

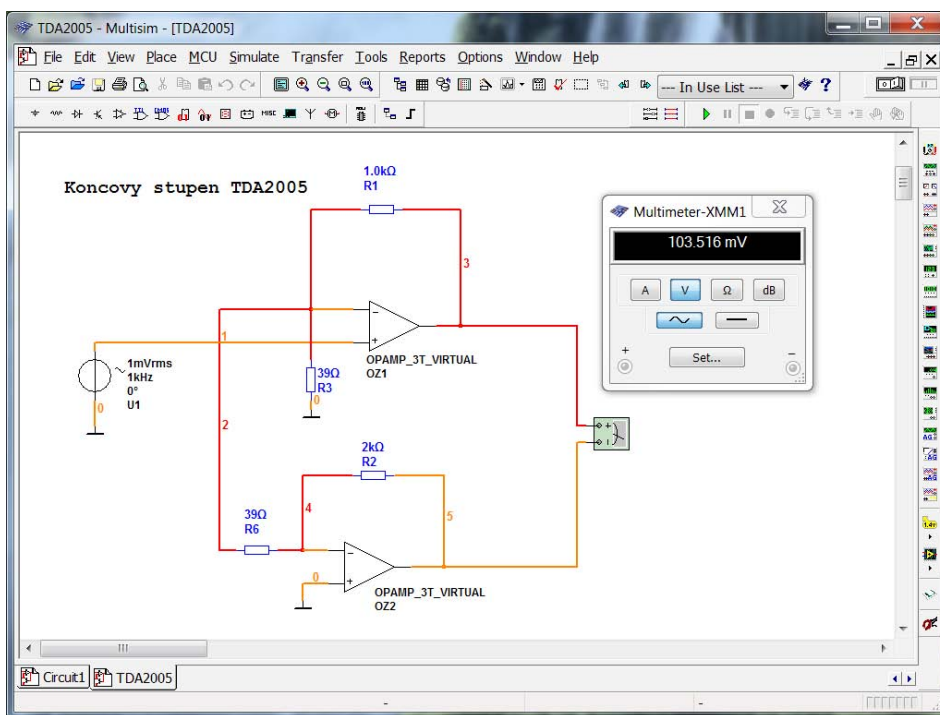
## Příspěvek k počítačové simulaci elektronických obvodů

Petr Michalík<sup>1</sup>, Fakulta pedagogická Západočeské univerzity v Plzni

Článek uvádí na příkladech některá specifika použití počítačové simulace elektronických obvodů ve výuce. Například na zapojení oscilátoru s operačním zesilovačem je ukázána možnost simulace chování za nereálných nebo obtížně realizovatelných situací. Na zapojení dvojčinného zesilovače s komplementárními tranzistory a s děleným napájecím zdrojem je demonstrováno praktické využití možnosti nastavení chyby u součástek. Na dalších příkladech je ukázáno využití subobvodů pro zvýšení přehlednosti zapojení a některé možnosti výstupů simulačního programu. Jedná se o příspěvek nejen pro učitele, kteří se již se simulačním programem *Multisim NI* nebo s jeho předchůdcem *Electronics Workbench* setkali, ale i pro ostatní, kteří se zabývají výukou elektroniky.

Počítačová simulace elektronických obvodů je ve výuce elektroniky hojně využívána, zejména na středních odborných školách. K simulaci jsou k dispozici různé virtuální počítačové elektronické laboratoře od jednoduchých až po velmi složité. Často používané na středních odborných školách jsou *Multisim NI* nebo starší *Electronics Workbench*, případně *Microsim PSpice*. Jednotlivé simulační programy mají dosti velké odlišnosti nejen ve způsobu ovládání, ale v některých případech i ve výsledcích simulace. Subjektivně lze uvést, že programy *Multisim NI*, resp. *EWB* jsou „pohodlnější“ na obsluhu, mají jednodušší ovládání, které se snaží více korespondovat s realitou. *Microsim PSpice* je mohutnější simulační prostředek, jehož možnosti jsou mnohem větší (ovšem pouze pro toho, kdo je dokáže využít). Těžiště jeho použití je v elektronické teorii i praxi zejména na profesionálních pracovištích a také na odborných vysokých školách. Naproti tomu simulační programy typu *Multisim NI* nachází více uplatnění vzhledem ke svým vlastnostem hlavně na středních odborných školách a také fakultách připravujících učitele pro střední školy, proto uvedu jeho stručnou charakteristiku.

