User-Friendly“?

Měřítka, podle kterých posuzujeme uživatelskou přívětivost daného programu, jsou do jisté míry subjektivní a výsledek posuzování může být značně ovlivněn i tím, na co je uživatel zvyklý. Dále bychom měli srovnávat srovnatelné, například schématický editor OrCADu se schématickým editorem Micro-Capu. Srovnávání celých programových balíků bývá ošidné, neboť běžný uživatel většinou využívá jen některé jejich části.

OrcadPSpice je mohutný softwarový balík, který není primárně určen jen k simulaci obvodů. Jeho další nejznámější využití je návrh plošných spojů. Tato univerzalita se negativně projevuje na růstu složitosti ovládání jednotlivých modulů obvodu, které jsou vzájemně propojené, tedy i schématického editoru. Jmenujme konkrétní věc: atributové okno součástky, například rezistoru nebo tranzistoru, obsahuje řadu položek, které nejsou bezprostředně spjaty s analýzou a kterým běžný uživatel nerozumí. Je sice možné část těchto atributů skrýt po aplikaci masky „Orcad-PSpice“, mimo jiné se však skryjí i některé atributy, které k simulaci občas potřebujeme, například „PSpice Template“.

OrcadPSpice je založen na klasickém modulárním principu, tj. s blokově oddělenými poslopnostmi „zadávat dat pro simulaci“, „simulace“, „prezentace výsledků simulace“. Uživatel si nejprve založí tzv. projekt. V rámci projektu vytvoří ve schématickém editoru model obvodu. Pak musí založit tzv. simulační profil, v rámci něhož nadefinuje typ analýzy. Následně spustí analýzu, lépe řečeno, spustí se samostatný program s výpočtním jádrem. Po ukončení analýzy nebo již v jejím průběhu (závisí na nastavení) se spustí grafický postprocesor PROBE a uživatel si může prohlédnout výsledky v grafické formě.

Potřeba jiné analýzy nutí uživatele k opuštění prostředí PSpice a k návratu do schématického editoru, k modifikaci nebo založení nového simulačního profilu, atd. atd. Vznikne-li potřeba definice globální proměnné nebo dalšího standardního úkonu, jakým je použití příkazu .NODESET apod., vše se řeší poměrně pracným způsobem, tj. umísťováním tzv. pseudosoučástek na kreslicí plochu. Ještě nepříjemnější je definice nových součástek, jejichž modely nejsou v knihovnách na disku.

V OrcadPSpice je možný i jednodušší způsob práce, při němž odpadá řada výše vyjmenovaných problémů: schématický editor Orcadu se vůbec nepoužije a pracuje se pouze s programem PSpice, jemuž jsou data o obvodu připravována na úrovni vstupních souborů. Pro mnohé uživatele je však tento způsob práce nepřijatelný, protože jednak ztrácí pohodlí při tvorbě modelu obvodu schématem, jednak by museli znát syntaxi jazyka SPICE a pravidla pro tvorbu vstupních souborů.

Program Micro-Cap sice rovněž pracuje na modulárním principu, ten je však realizován v rámci jediného spustitelného souboru tak, že uživatel si této modularity není vlastně vědom. Po nakreslení schématu se hned spouští vybraná analýza, otevře se předvyplněná nabídka parametrů analýzy, a následně je analýza provedena se současnou vizualizací výsledků. V každém okamžiku jsou k dispozici jak okna s výsledky simulace, tak i se schématem. Mezi danými okny „proudí data“ v rámci jediného spuštěného programu: ve schématu se zobrazují výsledky analýzy, případně interakcí se schématem měním obsah okna s výsledky analýzy (mód PROBE).

Mnozí uživatelé, kteří dobře znají oba programy, tj. OrcadPSpice i Micro-Cap, nemají pochyb o tom, že Micro-Cap je uživatelsky příjemnější a snadněji naučitelný. V zájmu objektivity je však třeba dodat, že znalci Orcadu, kteří se snažili rychle naučit pracovat v Micro-Capu, vyhodnotili schématický editor v Orcadu jako podstatně lepší než schématický editor Micro-Capu, který se jim zdál příliš komplikovaný.

