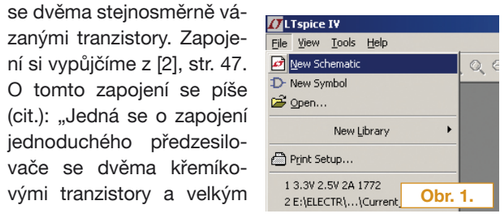
Použití programu LTspice IV pro analýzu a simulaci elektronických obvodů II.

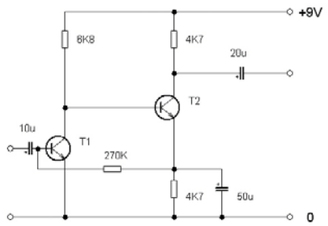
autor: Ondřej Pavelka

Předchozí článek otištěný v časopisu EEM 2/2009 poodhalil „zákulisí“ a principy simulačních programů pro elektroniku. Jako program vhodný pro tyto první pokusy se simulacemi obvodů osobně doporučuji LTspice IV, neboť je to program volně dostupný (zdarma) 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. V minulém dílu seriálu jsme si „odsimulovali“ již existující zapojení (vytvořené výrobcem), teď si zkusíme zapojení sami nakreslit z dostupných součástek v knihovně programu.

Spustíme program LTspice IV. Dle obr. 1 zvolíme „New schematic“. Plocha obrazovky poněkud zešedne a v horní liště aplikace se objeví název našeho nového schématu – „Draft1“. Podle obr. 2 zkusíme překreslit jednoduchý zesilovací stupeň se dvěma stejnosměrně vázanými tranzistory. Zapojení si vypůjčíme z [2], str. 47. O tomto zapojení se píše (cit.): „Jedná se o zapojení jednoduchého předzesilovače se dvěma křemíkovými tranzistory a velkým napěťovým ziskem. Oba stupně jsou stejnosměrně vázány a stabilita pracovního bodu je zajištěna zapájením báze tranzistoru T1 z emitoru tranzistoru T2. Zesilovač může být napájen napětím od 6 do 15 V. Napěťové zesílení předzesilovače je 76 dB při vstupním odporu 3,9 kΩ a výstupním odporem 4,7 kΩ. Frekvenční charakteristika leží v pásmu ±3 dB od 35 Hz do 35 kHz. Zatěžovací odpor musí být větší než 50 kΩ.“ Dle popisu zapojení jsou v originále použity tranzistory 2N2926, které mohou být nahrazeny (v tehdejší době – 1987) tranzistory KC507. Protože ani jeden typ není ve standardním seznamu modelů NPN tranzistorů, použijeme pro simulaci ekvivalent KC507, a to BC547.

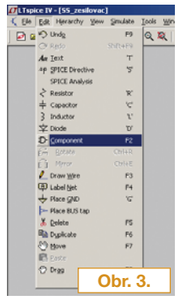


Obr. 1.



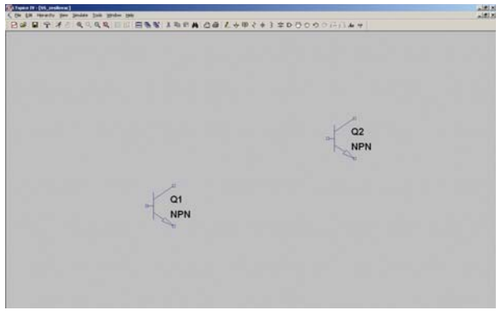
Obr. 2.

