

VYUŽITÍ PROGRAMŮ PRO SYMBOLICKOU A SEMISYMBOLICKOU ANALÝZU VE VÝUCE ELEKTRICKÝCH OBVODŮ

Prof. Dalibor Biolek

Vojenská Akademie Brno, K301, Kounicova 65, PS13, 612 00 Brno

Tel. (05) 41182487, fax (05) 41182888, email: biolek@cs.vabo.cz

Úvod

Programy pro symbolickou a semisymbolickou analýzu umožňují získávat výsledky analýzy elektrických obvodů ve formě vzorců. Z vzorců je mimo jiné možné získat numerické a grafické informace, které jsou generovány i běžnými obvodovými simulátory typu Electronic Workbench, Spice, MicroCap apod. Je v nich však navíc i něco, čehož může učitel využít k zefektivnění výkladu a student k hlubšímu pochopení jevů v analyzovaném obvodu.

Klasické numerické simulační programy poskytují pouze kvantitativní výsledky analýzy, většinou ve formě grafů. Tyto výsledky získává student bezprostředně po zadání modelu obvodu a požadavků na analýzu a spuštění analýzy, tj. bez jakýchkoliv mezivýsledků, které by mu pomohly v orientaci, **proč** jsou výsledky právě takové jaké vyšly.

Programy pro symbolickou a semisymbolickou analýzu jsou většinou schopny poskytovat rovněž tyto kvantitativní grafické informace, kromě toho však generují i podstatné mezivýsledky, tj. analytické vzorce. Z vzorců jsou pak patrné důležité souvislosti mezi obvodem a jeho chováním, například:

- které součástky zesilovače a které parametry tranzistoru se podílejí na tvorbě střídavého zesílení stupně,
- co musí být splněno, aby se v oscilátoru udržely ustálené kmity a které součástky mají vliv na velikost kmity,
- jaké jsou podmínky rovnováhy konkrétního střídavého můstku,
- které parametry operačního zesilovače je třeba „hlídat“, aby aktivní filtr s tímto zesilovačem měl požadovanou kmitočtovou charakteristiku,
- jaká je optimální hodnota neutralizační kapacity ve vysokofrekvenčním zesilovači,

apod.

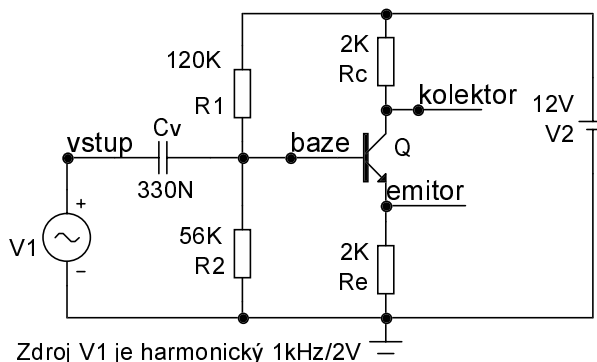
K těmto výsledkům se za pomoci klasických simulátorů nelze dopracovat buď vůbec, nebo v ojedinělých případech pracnou opakovanou analýzou metodou „pokusu a omylu“. Samotný student však většinou necítí potřebu takovéto časově náročné a přitom neefektivní činnosti provádět. Hrstka těch nejschopnějších pak své experimenty většinou končí na problémech komunikace se složitým profesionálním programem.

Na školách, v převážné většině vysokých, jsou v různé míře rozšířeny a využívány i univerzální programy pro vědeckotechnické výpočty, které umožňují symbolickou analýzu, například MAPLE, MATHCAD, MATLAB se symbolickým toolboxem apod. Vzhledem k univerzálnosti a dalším zvláštěm však výuka elektrotechniky pomocí těchto programů může být velmi problematická, zvláště na středních školách.

Z těchto a dalších důvodů vznikl program SNAP (Symbolic Network Analysis Program), který byl vytvořen na akademické půdě kolektivem učitelů elektrotechnických předmětů. Dnes je program široce využíván zatím na vysokých školách, a to konkrétně na FEI VUT v Brně, FLAPVO VA v Brně a jeho francouzská verze na ISEP v Paříži.