3.6. Co ještě zajímá uživatele (nejen) na školách

V následující tabulce je provedeno srovnání programů OrcadPSpice a Micro-Cap z hlediska bodů 6-9 ze strany 2.

	OrCadPSpice 15.7	Micro-Cap 9
omezení „free“ verze	Obvod do 64 uzlů, 10 tranzistorů, dvou podobvodů SPICE nebo 65 základních digitálních obvodů, a 10 přenosových vedení. Schéma, nakreslené v editoru CAPTURE se nedá uložit, obsahuje-li více než 30 součástek. Omezené knihovny součástek (asi 39 analogových a 134 digitálních), uživatel je však může rozšiřovat.	Obvod do 50 součástek a současně počet uzlů + cívek + zdrojů musí být do 100. Analýza je až 4x zpomalena u složitých obvodů oproti plné verzi. Některé nadstandardní funkce jsou zablokovány nebo omezeny. Omezené knihovny součástek (stovky analogových a stovky digitálních), uživatel je však může rozšiřovat.
orientační cena plné verze pro školy bez DPH	60000 Kč za Ultra 5-Pack*) plus 3600 Kč za HW klíč, 15000 Kč za další 5-Pack, tedy cca 79 tisíc za 10 licencí plovoucích v síti	980 Euro za 1 licenci, sleva 5% za 5-10 licencí, 10% za více než 10 licencí, tedy cca 262 tisíc Kč za 10 licencí
cena upgrade na novou verzi	v rámci každoročního „maintanance“ poplatku 10.500 Kč za 5-pack	upgrade MC8 na MC9 jednorázově 250 Euro za každou licenci
instalační soubory „free“ verze v MB	713 MB (obsahuje další SW**) 713 MB samorozbalovací archiv	19 MB (1xCD), 7.6 MB archiv
instalační soubory plné verze v MB	1161 (obsahují nejen PSpice)	96
podmínky práce s plnou verzí	HW klíč + instalace licenčního manažeru	HW klíč
dostupná literatura v češtině	například [4], [5], [6], [7]	například [3], [4], [5], [6]

*) Obsahuje 5x Capture CIS, 5x Layout, 5x SPECCTRA for OrCAD a 5x PSpice A/D

**) Obsahuje demo verze produktů Capture, Capture CIS Option, PSpice® A/D, PSpice AA, PCB Editor, SPECCTRA® for OrCAD

Z tabulky je zřejmé, že „free“ verze obou programů jsou koncipovány velkoryse a že uvedené limity nás podstatně neomezí ani při analýze poměrně rozsáhlých obvodů. U Orcadu však může způsobovat určité omezení podmínka maximálně dvou podobvodů SPICE a rovněž fakt, že do uvedených limitů se počítají i vnitřní prvky podobvodů.

Pracuje-li student na učebně s programem a potřebuje-li pokračovat v práci na svém počítači, kde má svoji, většinou „free“ verzi programu, musí si přenést tato data:

- **OrcadPSpice:** Všechny soubory včetně podadresářů, vytvořené v průběhu zakládání projektu a proběhnutých simulací. Výjimku tvoří výstupní soubory a zejména datové soubory pro postprocesor PROBE, které je vhodné odstranit, neboť mnohdy jsou značně rozsáhlé a program si je stejně při další analýze opět vygeneruje. Pokud se v projektu používají modely prvků, které nejsou v omezených knihovnách „free“ verze, vznikne problém, který se sice dá vyřešit, ale většinou to není v možnostech průměrného studenta.
- **Micro-Cap:** Stačí přenést jediný vstupní soubor, který obsahuje i informaci o schématických značkách použitých součástek a dvojím kliknutím myši lze do něj přenést i veškeré matematické modely, takže obvod pak lze analyzovat i v demo verzi programu s omezenou knihovnou.

