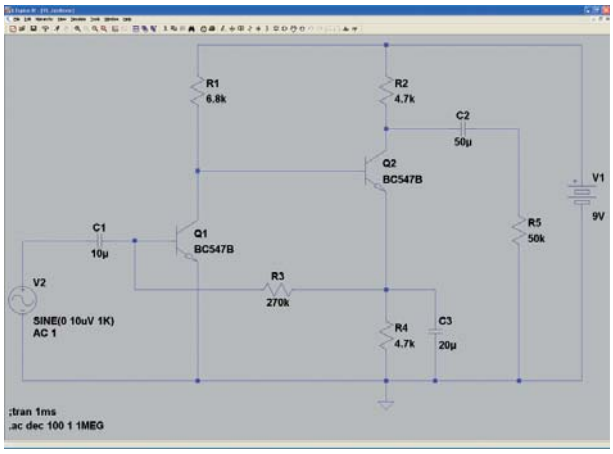
Použití programu LTspice IV pro analýzu a simulaci elektronických obvodů III.

autor: Ondřej Pavelka

A jsme na konci našeho seriálu o simulaci elektronických obvodů pomocí simulačního programu LTspice IV. V předchozích dílech jsme popsali metody a druhy simulace, zkoušeli zapojení překreslit a zkusili jsme si simulovat chování jednoduchého dvoustupňového stejnosměrně vázaného nízkofrekvenčního zesilovače při AC analýze, tedy z hlediska frekvenční (přenosové) charakteristiky. Zkusili jsme taky poněkud složitěji a nepřímo spočítat teoretický odhad nízkofrekvenčního zkreslení.
V posledním dílu zkusíme během simulace měnit parametry součástek a pozorovat vliv těchto změn na výslednou přenosovou charakteristiku (když už máme z minulého dílu nakreslené a uložené zapojení NF zesilovače se stejnosměrnou vazbou mezi stupni), vypočítáme vstupní a výstupní odpor zesilovače, zkusíme DC, tedy stejnosměrnou analýzu pracovního bodu zapojení na příkladu jednoho tranzistoru.

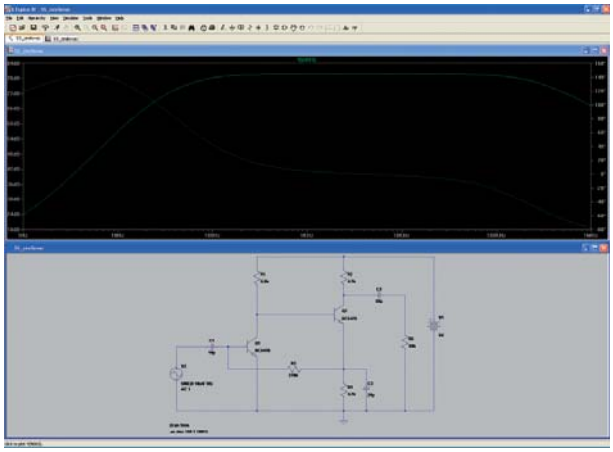
Změna parametrů prvků obvodu

Spustíme program LTspice IV a otevřeme uložené schéma tranzistorového zesilovače z předchozího dílu našeho seriálu – obr. 1. Nyní ověříme, zda máme vše z minula připravené – zvolíme v menu Simulate -> Run a po rozdělení obrazovky na dvě části (spodní část obsahuje schéma, v horní části je náš pomyslný osciloskop) ukážeme „sondou“ na spojnici kondenzátoru C2 a zatěžovacího rezistoru R5. Po kliknutí se nám v horní části obrazovky ukáže přenosová funkce zesilovače – její amplitudová i fázová charakteristika. Pokud je vše jako na obr. 2, můžeme přistoupit k dalším experimentům. Pokud



Obr. 1.

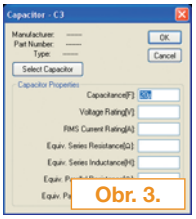
je něco zásadně jinak než na obr. 2, projděte si prosím předchozí dvě části seriálu [3] v EEM, zejména 2. díl.

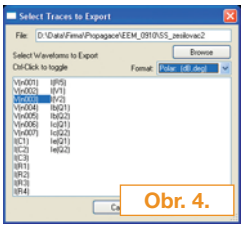


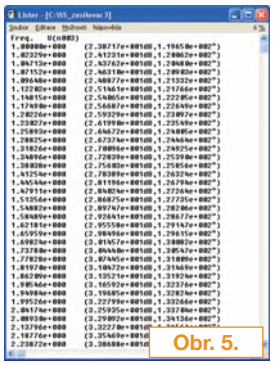
Obr. 2.

