Použití programu LTspice IV
pro analýzu a simulaci elektronických obvodů I.

autor: Ondřej Pavelka

V předchozím časopisu EEM 1/2009 jsem v krátkém článku na příkladu ukázal použití simulačního programu LTspice IV ve zjednodušené aplikaci spínaného zdroje řízeného mikrokontrolérem Atmel. Tento simulační a analytický program jsem vybral jako vhodný kompromis mezi cenou (je zdarma) a možnostmi, které poskytuje. Program lze získat na adrese [1] dokonce i bez nutného uvádění osobních údajů. Protože se jedná o program od firmy Linear Technology, najdeme ve vzorových zapojeních zejména aplikace od této firmy – spínané zdroje. Nic však nebrání tomu, abychom do zapojení použili jiné obvody, známe-li jejich vnitřní zapojení, popř. máme k dispozici jejich model popsaný ve formátu SPICE.

Na začátek bude dobré si vysvětlit a ujasnit některé pojmy, které nás budou dále provázet. Začněme tedy u pojmu analýza. Analýzou, dle [2], rozumíme „konkrétní metody získávání elektrických charakteristik obvodů z jejich modelů“, což nejčastěji bývá stejnosměrná analýza, nebo kmitočtová analýza – hledání kmitočtové přenosové charakteristiky analyzovaného obvodu. Analýzu tedy použijeme, když hledáme určitou vlastnost obvodu. Tedy to, co nás konkrétně zajímá. Protože analýza probíhá na počítači, je potřeba analyzovaný obvod, který máme např. na papíře, přeložit do řeči, které počítač rozumí. Není až takový problém označit si místa spojení součástek, tzv. uzly, nějakými značkami a dodat tabulku, které prvky jsou zapojeny mezi konkrétními uzly. Tímto způsobem vytvoříme tzv. model obvodu. Tento model zapojení se skládá z elementárních modelů elektronických prvků, což jsou např. pasivní elektronické prvky jako rezistory (R), kondenzátory (C) a induktory (L), ale také např. aktivní prvky jako tranzistory (T) nebo operační zesilovače (i když operační zesilovač lze zase nízkoúrovňově modelovat za použití R, C a T). Tyto elementární modely existují za použití matematického popisu. Sestavení modelu zapojení není tedy nic jiného, než sestavení správné soustavy rovnic na základě rovnic elementárních prvků a Kirchhoffových zákonů aplikovaných na uzly zapojení.

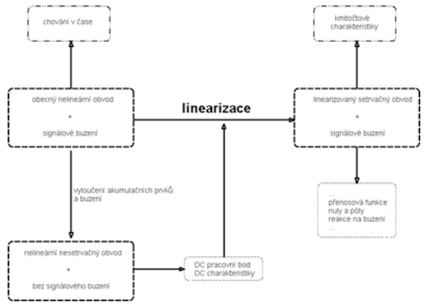
Podstatnou věcí je, že pro jednu součástku může existovat několik modelů lišících se složitostí a tím i nárokem na výpočetní výkon řešitele. Pokud budeme analyzovat zapojení pomocí tužky a papíru, budeme používat maximálně zjednodušené modely součástek. Pokud máme k dispozici počítač, a to je dnes již pravidlo, můžeme si dovolit používat modely složitější, zohledňující více parametrů součástek, parazitních jevů a vlivů reálných vlastností součástek. Pokud máme model již dostatečně složitý a komplexní, můžeme ho použít k simulaci reálného chování za určitých podmínek. Jako příklad může sloužit sledování vlivu teploty okolí na kmitočet oscilátoru, kde okolní teplota bude ovlivňovat zejména polovodičové součástky, např. tranzistory. Známe tedy již všechny tři pojmy: modelování – analýza – simulace.

Krátké shrnutí těchto pojmů uvádí [2]:

- **Modelování** je proces popisování reality omezenými prostředky, které máme k dispozici. Výsledkem tohoto procesu je model originálního objektu
- **Analýza** je jednorázová činnost, kdy zkoumáním modelu se pokoušíme zjistit určitou vlastnost originálu.
- **Simulace** je činnost, kdy analýzou modelu se pokoušíme o získání co nejvěrnějšího obrazu chování originálu za přesně stanovených podmínek

Co nám tedy moderní simulační a analytické programy mohou nabídnout? V zásadě jsou to tři základní druhy analýz obvodů. Názorný obrázek – obr.1, kde jsou vidět vztahy a souvislosti mezi jednotlivými typy analýz, pochází z [2].