Teď již můžeme začít překreslovat schéma z obr. 2. Rozvrhneme si pro zjednodušení kreslící plochu umístěním obou tranzistorů tak, aby zbylo místo pro potřebné pasivní součástky. Pokud máme myš s kolečkem, můžeme plynule měnit měřítko zobrazení schématu. Program označuje proti našim zvyklostem tranzistory prefixem „Q“. Vložení tranzistoru do schématu provedeme z menu „Edit“ – obr. 3 – volba „Component“. V budoucnu si ušetříme čas tím, že pro vložení „netradičních“ prvků, jako jsou tranzistory, zdroje signálů nebo operační zesilovače použijeme klávesu F2, jak je vidět z obrázku menu, rezistor vložíme stiskem „R“, diodu pomocí „D“, cívku (induktor) stiskem „L“ a konečně kondenzátor stiskem „C“. Také můžeme stiskem klávesy vkládat často používané symboly – jaok zem (Ground) – „G“, popř. kreslit stiskem F3. Zpět však ke vložení tranzistoru. Vybereme „Component“ a v novém okně vyhledáme název souboru „npn“. V levé horní části okna ze ukáže schematická značka prvku – obr. 4. Stiskem „OK“ se vrátíme zpět do editoru schématu a můžeme tranzistor vhodně umístit stiskem levého tlačítka na myši – obr. 5.



Obr. 3.

Obr. 4.

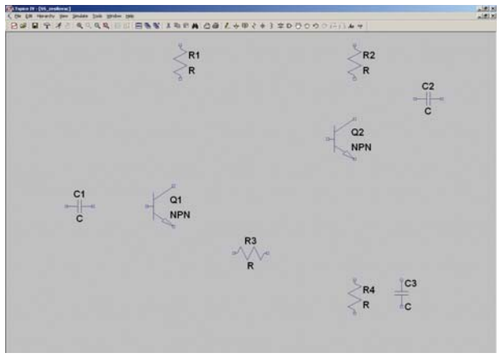


Obr. 5.

Protože na světě existují dva odlišné symboly pro rezistor – americký a evropský, můžeme si v programu LTspice vybrat ten, který nám více vyhovuje. Při stisku „R“ vkládáme přímo americký symbol. Pokud chceme použít nám známý obdélníček, najdeme jej pod „F2“ ve složce „Misc“ – obr. 6. V této složce najdeme i další specifické evropské symboly, např. elektrolytický kondenzátor. Pro výslednou simulaci je ale úplně jedno, jaký symbol kondenzátoru, popř. rezistoru použijeme. Z důvodu snadnějšího kreslení rezistoru a kondenzátoru pomocí přímých voleb klávesami R a C budu pro kreslení používat americké symboly.

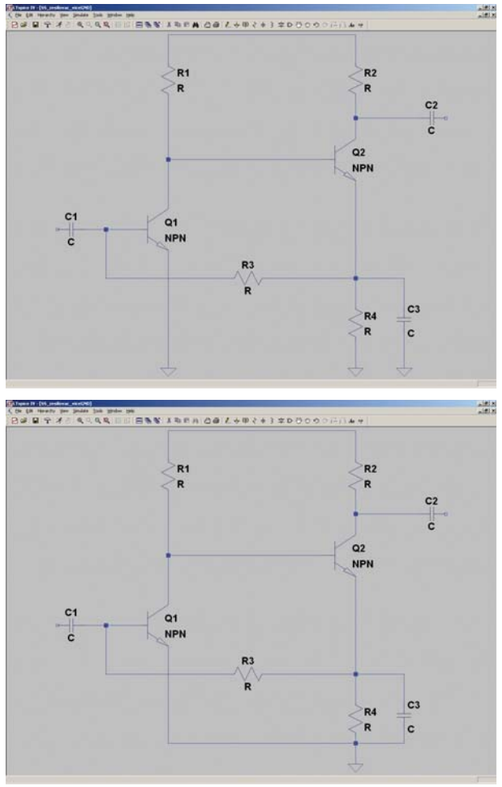
Obr. 6.

Tranzistory Q1 a Q2 již máme rozmístěné, a tam můžeme vložit další prvky – rezistory stiskem „R“ a kondenzátory pomocí „C“. Při vkládání symbolů do schématu nám vždy nemusí úplně vyhovovat orientace a natočení. Pokud tedy vložíme pomocí „R“ rezistor, tak jej před závěrečným umístěním můžeme pomocí „Ctrl+R“ (rotation – otočení) nebo „Ctrl+E“ (mirror – zrcadlo) vhodně zorientovat – obr. 7.