Možnosti využití pedagogických principů založených na symbolické a semisymbolické analýze k výuce elektrických obvodů na středních školách musí posoudit především středoškolské učitelé. Některé výchozí informace a rozbor jsou uvedeny níže.

Numerický versus symbolický výsledek



Obr. 1. Analyzovaný tranzistorový zesilovač.

Uvažujme tranzistorový zesilovač na obrázku. Pomocí klasického simulačního programu je možné zjistit řadu číselných parametrů obvodu, například stejnosměrný pracovní bod:

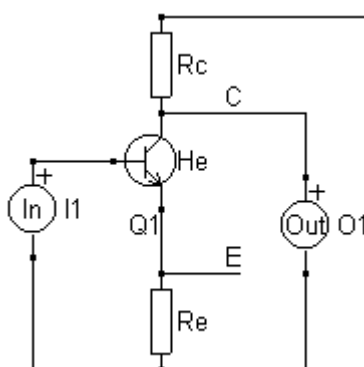
$$U_{kolektor} = 9,179V, U_{emitor} = 2,837V, U_{baze} = 3,509V, I_{kolektor} = 1,41mA.$$

Zkušený uživatel programu může po určitém úsilí získat i různé nízkofrekvenční dvojbranové parametry samotného tranzistoru v daném pracovním bodu, například

$$\begin{aligned} h_{11e} &= 5k\Omega \text{ (střídavý vstupní odpor při výstupu nakrátko),} \\ h_{21e} &= 500 \text{ (proudový zesilovací činitel při výstupu nakrátko),} \\ h_{12e} &\approx 0, h_{22e} \approx 0. \end{aligned}$$

Tyto parametry spolu s odpory R_c a R_e určují střídavé zesílení. Ale podle jakých zákonitostí? Používáme-li klasický simulátor, máme jen jednu metodu, jak tyto souvislosti sledovat: Provedeme řadu různých analýz zesílení pro různé hodnoty sledovaných parametrů a výsledky pak srovnáme a vyhodnotíme. Je však jasné, že tento postup je značně těžkopádný a výsledky budou nevalné.

Použijme symbolický analyzátor. Počítáme-li pouze střídavé parametry zesilovače pro oblast středních kmitočtů, stačí zadat zjednodušené náhradní schéma podle obrázku 2: Napájecí zdroj napětí je zkratován stejně jako vazební kondenzátor. Dále jsou vynechány rezistory R_1 a R_2 , které se sice spolupodílejí na nastavení pracovního bodu, ale nemají vliv na zesílení.



Obr. 2. Náhradní schéma zesilovače z obr. 1 pro účely střídavé analýzy symbolickou metodou.

Součástkami typu In a Out jsme označili vstupní a výstupní bránu obvodu. Při uvažování výstupu na emitoru (emitorový sledovač) je třeba přesunout značku Out mezi emitor a společný vodič.

Symbolický analyzátor vygeneruje přímo vzorce pro zesílení.

Je-li výstup na kolektoru, pak vyjde

výstup programu

interpretace

symbolic

$-R_c \cdot h_{21e}$

$h_{11e} + R_e + R_e \cdot h_{21e}$

$$K_U = -\frac{R_c h_{21e}}{h_{11e} + R_e + R_e h_{21e}}$$

Uvažujeme-li výstup na emitoru, pak vyjde

symbolic

$R_e + R_e \cdot h_{21e}$

$h_{11e} + R_e + R_e \cdot h_{21e}$

$$K_U = \frac{R_e + R_e h_{21e}}{h_{11e} + R_e + R_e h_{21e}}$$

Z vzorců snadno vidíme, jak se jednotlivé parametry obvodu R_c , R_e , h_{21e} a h_{11e} podílejí na tvorbě zesílení. Navíc k experimentům, co se stane, když změníme to či ono, již nepotřebujeme složitý numerický simulátor, který při každém simulačním běhu řeší rozsáhlé soustavy obvodových rovnic.