*Multisim NI* je virtuální elektronická počítačová laboratoř. Jedná se o produkt firmy National Instruments. Je určen k simulaci chování analogových a číslicových elektronických obvodů, které v programu sestavíme. Pro vyzkoušení produktu lze „stáhnout“ demoverzi Multisimu, která je použitelná jeden měsíc od instalace na konkrétním počítači.



Obr. 1 – Prostředí elektronické virtuální laboratoře Multisim NI

<sup>1</sup> michalik@kvd.zcu.cz

V simulačním programu jsou k dispozici tisíce součástek (platí i pro školní verzi) umístěných v jednotlivých zásobnicích, které charakterizují určitou skupinu součástek, a díky tomu je uživatel schopen je lépe vyhledat.

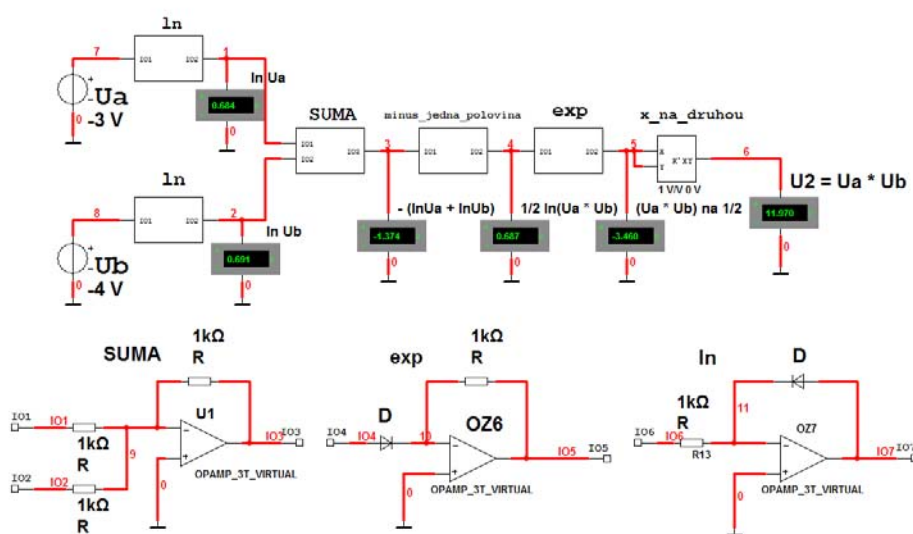
Součástky jsou rozděleny na dva základní druhy: virtuální a reálné. U virtuálních součástek můžeme jednoduše měnit jejich parametry, ale u modelů reálných, vyráběných součástek jsou zohledněny jejich katalogové parametry. Kromě součástek obsahuje program také přístroje různých typů, např. dvoukanálový osciloskop, funkční generátor, generátor datových slov, logický analyzátor. Na rozdíl od laboratorních podmínek nejsme v simulačním programu omezeni počtem součástek a přístrojů ani velikostí pracovní plochy. V simulačním programu lze současně pracovat s více zapojeními, ale simulován může být v daném okamžiku pouze jeden obvod. Pracovní prostředí simulačního programu představuje obr. 1.

Vyučování pomocí virtuální počítačové elektronické laboratoře přináší určitá specifika. Rozhodující skutečností, od které se jednotlivá specifika odvíjejí, je fakt, že při výuce studenti pracují s modely elektronických systémů (diskrétních součástek, dílčích i úplných obvodových zapojení) a přesnost výsledků simulace závisí do značné míry na kvalitě modelů.