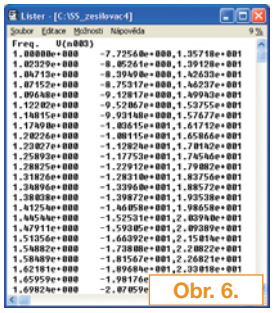
Protože se jedná o NF zesilovač, slouží hlavně k přenosu kmitočtů ve slyšitelném, tedy akustickém pásmu. Z teorie obvodů a také praktických zkušeností je zřejmé, že spodní přenášené kmitočty jsou ovlivňovány jednak vazebními kapacitami – v našem případě C1 a C2, které tvoří příslušné horní propusti se vstupními, popřípadě výstupními impedancemi dalších stupňů. Spodní přenášené kmitočty však také zásadně ovlivňuje kapacita C3 zapojená paralelně ke zpětnovazebnímu rezistoru v emitoru tranzistoru Q2. Asi všichni správně předpokládáme, že tato kapacita zvyšuje zesílení zesilovače při zpracování střídavých signálů, neboť pro tyto střídavé signály představuje zkrat a rezistor R4 se tak neuplatňuje. Selským rozumem a znalostí obvodové techniky je také zřejmý účinek – čím větší bude kapacita C4, tím se bude jevit jako zkrat pro tím nižší kmitočty.

Pojďme tedy tento předpoklad ověřit v praxi, tedy spíše v „simulované“ praxi. Jednou metodou by bylo v obvodu ručně měnit kapacitu kondenzátoru – pro připomenutí – ukážeme kurzorem ve schématu na součástku a stiskneme pravé tlačítko myši – objeví se dialog obr. 3, kde můžeme změnit proměnné parametry součástky, v našem případě zvětšit kapacitu na jinou hodnotu, např. na 30 µF. Bohužel se změna nepromítne ihned v zobrazené charakteristice, je potřeba simulaci znovu spustit. Tímto způsobem si tedy můžeme nasimulovat kolik průběhů chceme, uložit si je do TXT souboru. Postup je následující: File ->Export a objeví se dialogové okno jako na obr. 4 – zvolíme si uzel, z něhož budeme ukládat průběh napětí – v případě na obrázku je to uzel V(n003). Připomínám, že pro zobrazení nabídky pro „Export“ musí být aktivní okno se zobrazeným průběhem. Zvolíme si ještě formát výstupních souřadnic – zda polární, charakterizované amplitudou a fází, nebo kartézské s oddělenou reálnou a imaginární částí čísla. Otevřený soubor TXT v notepadu je na obr. 5. Pro jeho další zpracování je nutné „přetransformovat“ jej do vhodnější podoby, např. použitím programu Excel a možností importu. Převedení amplitudy je relativně snadné, horší je to s fází. Někomu bude možná proto vyhovovat export ve formátu reálné a imaginární složky, ukázka obr. 6. Import do Excelu je snadnější, potom je ale nutné si hodnoty amplitudy a fáze z těchto kartézských hodnot vypočítat v Excelu vzorcem. Důležité je, že existuje možnost pro další zpracování dat. Jen na připomenutí – označení uzlu, který nás zajímá, zjistíme pomocí kurzoru ve schématu, kdy se označení uzlu ukazuje ve spodním stavovém řádku programu. V Excelu je potom již snadné z importovaných a upravených hodnot vykreslit např. 10 průběhů do jednoho grafu.


Obr. 3.


Obr. 4.

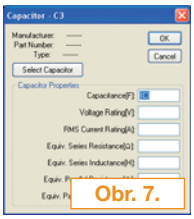

Obr. 5.

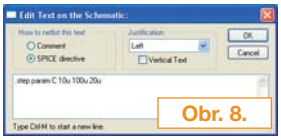

Obr. 6.

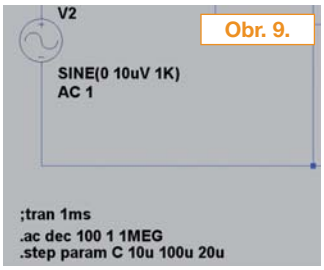
Určitě však tušíte, že jsem tento postup uvedl jako alternativu k něčemu méně pracnému. Ano, je to tak, neboť člověk je líný a přiznejme si, že pokud změníme po exportu 10 průběhů nějakou další součástku, musíme celou anabázi opakovat znovu. A to se nám v dnešním spěchu a krátkém čase na vývoj opravdu nehodí.