4. S čím mají programy „SPICE-compatible“ problémy

Základem všech „SPICE“ analýz je vnitřní algoritmus programu pro **hledání stejnosměrného pracovního bodu** v obvodu. Pracovní bod se hledá prakticky před

vykonáním každé analýzy a dokonce i tehdy, pokud programu nepředepíšeme výkon žádné z analýz. Uživatel tak má možnost prohlédnout si rozložení stejnosměrných napětí a proudů v obvodu bez toho, že by musel spouštět konkrétní analýzu. Určitou výjimkou je program Micro-Cap, jehož uživatel může výpočet pracovního bodu zakázat.

Ve skutečnosti může mít nelineární obvod i více stejnosměrných pracovních bodů. Příkladem je klasický bistabilní klopný obvod s dvojicí tranzistorů. Zde existují kupodivu tři možné pracovní body, odpovídající těmto situacím: **1.** První tranzistor je otevřený a druhý je zavřený. **2.** První tranzistor je zavřený a druhý je otevřený. **3.** Oba tranzistory jsou zčásti otevřeny. První dva případy v praxi běžně nastávají. Třetí stav je teoreticky možný, zvlášť pokud je model obvodu přísně symetrický. Ve skutečnosti je ovšem tento stav nestabilní, tedy dlouhodobě neudržitelný. Modelujeme-li však v programu klopný obvod symetricky, tj. s identickou dvojicí tranzistorů a podpůrných pasivních součástek, nalezne SPICE právě onen nestabilní pracovní bod. Naštěstí existují prostředky (zejména použití příkazu `.NODESET`), které umožní uživateli donutit program nalézt řešení, které nás zajímá. K tomu jsou však potřebné určité znalosti uživatele programu.

V řadě případů má program vůbec problémy s nalezením jakéhokoliv řešení. Příčin může být několik, ale obvykle se jedná buď o nesprávnou techniku či chybu v modelování, nebo o tzv. konvergenční problémy, proti nimž lze bojovat např. modifikací globálních podmínek simulace. V každém případě se jedná o složité problémy, které student bez pomoci zkušeného učitele ztěží zvládnout.

Klasické programy SPICE bývají „nemotorné“ při TRANIENTní analýze obvodů, které postupně přecházejí do periodického ustáleného stavu. Příkladem může být již dříve zmíněné zkoumání rozběhu krystalového oscilátoru, kdy náběh do ustálených kmitů může trvat i desetitisíce opakovacích period. Pak vzniká potřeba opakovaně spouštět právě skončivší analýzu tak, aby program pokračoval v řešení „tam, kde skončil“. Realizace tohoto zdánlivě jednoduchého požadavku je v OrcadPspice velmi komplikovaná a vede přes ukládání výsledků simulace do souboru na disk, ruční modifikaci tohoto souboru a opětovné spuštění simulace, to vše opakováno tak dlouho, dokud se nedosáhne ustáleného stavu. V Micro-Capu existuje zdatný pomocník v této záležitosti, totiž režim, kdy podmínky na konci analýzy jsou automaticky uchovávány a posléze použity jako počáteční podmínky pro následnou analýzu. Nicméně algoritmus automatického nalezení ustáleného stavu chybí všem programům „SPICE-compatible“.

Tranzientní analýza pomocí „SPICE-compatible“ programů může být velmi neefektivní, tj. časově náročná a zatížena chybami, u obvodů, v nichž probíhají současně rychlé i pomalé děje, jako jsou například modulátory (rychlá nosná, pomalý modulační signál) nebo obvody s periodicky řízenými spínači, například spínané DC-DC měniče. Délka výpočetního kroku se totiž musí přizpůsobit rychlému ději, takže například na jednu periodu nízkofrekvenční obálky AM signálu mohou připadat i statisíce výpočetních bodů. Pokud potřebujeme efektivně modelovat obvody tohoto typu, nezbývá než použít některý ze speciálních programů, uvedených v kapitole 5.