Máme-li zájem např. o vstupní či výstupní střídavý odpor zesilovače, symbolický program nám vygeneruje vzorečky, známé z některých radiotechnických příruček:

Vstupní odpor:

$h_{11} + R_e + R_e \cdot h_{21}$

1

Výstupní odpor, výstup na kolektoru:

$R_c \cdot h_{11} + R_c \cdot R_e + R_c \cdot R_e \cdot h_{21}$

$h_{11} + R_e + R_e \cdot h_{21}$

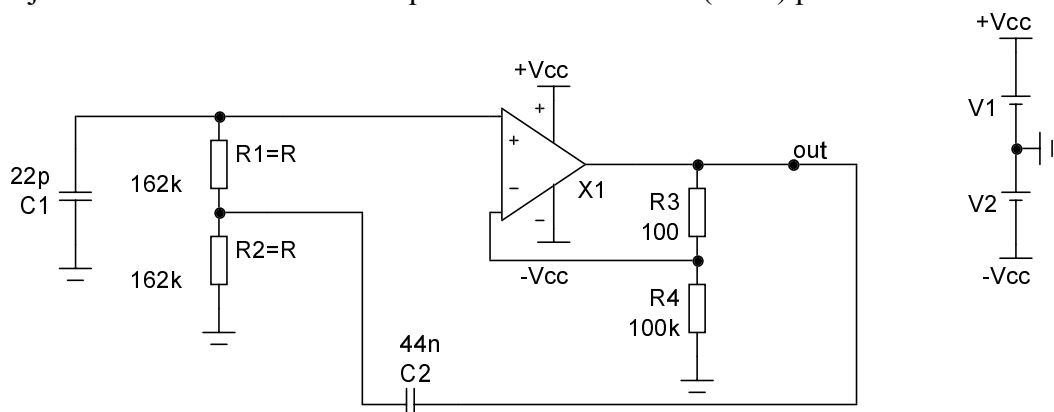
Výstupní odpor, výstup na emitoru:

$R_e \cdot h_{11}$

$h_{11} + R_e + R_e \cdot h_{21}$

Symbolický, semisymbolický a numerický výsledek

Uvažujme oscilátor s T-článkem a operačním zesilovačem (OPA) podle obr. 3.



Obr. 3. Oscilátor s T článkem.

Protože v obvodu není přítomen nelineární nebo setrvačný prvek regulující amplitudu kmitů, je simulace tohoto obvodu klasickým simulátorem složitou záležitostí. Oscilátor se „rozběhne“ jen pro hodnoty součástek, které se nacházejí v těsném „okolí“ hodnot uvedených ve schématu. Kmitočet oscilací pak vychází kolem 1kHz.

Pomocí symbolického analyzátoru můžeme odvodit přesně oscilační podmínku i vzorec pro oscilační kmitočet. Necháme vypočítat zesílení zpětnovazební smyčky a položíme jej rovným jedné. Zesílení vyjde takto:

výstup programu

interpretace

$$p*(R*C2*R4 + R*C2*R3)$$

$$\frac{R4}{R4 + p*(R*C2*R4 + 2*C1*R*R4) + p^2*(C1*R^2*C2*R4)}$$

$$\frac{p(R_3 + R_4)RC_2}{R_4 + p(C_2 + 2C_1)RR_4 + p^2 R^2 R_4 C_1 C_2}$$

Ve vzorci figuruje symbol p , což je označení komplexního kmitočtu $p = j\omega$.
Rovnici

$$\text{zesílení} = 1$$

upravíme po dosazení komplexního kmitočtu na tvar

$$j\omega(C_2 R_3 - 2C_1 R_4)R = R_4 - \omega^2 R^2 R_4 C_1 C_2.$$

Tato komplexní rovnice se rozpadá na 2 reálné oscilační podmínky:

$$\omega = \frac{1}{R\sqrt{C_1 C_2}} \text{ neboli } f = \frac{1}{2\pi R\sqrt{C_1 C_2}} \text{ .. vzorec pro oscilační kmitočet}$$

$$\frac{C_2}{C_1} = 2 \frac{R_4}{R_3} \text{ .. podmínka generování ustálených kmitů o kmitočtu } f.$$

Dosazením do vzorců zjistíme, že podmínka ustálených oscilací je splněna přesně a kmitočet vychází asi 998,5 Hz.