LTspice IV, podobně jako další „složitější a sofistikovanější“ programy umožňuje směnu parametrů součástek. Tato změna může být buď automatická podle zadaného rozsahu hodnot a příslušného kroku, tak výčtem konkrétních hodnot. Druhá možnost se použije v případě, že chceme např. zkoušet chování zapojení pro hodnoty součástek, které se vyrábějí, popř. které máme k dispozici. Zkusme si tedy pohrát s velikostí kondenzátoru C3 a pozorováním změn na výslednou přenosovou charakteristiku zesilovače.

Nejprve změníme zápis hodnoty kondenzátoru C3. Najedeme kurzorem nad C3 a pravým tlačítkem otevřeme příslušné dialogové okno. Zde změníme původní uvedenou hodnotu 20 µF na zápis {C} (obr. 7), kde se C stává tzv. parametrem. Můžeme si samozřejmě vybrat libovolné označení. Dále umístíme do schématu kamkoli pomocí menu Edit ->SPICE Directive zápis „.step param C 10u 100u 20u“ – obr. 8, umístění na schématu je uvedeno na obr. 9 – místo ale není důležité, zápis může být umístěn libovolně.

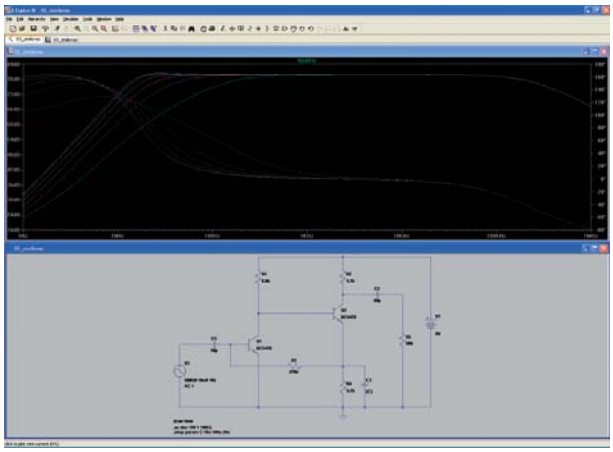

Obr. 7.

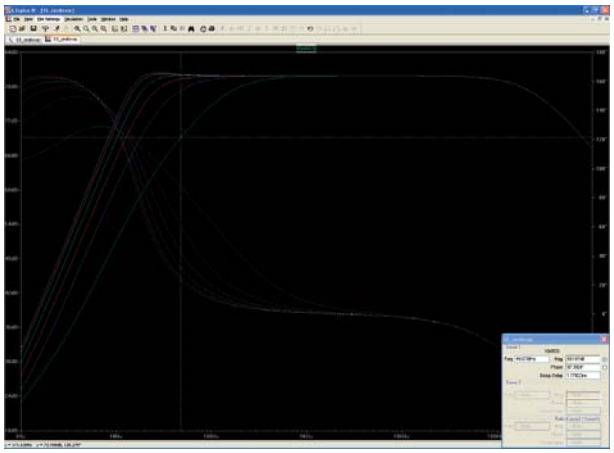

Obr. 8.



Obr. 9.

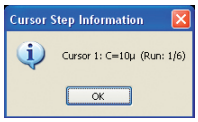
Co přesně tento zápis simulačnímu programu sděluje? Je to přesně toto: proveď analýzu zapojení tolikrát, kolikrát změníš parametr „C“ od výchozí hodnoty 10 uF do konečné hodnoty 100uF v kroku 20 uF. V konečném důsledku se tedy analýza provede pro kondenzátor C3 o velikosti kapacity 10 uF, 30 uF, 50 uF, 70 uF, 90 uF a 100 uF. Dostaneme 6 průběhů. Tak to zkusíme: Simulation->Run a uvidíme pravděpodobně obrázek podobný obr. 10. V okně s výsledky simulace rozlišíme podle různých barev 6 průběhů, jak jsme předpokládali. Teď bude trošku složitější se ve výsledku orientovat, ale opravdu jen trošku. Zvětšíme si okno s výsledky na celou obrazovku a klikneme kurzorem v horní části grafu na název uzlu, např. V(n003) tak, aby se nám jako na obr. 11 zobrazil přerušovanou


Obr. 10.



Obr. 11.