Obr. 7.

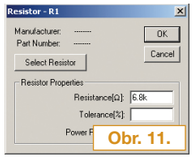
Provedeme pospojování všech součástek pomocí funkce F3 – objeví se kříž, kterým můžeme po ploše pochybovat v rastru, ve kterém byly umisťovány symboly. Spojování symbolů provádíme stisknutím levého tlačítka na malém modrém čtverečku, který u každého symbolu znázorňuje kontaktní bod. Celé zapojení musí obsahovat aspoň jeden symbol nulového potenciálu – klávesa „G“. Můžeme všechny „uzemněné“ body pospojovat, nebo je připojit na libovolný počet těchto symbolů – obr. 8 a obr. 9. Chceme-li nějaký symbol nebo špatně umístěný drát smazat, stiskem klávesy „Del“ se zobrazí nůžky a umístěním nad symbol a stiskem levého tlačítka na myši tento symbol nebo drát odstraníme.



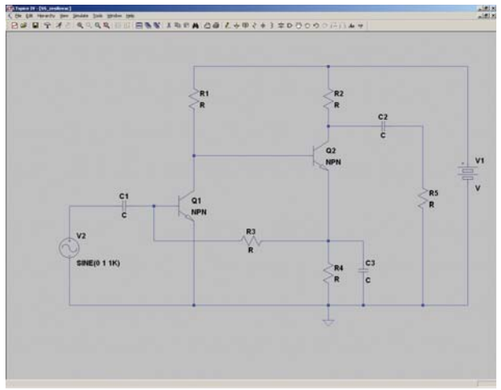
Obr. 8. a Obr. 9.

Protože z popisu zesilovače je dán minimální požadovaný zatěžovací odpor, zapojíme tedy na výstup rezistor o velikosti min. zatěžovacího odporu. Zesilovač musí být také napájen, připojíme baterii – F2, složka „Misc“, symbol „battery“. Jako zdroj signálu použijeme symbol „signal“ ze stejné složky. Vše umístíme do schématu a vhodně propojíme – obr. 10.

Schéma je hotové, zbývat zadat parametry součástek. Rezistory a kondenzátory zadáme tak, že umístíme kurzor nad součástku (např. R1) a stiskneme pravé tlačítko. Objeví se okno – obr. 11, kam

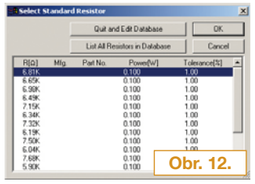


Obr. 11.



Obr. 10.

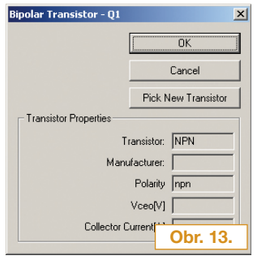
vepíšeme konkrétně pro R1 hodnotu „6.8k“. Můžeme samozřejmě zadat hodnotu v ohmech, pak by tam mělo být „6800“. Údaje o toleranci a maximálním zatěžovacím výkonu nejsou pro vlastní simulaci důležité, pokud je uvedeme, je s těmito parametry počítáno a program kontroluje, zda rezistor není výkonově přetěžován.



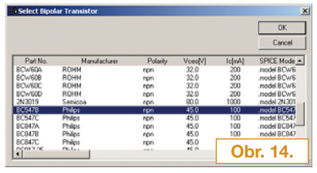
Obr. 12.

Údaj o toleranci je zase použit do toleranční analýzy. Můžeme si také vybrat konkrétní rezistor tlačítkem „Select resistor“ – obr. 12.