5. Na co programy „SPICE-compatible“ nestačí

Existuje několik zdánlivě jednoduchých požadavků na analýzu obvodů z technické praxe, jejichž přímá realizace klasickými programy typu SPICE není možná. Jmenujme například potřebu nalezení kmitočtových charakteristik filtru se spínanými kapacitami (i když v SPICE existuje analýza AC) nebo zjištění šumových poměrů v nelineárních systémech typu směšovač (i když v SPICE existuje analýza NOISE). Jak vyplývá z předchozí kapitoly, SPICE je prakticky nepoužitelný pro simulaci tzv. RF obvodů, které se vyznačují velkým poměrem mezi maximálním a minimálním kmitočtem působících signálů a kde vzniká mj.

potřeba identifikace ustálených stavů. Tento rozpor mezi praktickými potřebami simulace speciálních obvodů na straně jedné a limitacemi programů typu SPICE na straně druhé je řešen dvěma různými přístupy: jednak vznikají speciální jednoúčelové programy, založené většinou na behaviorálním modelování, obsahující nové algoritmy, neslučitelné s výpočetním jádrem SPICE. Druhá cesta je představována vývojem programů „SPICE-like“, tedy programů, poskytujících základní analýzy jako v SPICE a využívajících v podstatě standardních SPICE modelů součástek, jejich výpočetní jádro je však budováno odlišně. Z této skupiny jmenujme programy SpectreRF firmy Cadence Design Systems, Advanced Design System (ADS) od Agilent EEsoft, SP/XL-RF od Avista Design Systems, SmartSpice-RF firmy SILVACO, SSpice („public domain“ programy Univ. California at Berkeley), a CIA z ČVUT Praha. Tyto programy však nejsou volně dostupné a jejich cena většinou přesahuje finanční možnosti individuálního zájemce.

6. Namísto závěru

Namísto klasického závěru dovolte stručné shrnutí: Bez simulačních programů se dnes v elektrotechnice neobejdeme. Je rozumné a nutné pracovat s programy, které jsou „SPICE-compatible“, avšak s vědomím toho, že tyto programy jsou pro některé velmi speciální simulační úlohy nevhodné nebo dokonce nepoužitelné. Rozhodování o tom, do kterého programu optimálně investuji čas a případně peníze tak, aby mně pak dobře sloužil, by mělo probíhat s ohledem na 10 základních kritérií z kapitoly 2. Dosavadní zkušenosti autora tohoto článku směřují k závěru, že oním programem by měl být v podmínkách středního školství program Micro-Cap: jeho evaluační verze je zdarma, ze všech „free“ verzí programů jeho třídy má nejmenší omezení na rozsah analyzovaných obvodů, je SPICE kompatibilní, přičemž poskytuje více možností modelování různých analýz než klasický SPICE, je uživatelsky velmi příjemný. Netrpí některými omezeními standardu SPICE (zákaz nulových hodnot odporů, indukčností a kapacit, problémy s nedefinovanými stejnosměrnými cestami na zem, atd.), které dělají studentům problémy. Je výborným východiskem pro pozdější praktické zvládnutí komerčních produktů typu OrCadPSpice. O programu existuje česká kniha [3] a středoškolské učební texty [4], kde je jednoduchou formou ukázáno, jak vyučovat SPICE prostřednictvím Micro-Capu.

Literatura

- [1] Kielkowski, R.: Inside SPICE. McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [2] Dobeš, J., Žalud, V.: Moderní radiotechnika. BEN technická literatura, 2006, 768 s. (Obsahuje popis modelování obvodů v programu CIA).
- [3] Biolek, D.: Řešíme elektronické obvody aneb kniha o jejich analýze. BEN technická literatura, 2004, 520 s. (Obsahuje podrobný popis principů práce s programy „SPICE-compatible“ se zaměřením na Micro-Cap).
- [4] Biolek, Z.: Úvod do SPICE pomocí programu MicroCap. Učební texty SPŠE v Rožnově p.R. SENSIT HOLDING s.r.o., 2004, 34 s.
- [5] Podrobná elektronická skripta a další učební texty na OrcadPSpice a Micro-Cap: <http://user.unob.cz/biolek>
- [6] Láníček, R.: Simulační programy pro elektroniku. BEN technická literatura, 2000, 113 s.
- [7] Krejčířík, A., Burian, Z.: .Simuluj! Ben technická literatura, 2001, 291 s. (Popis SPICE).
- [8] www stránka OrcadPSpice: <http://www.cadence.com/products/orcad/index.aspx>
- [9] www stránka Micro-Capu: <http://www.spectrum/soft.com>