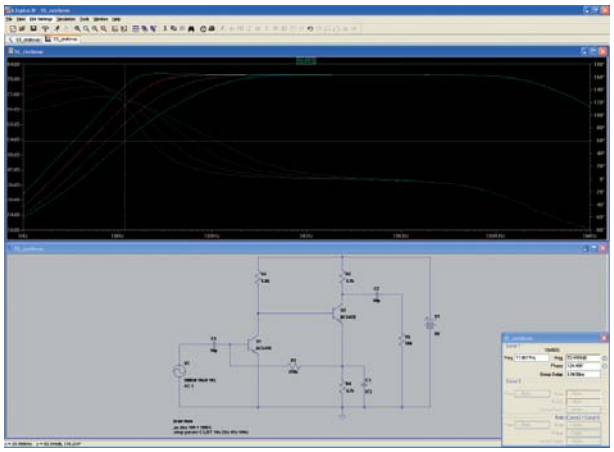
bílou čárou kurzor a v pravém spodním okně potom dialog s aktuálními hodnotami odečítanými z průběhu. Zatím nevíme, jakému parametru přísluší konkrétní barevný průběh. To zjistíme tak, že na kurzoru (průsečíku přerušovaných čar, po najetí kurzoru myši se zobrazí číslo kurzoru) stiskneme pravé tlačítko, zobrazí se okno – obr. 12, kde vidíme číslo kurzoru, hodnotu parametru a číslo běhu výpočtu simulace. Obr. 12 říká, že se jedná o průběh při nastavení parametru C=10 uF a že je to první výpočet simulace z celkových 6. Pomocí klávesových šipek nahoru a dolu se přepínáme mezi průběhy pro jednotlivé parametry. Kmitočet, tedy osa X, zůstává stejný a můžeme tak přímo odečítat přenos zesilovače při změněných parametrech. Jen tak pro zajímavost: v tomto konkrétním případě můžeme pozorovat v okolí kmitočtů 25–30 Hz mírný vzrůst zesílení pro kondenzátory s kapacitou větší než 90 uF. Zkuste cvičně ještě zvýšit kapacitu kondenzátoru C3.



Obr. 12.

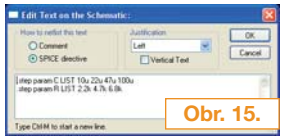
Pokud chceme simulovat chování zapojení pro konkrétní hodnoty, např. 10 uF, 22 uF, 47 uF a 100 uF, tedy hodnoty velikostí kapacit, které zakoupíme v běžném obchodě s elektrosoučástkami, vypomůžeme si mírně změněnou direktivou: „.step param C LIST 10u 22u 47u 100u“ – obr. 13. Po spuštění simulace dostane výsledek – obr. 14 – celkem 4 barevně odlišené průběhy pro konkrétní hodnoty součástek.

Obr. 13.

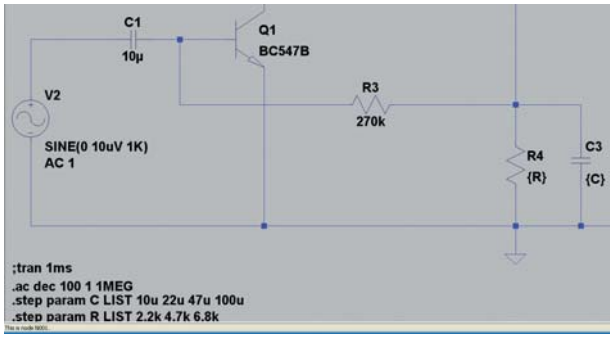


Obr. 14.

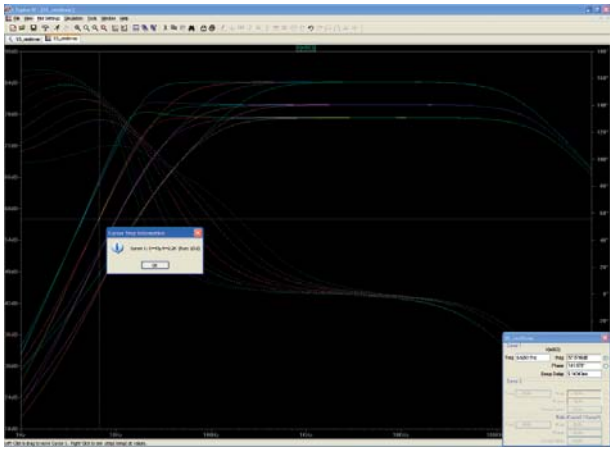
A zkusíme ještě více. Proč měnit jen parametry kondenzátoru C3? Zesílení určuje také R4. Což takhle měnit oba parametry. Jde to? Ano, můžeme. Upravme tedy hodnotu R4 z původních 4,7 kΩ na parametr {R} a zadejme tento parametr s kroky 2,2 kΩ 4,7 kΩ a 6,8 kΩ do schématu. K direktivě pro změnu parametru C přidáme ještě další pro změnu parametru R podle obr. 15. Důležitá část schématu bude vypadat podle obr. 16. Po spuštění simulace, kliknutí na spoj mezi C2 a R5 a zvětšení okna s výsledky a kliknutím na kurzor dostaneme obr. 17. Malý dialog říká, kterým nastaveným parametrům průběh odpovídá a že máme celkem 12 průběhů. Letmým pohledem na výsledné grafy vidíme, že průběh v oblasti nízkých kmitočtů je ovlivňován velikostí kondenzátoru C3. který nemá zásadní vliv na zesílení kmitočtů v přenosovém pásmu. Zesílení v tomto rozsahu kmitočtů je naopak silně závislé na velikosti rezistoru R4 a to tak, že se snižující se hodnotou R4 zesílení roste, avšak přenášené pásmu se zužuje. Něco za něco. Ale rozhodně je lepší se před stavbou zesilovače seznámit