Výchozím bodem většiny analýz je nalezení tzv. stejnosměrného pracovního bodu (někdy označovaného jako „DC Operating Point“, v LTspice IV je analýza nazvána „DC op pnt“). Pod stejnosměrným pracovním bodem zapojení si můžeme představit výpočet stejnosměrných napětí ve všech uzlech obvodu a výpočet proudu všemi větvemi po připojení ke konkrétnímu napájecímu zdroji. Při této analýze jsou všechny zdroje střídavého signálu vyřazeny z činnosti, neboť jsou nahrazeny jejich DC vlastnostmi (pokud je to pro analýzu třeba), dále jsou z DC analýzy vyjmuty všechny akumulační prvky (cívky a kondenzátory), které nemají na stejnosměrný pracovní bod žádný vliv. Dle obr.1 vznikne model nesetrvačného nelineárního obvodu bez signálového buzení, který můžeme popsat soustavou nelineárních algebraických rovnic. Pro řešení této soustavy se používají numerické iterační metody.



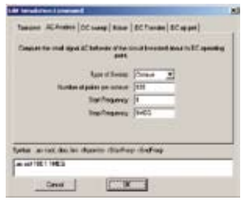
Obr.1. **Schematické znázornění procesů při základních typech analýz elektrického obvodu**

Dalším typem stejnosměrné analýzy je analýza statických charakteristik, nazývaná „DC analysis“, v případě LTspice IV je to možnost „DC sweep“. Tato analýza patří mezi velmi náročné, neboť dochází k „rozmítání“, tedy ke změnám napětí stejnosměrných zdrojů v obvodu a příslušným výpočtům stavů napětí a proudů v obvodu pro každou tuto změnu. Při stejnosměrné analýze pozorujeme vliv nelinearit součástek, jako např. převodních charakteristik tranzistorů, voltampérových charakteristik diod a dalších nelineárních prvků v obvodu. Programy bývají většinou omezeny počtem těchto budících zdrojů v zapojení, LTspice IV umožňuje měnit napětí na max. třech nezávislých DC zdrojích. Pokud náš obvod obsahuje více zdrojů, musíme provést více analýz tak, že se snažíme buď nalézt zdroj, jehož změna napětí v obvodu má minimální vliv na chování, nebo zbylé zdroje považujeme za konstantní a změnou rozmítaných zdrojů se snažíme najít matematickou závislost napětí, popř. proudu v kritické části zapojení.

V případě analýzy kmitočtových vlastností filtrů, popřípadě zesilovačů, používáme k hledání kmitočtové charakteristiky obvodu tzv. „AC Analysis“, nazvanou stejně ve zmiňovaném programu. Při tomto požadavku na analýzu vytvoří nejprve analyzátor tzv. linearizovaný model obvodu (obr.1), neboli linearizaci charakteristik v okolí daného pracovního bodu, tedy bodu nastaveném připojenými DC zdroji (těch může být nyní v obvodu nekonečno) a potom se snaží buď numericky nebo symbolicky obvod řešit. Výsledkem pak je přenosová funkce obvodu, popř. nuly a póly přenosu.

Možnosti LTspice IV

Nyní se podíváme konkrétněji na program LTspice. Pokud si tento program otevřete, pak v položce menu Simulation (obr. 2) vyberte Edit Simulation Command (obr. 3). Pro analýzu a simulaci obvodu otevřeného schématu máte



Obr.2. Obr.3.

k dispozici dále popsané možnosti. Po zvolení parametrů simulace je pro spuštění nutné stisknout Run.
Použijte :

- **DC operating point** pro zapojení napájené stejnosměrným napětím a zjištění stejnosměrných napětí a proudů v simulovaném obvodu
- **Transient analysis** pro zobrazení časového průběhu napětí nebo proudu, pro zjištění, zda je průběh signálu deformován nebo zkreslen – můžete využít spektrální (FFT) analýzy signálu. Lze analyzovat i dodávaný výkon, popř. ztráty
- **AC analysis** pro zobrazení kmitočtových přenosových charakteristik zapojení, vhodné zejména pro kmitočtovou analýzu zesilovačů, útlumových článků, filtrů jak aktivních, tak i pasivních. Přenos se zobrazuje relativně v [dB] vztažených k 1V.