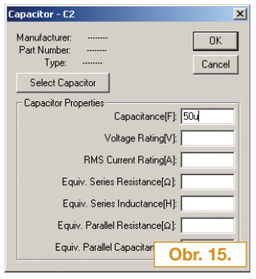
Upřesníme hodnoty všech rezistorů podle původního schématu, zatěžovací rezistor zvolíme 50kΩ, totéž provedeme u kondenzátorů – zde symbol „mikro – µ“ nahradíme písmenkem „u“ – obr. 15 – stačí zadat pouze kapacitu, ostatní parametry necháme prázdné, nastavíme napětí baterie na 9V (parametr vnitřního odporu baterie necháme nevyplněný). Zbývají tranzistory a zdroj signálu. U tranzistorů nemůžeme přímo zadávat jejich parametry, ale musíme si při kreslení vybrat z již uložených modelů. Samozřejmě můžeme modely přidávat, ale v této fázi hraní si s programem využijeme nachystanou nabídku. Při kliknutí pravým tlačítkem na Q1 se zobrazí



Obr. 13.

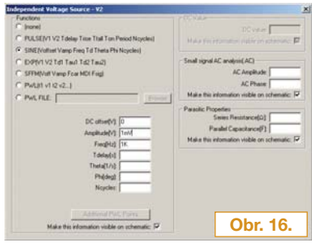


Obr. 14.

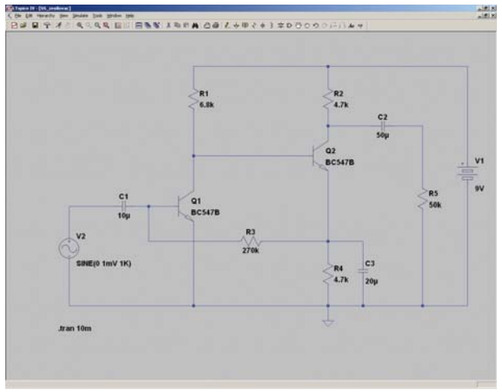


Obr. 15.

možnosti – obr. 13, zvolíme „Pick New Transistor“ – zvolíme model tranzistoru BC547B – obr. 14. Poslední volbou je nastavení zdroje signálu označeného jako „V2“. Pravým tlačítkem zobrazíme okno – obr. 16. Zde je vidět, že zdroj signálu se chová jako generátor sinusového průběhu (volba „SINE“), nemá žádný DC offset (stejnosměrný posun signálu – stejnosměrná složka je 0V), výstupní amplituda signálu a tedy vstupní napětí do našeho předzesilovače je 1mV a frekvence generovaného signálu je 1kHz. Stiskem OK potvrdíme naši volbu. Zesilovač by před spuštěním simulace měl vypadat jako na obr. 17.

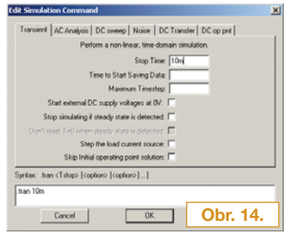


Obr. 16.

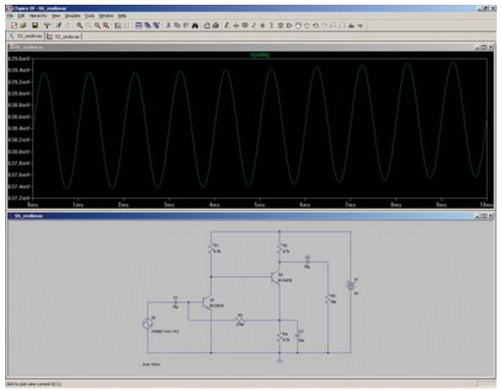


Obr. 17.