Obr. 15.



Obr. 16.

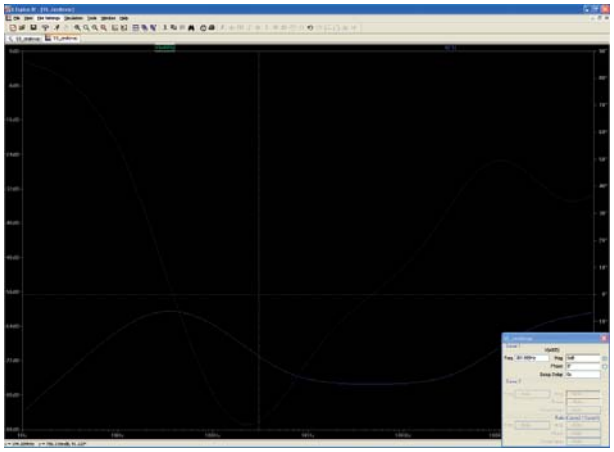


Obr. 17.

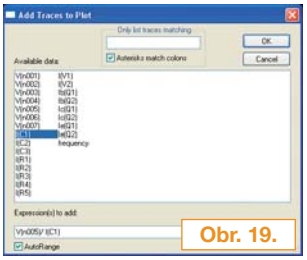
s jeho vlastnostmi tímto nedestruktivním způsobem. Jistě tak oceníte přínos této jednoduché analýzy při změně hodnot součástek.

Výpočet vstupní a výstupní impedance zesilovače

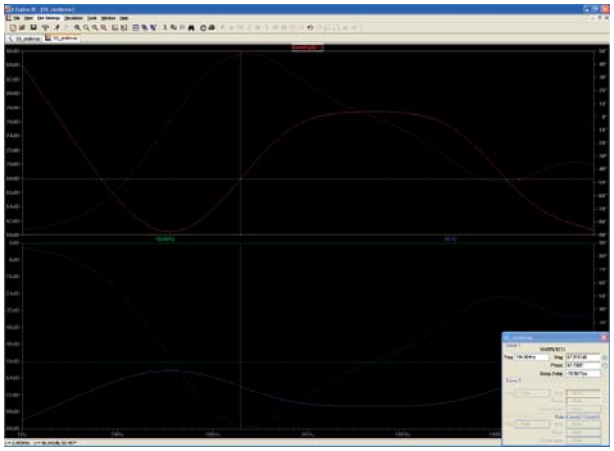
Protože v [2] jsou zmíněny i tyto parametry, zkusme je pomocí našeho simulačního programu ověřit. Vyjdeme z definice vstupní, popř. výstupní impedance, tedy že $Z_{VST} = U_{VST} / I_{VST}$ podobně je to i s výstupní impedancí. Pro určení vstupního odporu (impedance) budeme tedy potřebovat znát proud tekoucí kondenzátorem C1 a napětí na zdroji V2. Obojí můžeme změřit sondami, po simulaci původního zapojení (schématu), kde nejsou měněné parametry C3 a R4 dostaneme napětí a proud vstupem jako na obr. 18 – po kliknutí na uzel (v mém případě) V(n005) a kondenzátor C1 (měříme proud). Napětí je vztaženo k 0 dB – to zůstává po celý kmitočtový rozsah neměnné, proud kondenzátorem (na obr. 18 znázorněn modře) je však již znatelně kmitočtově závislý. Pro výpočet vstupní impedance zbývá poslední krok – zadání vztahu pro výpočet do grafu. Aby nebyl graf nepřehledný, zobrazíme si průběh vstupní impedance do nového grafu. Kdekoli na grafu klikneme pravým tlačítkem a z nabídky zvolíme „Add Plot Pane“. Obrazovka (graf) se rozdělí na dvě horizontální části, ta horní je zatím prázdná. Najedeme kurzorem myši nad nově vytvořenou plochu (tam, kde je normálně zobrazen název uzlu) a klikneme pravým tlačítkem. Vybereme si volbu „Add trace“, popř. stiskneme Ctrl+A. V zobrazeném okně ukážeme do spodní linky „Expression(s) to add“ a z „Available data“ vybereme V(n005) (tedy napětí na zdroji), napíšeme „/“ a za něj umístíme I(C1), tedy proud kondenzátorem C1. Dostaneme obr. 20. Matoucí je zde osa v [dB], když očekáváme Ω. Není problém – LTspice automaticky zvolil měřítko dle hodnot parametrů ve výrazu. Najedeme kurzorem myši vlevo na osu označenou v [dB] a stiskneme levé tlačítko. Zobrazí se dialog – obr. 21. Zvolíme „Representation“ jako „linear“ a stiskneme OK. Hned se nám osa změní a je označena v [kΩ] – obr. 22. Můžeme tedy vidět závislost vstupního odporu tak, jak ji známe. Podíváme-li se do [2] nebo [3], autor zapojení mluví o vstupní impedanci cca 3,9 kΩ. Z naší simulace je patrné, že pod kmitočtem cca 350 Hz klesá vstupní impedance až na cca 1 kΩ na kmitočtu 30 Hz. Na opačném konci spektra klesne pod 3,9 kΩ až na kmitočtech vyšších než 62 kHz.