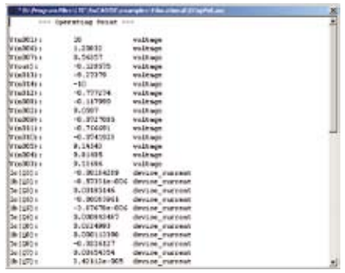
Parametry simulace:
DC op point - nenastavují se žádné parametry. Objeví se obdélníček, který přenesete do schématu a někam vložíte - pokud už máte v zapojení nějaké poznámky nebo SPICE direktivy, tak třeba tam. Po stisknutí Run se objeví okno s vypočítanými stejnosměrnými hodnotami napětí

Obr.4.

v uzlech. Jednodušší je okno zavřít a kurzorem si v zapojení ukázat na uzly, které nás zajímají. Ve spodním (stavovém) řádku programu (obr.4) se zobrazí číslo uzlu, napětí, popřípadě při ukázání na součástku se ukáže proud, v případě rezistorů a zdrojů také výkon.

Příklad: otevřete si pomocí File -> Open z adresáře Program Files->LTC->SwCADIII->Examples->Educational soubor “DCopPnt.asc”. Jedná se o zapojení zesi-

lovače napájeného symetrickým napětím. Vyzkoušíme výpočet stejnosměrného pracovního bodu zapojení. Zapojení je již pro analýzu připraveno, neboť obsahuje text (direktivu) „.ob“. Stiskneme tlačítko „Run“, popř. zvolíme menu Simulate a příkaz Run. Zobrazí se tabulka – obr.5. V této tabulce je seznam všech napěťových uzlů

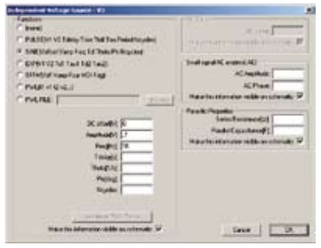


Obr.5.

a proudových smyček, které jsou v obvodu vytvořeny. Stejnosměrný pracovní bod je spočten, neboť známe napájecí napětí – je symetrické – důkazem jsou hodnoty napětí v bodech V(n001) = 10V a V(n014)=-10V, mírná nesymetrie výstupního napětí, které by mělo být nulové, je znatelná na výstupu – zde popsaném jako „out“, cca V(out)=-0,13V. Proudy jednotlivými součástkami jsou označeny přímo symbolickým označením součástky, např. proud zatěžovacím rezistorem R14 najdeme přímo jako I(R14)=-0,016A – viz obr. 4

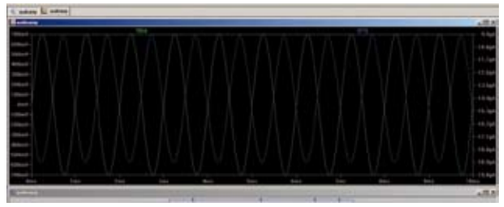
Transient Analysis - pro úspěšnou simulaci je třeba nastavit minimálně konec simulace, popřípadě minimální časový krok. V zapojení musí být přítomen alespoň jeden zdroj s proměnným výstupním signálem, většinou je typ signálu „sinus“, u kterého je specifikována amplituda a frekvence. Pravým kliknutím na uvedený zdroj můžeme měnit jeho parametry. Po spuštění simulace se okno se schématem zmenší a vykreslí se nové prázdné okno pro zobrazení časových průběhů.

Příklad: otevřete si pomocí File -> Open z adresáře Program Files->LTC->SwCADIII->Examples->Educational soubor “audioamp.asc”. Jedná se o zapojení zesilovače z předchozího příkladu, nyní je ovšem vstup zesi-



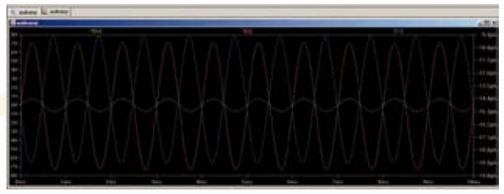
Obr.6.

lovače napájen pomocí zdroje sinusového signálu V3 o amplitudě 0,7V a frekvenci 1kHz s nulovým DC ofsetem (posunem), ostatně jak se můžete přesvědčit pravým kliknutím na něj – obr. 6. Spustíme simulaci příkazem Run a výsledkem je prozatím prázdné černé nové okno. Nyní najedeme do schématu např. na zmiňovaný zdroj V3, kurzor se změní z kříže na proudovou sondu a levým klinutím se v tomto novém okně zobrazí proud tekoucí zdrojem



Obr.7.

V3. Protože nás však zajímá spíše napětí, popojedeme kurzorem o něco výše – na značku IN, popř. na spojovací vodič mezi zdrojem V3 a rezistorem R1. Symbol proudové sondy se změní na napěťovou sondu a po levém kliku se do již stávajícího časového průběhu proudu zdrojem zobrazí i napětí vztažené k uzlu se symbolem uzemnění, pokud si nestanovíme referenční bod jinde. Zde je již vidět – obr. 7 – průběh napětí o amplitudě 0,7V. A protože nám to pořád nestačí, přidáme si to téhož obrázku i průběh výstupního napětí – tedy napětí v uzlu „A“ (tento uzel je



Obr.8.

pojmenován na vývodu pomocného zdroje V4). Vše v jednom vidíte na obr. 8. Vlevo je osa Y popsána jako napěťová, vpravo jako proudová.