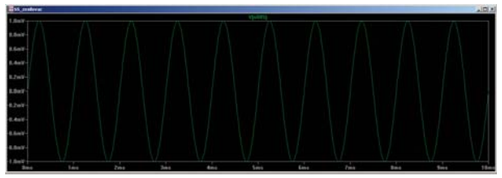
Spustíme simulaci. Z horní lišty zvolíme „Simulate“ -> „Run“ a zobrazí se nám standardně „Transient“ záložka. Pokud tomu tak nebude, zvolte ji ručně. Jako „stop time“ parametr nastavíme 10ms, protože při frekvenci 1kHz trvá jedna perioda signálu 1ms, uvidíme tedy 10 period sinusoidy – obr. 18. Po stisku OK provede program potřebné výpočty a rozdělí obrazovku na dvě poloviny – se schématem dole a „obrazovkou osciloskopu“ nahoře. Tato horní polovina je nyní prázdná, ale stačí najet kurzorem do schématu a při přiblížení se k signálovému vodiči dojde ke změně kurzoru na červenou sondu. Pokud se touto sondou dotkneme spoje a stiskneme levé tlačítko, zobrazí se příslušný signál. Na obr. 19 je zobrazen průběh signálu na bázi tranzistoru Q1. Je vidět, že amplituda signálu je vyšší než 1 mV díky zpětné vazbě. Pokud klikneme přímo na zdroj V2, uvidíme skutečně signál o velikosti 1 mV – obr. 20.



Obr. 14.

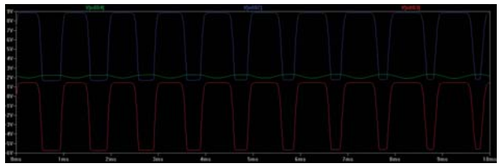


Obr. 19.



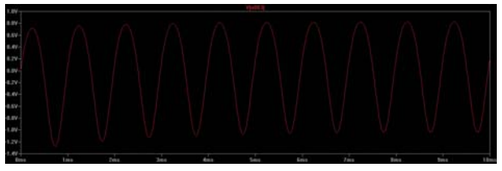
Obr. 20.

Na obr. 21 jsou zároveň zobrazeny 3 průběhy (postupným klikáním sondou na spoje ve schématu). Zelený průběh (v uzlu n004) zobrazuje napětí kolektoru Q1, tedy na bázi Q2 (galvanicky spojeno). Napětí osciluje mezi cca 1.93 a 2.29 V. Modrý průběh (uzel n002) je napětí přímo



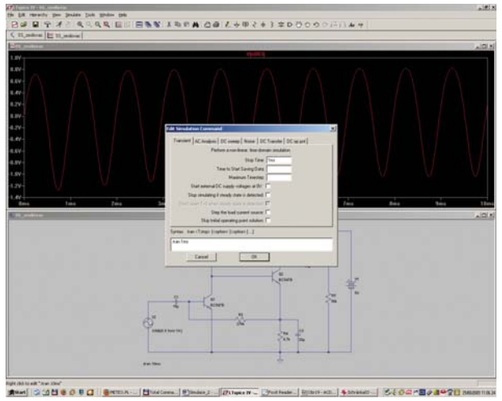
Obr. 21.

na kolektoru Q2. Je zde patrná limitace a zkreslení signálu. To je způsobeno velkým zesílením, takže je nutné buď zvýšit napájecí napětí, nebo snížit vstupní napětí ze zdroje V2. Poslední, červený průběh, je napětí přímo na zatěžovacím rezistoru R5, který simuluje vstupní odpor následujícího stupně. Po snížení vstupního napětí na 0.1 mV (tedy 10×) dostaneme přijatelný průběh – obr. 22.

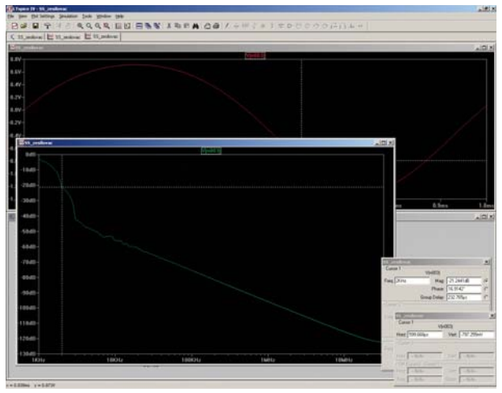


Obr. 22.