Program může vygenerovat i výsledek v tzv. semisymbolickém tvaru: do symbolického výrazu dosadí za symboly součástek přímo jejich číselné parametry. Jediným symbolem pak bude komplexní kmitočet p :

výstup programu

interpretace

semisymbolic

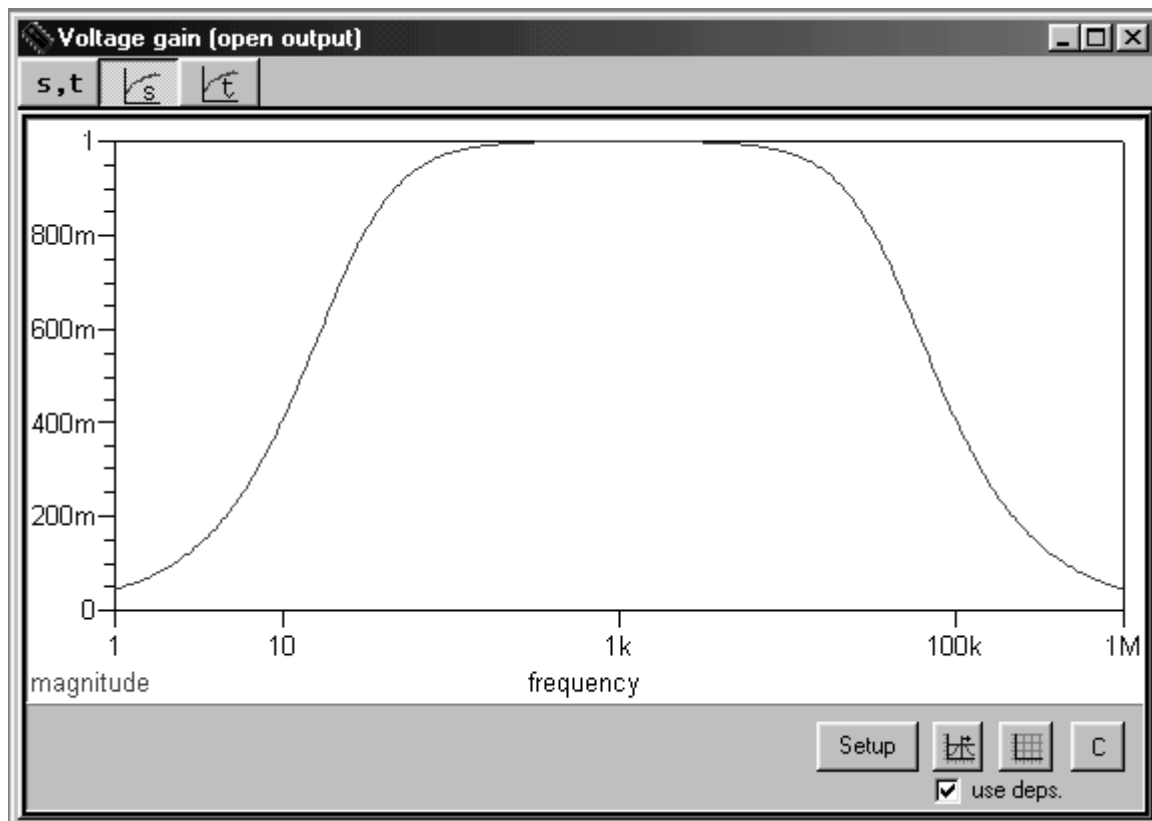
Multip. Coefficient = 2.80864197530864E+0005

$$\frac{1.000000000000000E+0000 * s}{3.93635821993473E+0007 + 2.80864197530864E+0005 * s + 1.000000000000000E+0000 * s^2(2)}$$

$$\frac{2,808.10^5 p}{3,936.10^7 + 2,809.10^5 p + p^2}$$

Snadno se přesvědčíme, že k maximu přenosu zpětnovazební smyčky dochází právě na kmitočtu 1kHz a extrémní hodnota je 1. Pomůže nám v tomhle symbolický program, pokud má

v sobě zabudování i numerickou analýzu semisymbolických výrazů. Na obr. 4 vidíme příslušný grafický výstup: kmitočtovou závislost zesílení zpětnovazební smyčky.