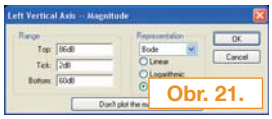
Obr. 18.



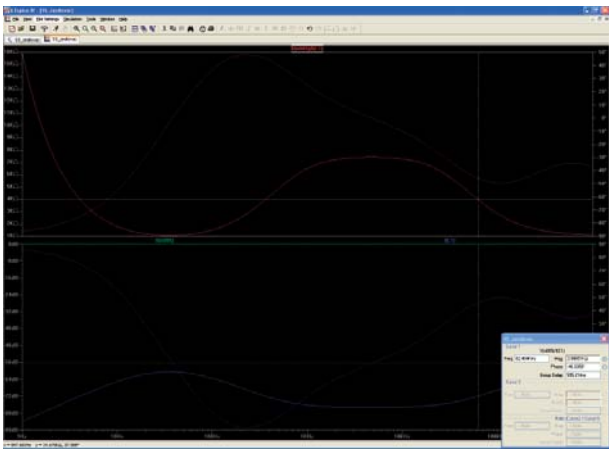
Obr. 19.



Obr. 20.



Obr. 21.



Obr. 22.

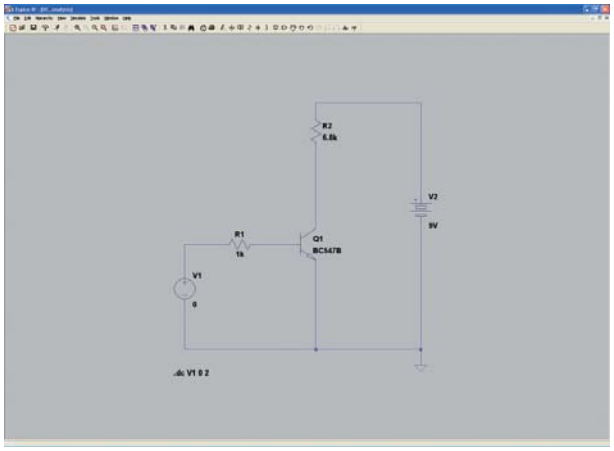
Měření výstupní impedance si zjednodušíme znalostí o tranzistorových stupních a to překreslením schématu na obr. 1 do náhradního schématu pro střídavý signál. Taktéž můžeme uvažovat, že do zátěže poteče pouze proud přes R2. Z toho všeho vyplývá, že výstupní impedance zesilovače je poměrně přesně rovna velikosti R2 a je kmitočtově nezávislá.

Ještě jedno malé upozornění – vstupní zdroj signálu se chová jako ideální, má nulový vnitřní odpor, takže vazební kondenzátor je jakoby uzemněn. Reálný zdroj napětí má určitou výstupní impedanci, která bude ovlivňovat kmitočtově i vstupní část. Totéž platí i na výstupní straně zesilovače, který nepracuje ani do zkratu, ani do nekonečné impedance, ale do odporu R5. V běžném zapojení předzesilovače však bude následovat další zesilovací stupeň, který nemá jen reálnou, ale i imaginární část

impedance, čímž se naše simulované průběhy budou opět o něco lišit. Mějme proto na paměti tyto skutečnosti. Samozřejmě můžeme zkusit jako výstupní (zatěžovací) rezistor použít nějaký matematický model popisující chování následujícího stupně. To nás opět přiblíží skutečnému řešení problému.