Nyní zkusíme zjistit zkreslení signálu. Potřebujeme k tomu pouze jednu periodu signálu, nastavíme tedy v menu pro časovou (Transient) analýzu dobu simulace pouze 1ms. Tím zkoumáme při kmitočtu 1 kHz přesně jednu periodu. Nastavení provedeme klinutím pravým tlačítkem na nápis „.tran 10ms“, který je umístěn ve schématu – obr. 23 – přepíšeme hodnotu na 1ms a stiskneme OK. Protože LTspice nemá nástroj na výpočet THD (harmonického zkreslení), musíme si pomoci teorií a Fourierovou transformací, která nám zjistí zastoupení jednotlivých harmonických složek v analyzovaném signálu. FFT (Fast Fourier Transformation) je nástrojem integrovaným, dokonce můžeme provést export dat do TXT souboru pro pozdější analýzu. Buď si z grafu – obr. 24 – opíšeme



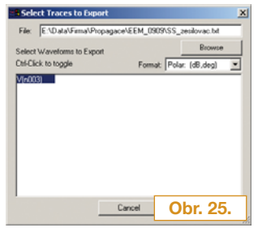
Obr. 23.



Obr. 24.

jednotlivé hodnoty napětí harmonických složek od 1 kHz po cca 20 kHz, nebo použijeme v menu „File“ – „Export“ zvolený průběh – obr. 25. Já jsem zvolil tuto cestu a data jsem potom nahrál do tabulkového kalkulátoru pro další výpočty.

Teorie výpočtu THD (Total Harmonic Distortion) říká zjednodušeně, že koeficient zkreslení k [%] je definován jako „poměr“ celkových příspěvků napě-



Obr. 25.

tí s a bez základní harmonické složky. Matematicky zapsáno to vypadá následovně :

$$\mathbf{k} = \frac{\sqrt{\mathbf{u}_2^2 + \mathbf{u}_3^2 + \mathbf{u}_4^2 + \ldots + \mathbf{u}_n^2}}{\sqrt{\mathbf{u}_1^2 + \mathbf{u}_2^2 + \mathbf{u}_3^2 + \mathbf{u}_4^2 + \ldots + \mathbf{u}_n^2}} \quad [\%]$$

kde

u_1 je efektivní hodnota první harmonické (základní tón, v našem případě 1 kHz)

u_2 je efektivní hodnota druhé harmonické (s dvojnásobnou frekvencí, tedy 2 kHz)

u_3 je efektivní hodnota třetí harmonické (s trojnásobnou frekvencí – 3 kHz)

u_4 je efektivní hodnota čtvrté harmonické (s čtyřnásobnou frekvencí – 4 kHz)

Po dosazení hodnot napětí přepočítaných z dB velikostí (předpokládáme vztažnou úroveň signálu 0.775V ~ 0 dB) – obr. 26 – vyjde koeficient zkreslení kolem 20 %. To je samozřejmě hodně, zkreslení signálu o takové velikosti je patrné i pouhým okem při pohledu na časový průběh zkušebního signálu (částečně na obr. 24) – sinusoida není symetrická.

Dále nás zajímá frekvenční charakteristika zesilovače. Zkusíme ověřit simulací, zda platí v literatuře [2] uvede-