Obr. 4. Kmitočtová závislost zisku zpětnovazební smyčky oscilátoru s T článkem; numerický výstup programu vypočtený na základě výsledků semisymbolické analýzy.

Z vzorců pro oscilační kmitočet a pro udržení ustálených kmitů vyplývá řada důležitých faktů, které nelze jednoduše získat simulací klasickými programy: Například při vzrůstu poměru R_4/R_3 nad vypočtenou mez klesne zesílení zpětnovazební smyčky pod hodnotu 1 a kmitý se v obvodu neudrží. V podmínce generování ustálených kmitů nefiguruje odpor R , takže oscilační kmitočet lze bez problémů ladit tandemovým potenciometrem R_1 - R_2 , atd. atd.

V současné době je k programu SNAP zpracováno v elektronické verzi 123 vzorových příkladů z různých oblastí elektrotechniky. Řešení provádí student přímo prostřednictvím programu. Pro schopné studenty to znamená zajímavý způsob samostatného experimentování se základními elektrotechnickými obvody.

Závěry

V článku je poukázáno na některé možnosti, které se otevírají učitelům i studentům při používání programů pro symbolickou a semisymbolickou analýzu elektrických obvodů. Při rozhodování o možném nasazení programů této třídy na středních školách je vhodné vzít v úvahu i tato fakta:

Možné klady:

- Přednosti oproti klasickým simulátorům, které jsou objasněny v článku.
- Program SNAP je oproti profesionálním simulátorům jednodušší, je snadnější na ovládání a cenově dostupnější. Je k dispozici řada vypracovaných příkladů v elektronické formě.

Možné zápory:

- Programy založené na symbolických algoritmech jsou běžně použitelné jen pro analýzu lineárních a linearizovaných obvodů (malosignálové zesilovače, filtry, RLC obvody apod.). Nelze jimi řešit problémy nelineární povahy, např. limitéry, relaxační generátory, stabilizátory apod.).
- Pro plnohodnotné využití symbolického programu musí být studenti obeznámeni s významem komplexního kmitočtu. Pokud jsou ale v učebních osnovách výpočty v harmonickém ustáleném stavu pomocí symbolicko-komplexní metody, neměl by to být problém.

Literatura k dalšímu studiu

- [1] BIOLEK,D.: SNAP v. 2.6. Příručka začínajícího uživatele. 40 stran, Brno 1999.
- [2] BIOLEK,D.-KOLKA,Z.: Program SNAP verze 2.6: Nové možnosti pro výuku i výzkum. Sborník konference STO-7, „Moderní směry výuky elektrotechniky a elektroniky“, VA Brno, 1999, s. 66-69.
- [3] BIOLEK,D.-KOLKA,Z.: Využití programu SNAP 2.6 ve vybraných elektrotechnických předmětech. Sborník konference STO-7, „Moderní směry výuky elektrotechniky a elektroniky“, VA Brno, 1999, s. 70-75.
- [4] BIOLEK,D.- SVIEZENY,B.: SNAP - Analyse Symbolique des Circuits Linéaires. Manuel utilisateur, version 2.6. Société d'Etudes d'Exploitation et de Recherches, Paris 1999, France.
- [5] BIOLEK,D.-KOLKA,Z.: SNAP: A Tool for the Analysis and Optimization of Analogue Filters. TSP'99, Brno, 1999, s.60-63.
- [6] BIOLEK,D. a kol.: TERO. Využití počítačových programů v elektrotechnice. Skriptum VA Brno, S-1738, 1992, 124s.
- [7] BIOLEK,D.: Počítačová cvičení v teorii obvodů. Skriptum VA Brno, S-803, 1995, 89s.
- [8] BIOLEK,Z.-BIOLEK,D.: MICROCAP IV. Program pro analýzu elektrických obvodů. STUDENT-L. Lupress s.r.o., učební text SPŠE Rožnov p.R., 1996.