Stejnosměrná (DC) analýza a pracovní bod

Posledním typem analýzy je stejnosměrná analýza. Používá se pro simulaci zapojení napájeném stejnosměrným signálem, např. pro nastavení klidových pracovních bodů. Znalostmi z předchozího dílu nakresleme zapojení jako je na obr. 23. Základ pochází z předchozího příkladu, tranzistor Q1 zůstal BC547B, pouze byl vyměněn vstupní

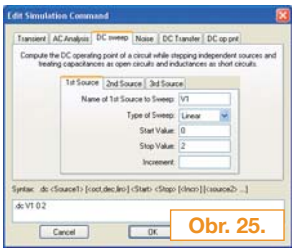


Obr. 23.

zdroj signálu – najdete ho v adresáři „lib“, název „voltage“. Zkontrolujte označení zdroje a baterie – V1 a V2, rezistorů R1 a R2, ať se to v popisu potom neplete. Stejnosměrnému zdroji V1 nastavte pravým tlačítkem napětí 0 V – obr. 24. Můžete si zkusit stisknout tlačítko „Advanced“ – uvidíte stejný dialog jako pro nastavení AC zdroje. Z toho vyplývá, že je použit stejný mechanismus – model, pouze symboly jsou jiné.

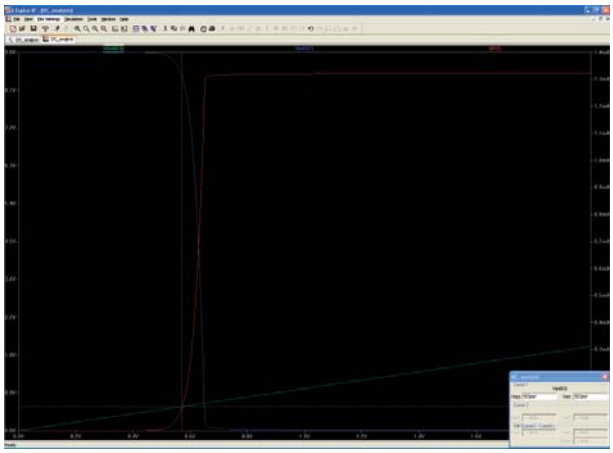
Obr. 24.

Pokud je zapojení zkontrolováno, spustíme simulaci: „Simulate“ – „Run“ a objeví se dialog – obr. 25. Nastavíme tedy jako rozmítaný (proměnný) zdroj V1, změnu napětí „Linear“, počáteční hodnotu 0 V a konečnou 2 V. Vidíme, že do schématu přibyl řádek „.dc V1 0 2“. Opět se obrazovka rozdělí na dvě části. Postupně klikneme na spojnici V1 a R1 – v mém případě uzel (n003) a vidíme lineárně rostoucí napětí od 0 do 2 V. Protože máme jako rozmítaný zdroj V1, bude osa X vždy obsahovat rozsah rozmítání pro tento zdroj, tedy 0 až 2 V. Dále přidáme napětí na kolektoru, v mém případě je to uzel (n002). Zde je patrné otevření tranzistoru okolo 0,6 V na zdroji V1. Pro zajímavost si ještě přidáme proud kolektorem tranzistoru, klikneme tedy na symbol rezistoru. Závislost nám ukáže nejdříve nulový proud kolektorem, po plném otevření tranzistoru naroste proud na cca 1,3 mA. Výsledný obrázek může vypadat jako obr. 26.



Obr. 25.

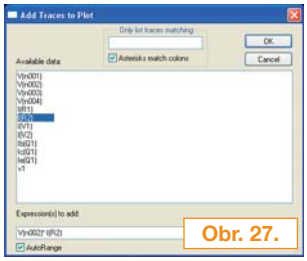
Zkusme poněkud sofistikovanější úlohu. Zjistěme



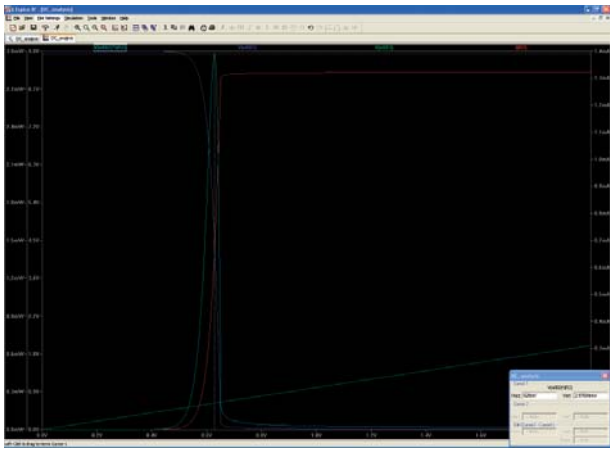
Obr. 26.