Tipy pro časovou analýzu

V okně se schématem :

1. kliknutím na spoj nebo uzel (je zobrazena napěťová sonda) se zobrazí v okně s průběhy příslušná časová směna napětí
2. kliknutím na součástku (je zobrazena proudová sonda) se zobrazí příslušný průběh proudu
3. Držením klávesy Alt a kliknutím na součástku se objeví symbol teploměru a zobrazí se průběh výkonové ztráty na součástce – obr. 9 (odstraněný je průběh proudu zdrojem V3)

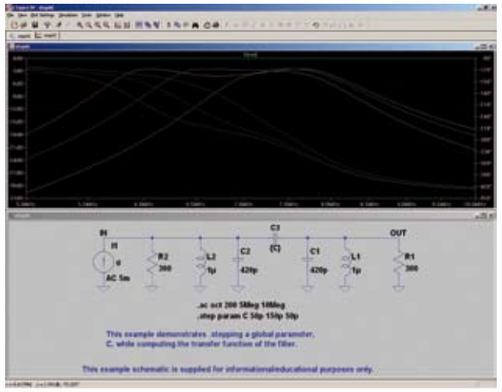
V okně s průběhy :

1. Levým kliknutím a držením můžeme označit oblast, která se nám po uvolnění tlačítka zvětší
2. Pokud kurzorem najedeme v horní části na názvem zobrazeného průběhu a klikneme levým tlačítkem za současného držení Ctrl, zobrazí se k příslušnému průběhu informace o RMS a střední hodnotě v zobrazeném intervalu – obr. 10

Obr.10.

3. Levým klikem za současného držení Alt klávesy se v příslušném průběhu zobrazí kurzor a v pravém spodním rohu obrazovky i tabulka s hodnotami v místě kurzoru. Pravým klikem na název průběhu v horní části zobrazí nabídku, kde je možné nechat si zobrazit první, druhý, popř. oba kurzory a pomocí nich si označovat zajímavá místa v časovém průběhu a odečítat napětí nebo časy.
4. Pravým klikem na název průběhu zobrazí volbu, kde můžeme na průběh aplikovat i matematické funkce, můžeme počítat druhou mocninu napětí, nebo podílem výstupního a vstupního napětí analyzovat vstupní impedanci zesilovače.

AC analysis - pro simulaci je třeba správně nastavit způ-



Obr.11.

sob zobrazení kmitočtové osy , nejčastěji volíme Linear nebo Octave pro logaritmické zobrazení – je v mnoha případech názornější. Dále zvolíme počet bodů na oktávu (tedy mezi body o dvojnásobném kmitočtu) a nejnižší (Start Frequency) a nejvyšší kmitočet (Stop Frequency) pro výpočet. Dále se v zapojení musí nacházet zdroj signálu s parametrem “Small signal AC analysis“, tedy napětím použitém pro AC analýzu, většinou se používá 1V, ale může být dle uvážení. Analýza se opět spustí příkazem Run.

Příklad: otevřete si pomocí File -> Open z adresáře Program Files->LTC->SwCADIII->Examples->Educational soubor “stepAC.asc”. Jedná se o schéma LC filtru, konkrétně typu pásmová propust.Je zde ukázána další možnost programu LTspice, a to možnost měnit parametry součástky během simulace, a tak zobrazit změny v závislosti na tomto parametru. V našem příkladu budeme měnit kapacitu kondenzátoru C3 ve třech krocích s hodnotami od 50pF do 150pF s krokem 50pF. Výsledkem jsou 3 průběhy přenosu včetně změny fáze signálu – obr. 11

Tento krátký úvod měl ukázat podstatné vlastnosti tohoto jednoduchého a skvělého programu. Nyní už známe možnosti, které program má a příště zkusíme vytvořit vlastní součástku – schematickou značku, nakreslit vlastní schéma obvodu a podrobit ho podrobné analýze za použití výše popsaných nástrojů. □

Ondřej Pavelka
vyvoj@onpa.cz
www.onpa.cz

Literatura a odkazy :
[1] Linear technology, program LTspice IV, freeware, http://www.linear.com/
[2] Biolek, Dalibor: Modelování a počítačová simulace - přednášky, VUT skriptum, Brno 2003