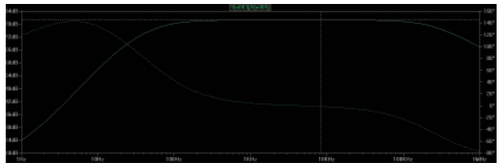
	A	B	C	D
1	Freq. [Hz]	V(n003) [dB]	V(n003) [V]	V(n003)^2 [V]
2	0	-15,8947	0,242147715	0,058635516
3	1000	-3,10992	0,757759941	0,574194008
4	2000	-21,2441	0,15824192	0,025272635
5	3000	-42,8296	0,023515434	0,000552976
6	4000	-46,8707	0,015257234	0,000232808
7	5000	-48,9338	0,012700337	0,000161299
8	6000	-51,8674	0,010498786	0,000110224
9	7000	-53,7127	0,008291496	6,87489E-05
10	8000	-53,8814	0,008771942	7,69475E-05
11	9000	-53,8762	0,008778013	7,70184E-05
12	10000	-56,2027	0,006892428	4,34621E-05
13	11000	-55,8942	0,006824954	4,6696E-05
14	12000	-56,3414	0,00655789	4,30072E-05
15	13000	-58,4144	0,005458571	2,97987E-05
16	14000	-57,732	0,005792753	3,35968E-05
17	15000	-59,4981	0,004848216	2,48496E-05
18	16000	-59,8005	0,004616449	2,31988E-05
19	17000	-59,653	0,004690297	2,38173E-05
20	18000	-60,9968	0,004486652	2,01292E-05
21	19000	-59,9095	0,004759874	2,26517E-05
22	20000	-61,1105	0,004285171	1,83627E-05
23				
24			THD	20,10291012
25				

Obr. 26.

né pásmo (od 35 Hz do 35 kHz) pro pokles ±3 dB. Pro tento druh simulace použijeme AC analýzu. Zvolíme tedy menu „Simulate“ – „Edit Simulation Cmd“, záložka „AC Analysis“ – obr. 27. Nastavíme následující parametry – Type of Sweep : decade, Number of points per decade: 100, Start Frequency: 1 Hz, Stop Frequency : 1 MEG (MEG se používá místo „M“, protože „M“ je chápáno jako „mili“). Po „OK“ se ukáže obdélníček, který umístíme kamkoli – třeba pod schéma. Dále musíme určit zdroj signálu pro AC analýzu – klikneme pravým tlačítkem myši na zdroji signálu V2 a nastavíme vpravo v parametrech „Small signal AC analysis“ hodnotu „AC Amplitude“ na 1 V. „AC phase“

Obr. 27.

nevyplníme. Pak už stiskneme jen OK a pomocí „Simulate“ – „Run“ – obrazovka se opět rozdělí na dvě části. Protože nás zajímá přenos napětí, neboli zesílení, musíme nejen zobrazit vstupní a výstupní napětí, ale hlavně jejich poměr. Klikneme tedy na spoj mezi zdrojem signálu a kondenzátorem C1, zobrazí se nám „rovná čára“ – V(n005) – napětí v uzlu n005. Klikneme pravým tlačítkem na zelený nápis V(n005) v horní části grafu a zobrazí se okno pro zadání matematického výrazu – obr. 27. Upravíme zápis na výpočet poměru výstupního a vstupního napětí – V(n003)/V(n005). Výsledné zobrazení bude vypadat jako na obr. 28. Plná zelená čára zobrazuje přenosovou frekvenční charakteristiku zesilovače, přerušovaná je fázová charakteristika. Při zobrazení kurzoru můžeme ve spodním okně odečítat přesné hodnoty. Plochá křivka přenosové charakteristiky je cca 79,9 dB. Pokles o 3 dB (na 76,9 dB) nastane na kmitočtech cca 70Hz a 236 kHz.



Obr. 28.

Pokud nám vadí těch 70 Hz místo uvedených 35 Hz, můžeme jednoduše zvětšit kapacitu kondenzátoru C3 v emitoru tranzistoru Q2. Pak se nám pokles zesílení na spodním kmitočtu posune ještě níže.

Tento malý příklad ukázal využití volně dostupného programu LTspice pro simulaci dvojstupňového tranzistorového stejnosměrně vázaného zesilovače. Provedli jsme simulaci v časové oblasti s výpočtem zkreslení a také simulaci ve frekvenční oblasti s cílem zjistit přenosovou charakteristiku zesilovače. Příště zkusíme pokročilejší metody analýzy – např. krokování parametrů součástek, zjistíme vstupní a výstupní impedanci zesilovače, vytvoření vlastního modelu součástky, export dat, DC analýzu a pod.

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