v tomto konkrétním zapojení s původnim nastavením hodnot, při jakém vstupním napětí bude tranzistor Q1 nejvíce „hřát“, tedy kdy na něm bude největší kolektorová ztráta. Logickou úvahou vyloučíme mezní stavy, tedy kdy je tranzistor otevřen nebo zavřen, neboť buď má nekonečný odpor, a tak přes něj žádný proud neteče => nemůže hřát, nebo je otevřen, je v saturaci a tím pádem je na něm i minimální úbytek napětí. Takže očekáváme maximální ztrátu někde mezi těmito dvěma stavy.

Použijeme původní obrázek a přidáme pomocí Ctrl+A = „Add trace“ další závislost. Výkonovou ztrátu na tranzistoru spočítáme jako $P_{ZTRAT} = I_C * U_C$. Proud kolektorem je stejný jako proud kolektorovým rezistorem R2. Zapíšeme vzorec podle obr. 27. Po zobrazení dostaneme do grafu čtvrtý průběh – obr. 28. Využijeme kurzoru na posledním průběhu a najdeme napětí zdroje V1 takové, kdy



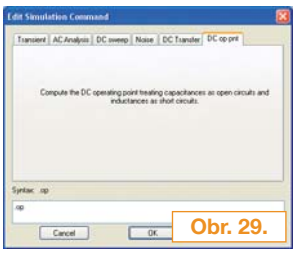
Obr. 27.



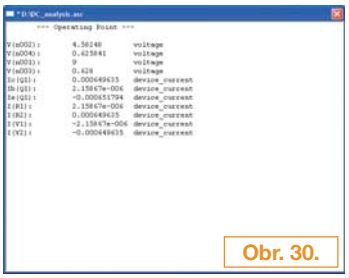
Obr. 28.

je kolektorová ztráta nejvyšší a odečteme simulované parametry: P_{ZTRAT}=3 mW, V_1= 628 mV, I_C=0,65 mA, U_C=4,6 V. Samozřejmě 3 mW nejsou nijak postřehnutelné, pokud však snížíme kolektorový rezistor R2 a zvýšíme tak proud kolektorem Q1, vzniknou nám čísla nadmíru zajímavá.

Zkusíme si ještě spočítat pracovní bod v případě, že výstupní napětí zdroje V1 bude 628 mV. Klikneme pravým tlačítkem na zdroji V1 a nastavíme 0,628 V. Potom zvolíme „Simulate“ – „Edit Simulation Commmand“ – obr. 29 a klikneme na OK. Umístíme někam do schématu obdélníček s textem „.op“ – např. pod „dc….“ a spustíme simulaci pomocí „Run“. Zobrazí se tabulka – obr. 30. Zde můžeme vyčíst konkrétní stejnosměrné hodnoty napětí a proudů pro pracovní bod, kdy napětí vstupního zdroje V1 je 0,628 V. Všechny hodnoty jsou v základních jednotkách, tedy [V] a [A].



Obr. 29.


Obr. 30.

Na úplný závěr teď zkusíme spočítat pracovní bod našeho NF zesilovače. Otevřeme soubor se schématem, zvolíme „Simulate“ -> „Edit Simulation Command“, zvolíme záložku „DC op pnt“ a umístíme do schématu direktivu „.op“. Po zvolení „Run“ se zobrazí známé okno s hodnotami. Poněkud nepříjemné je, že si musíme zpětně ve schématu pomocí kurzoru najít patřičné názvy uzlů, abychom viděli, kde jsou odpovídající napětí. Druhou možností je najet kurzorem nyní nad příslušný vodič, kdy se ve stavovém řádku zobrazí nejen název uzlu, ale i příslušné napětí.

A to je vše. Doufám, že Vám seriál ukázal, že i programy zdarma mají velký potenciál a že nyní ušetříte nějaký ten čas zbytečně zničenými a přetíženými součástkami. Doufám, že nyní budou vaše konstrukce více odolnější, prostě „robust design“, jak říkáme. Máte-li dotazy a přání na pokračování, popř. náměty na další oblast v elektronice, o které se chcete něco dozvědět, napište. □

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

Literatura a odkazy :
[1] Linear Technology, program LTspice IV, freeware, http://www.linear.com/
[2] Syrovátko, Milan: Zapojení s polovodičovými součástkami, SNTL, Praha 1987
[3] Pavelka, Ondřej : Použití programu LTspice IV pro analýzu a simulaci elektronických obvodů, magazín EEM, Infocube, Brno 2009