Virtuální počítačová elektronická laboratoř poskytuje oproti reálnému experimentu možnosti, které mohou zefektivnit vyučovací proces.

Zapojení simulačních modelů elektronických systémů se vytváří na pracovní ploše pomocí myši, což je rychlé a snadné. Pracovní plocha virtuální počítačové elektronické laboratoře poskytuje dostatek prostoru i pro zapojení složitějších elektronických systémů. V případě potřeby lze pracovní plochu jednoduše zvětšit vytvářením tzv. subobvodů, příp. hierarchických funkčních bloků. Subobvodem rozumíme libovolně vybranou a označenou část zapojení, která se uloží do samostatného bloku a je připojena k okolí prostřednictvím vývodů. Vzniká tak určitá hierarchická struktura v zapojení obvodu. Lze takto vytvářet snadno jednotlivé funkční bloky, jež jsou pak k dispozici v libovolném počtu stejně jako ostatní součástky. Subobvody lze navíc vytvářet do jakékoliv „hloubky“, čímž se pracovní plocha dále zvětšuje. Původní zapojení získá současně na větší přehlednosti, což má z pedagogického hlediska nemalý význam.

Příklad využití subobvodů, které byly vytvořeny jako jednotlivé funkční bloky v programu Multisim NI, ukazuje obr. 2. Zapojení jednotlivých subobvodů – logaritmického ( $\ln$ ) a exponenciálního ( $\exp$ ) zesilovače, analogového sumátoru (SUMA) – byla studenty postupně vytvářena na cvičeních a pak uplatněna v zapojení např. jednokvadrantové analogové násobičky. Jedná se o násobičku, která umí násobit dva vstupní signály z jednoho kvadrantu



Obr. 2 – Ukázka využití subobvodů

(v tomto případě třetího, tzn. obě vstupní napětí musí být záporná). Obrázek demonstuje princip násobičky, který je založen na známé matematické poučce: součet jednotlivých logaritmů je roven logaritmu součinu:

$$\ln U_1 + \ln U_2 = \ln(U_1 \cdot U_2).$$

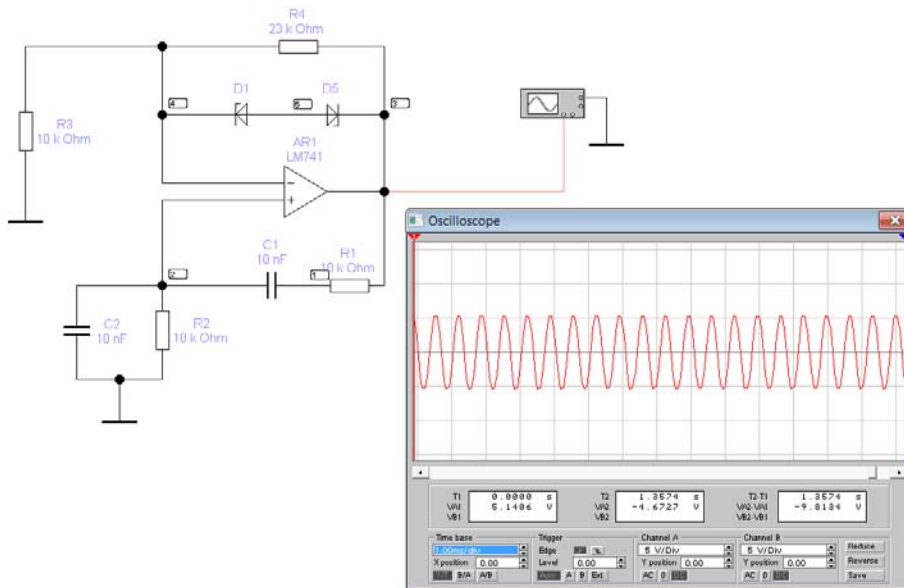
Po úpravě dostáváme:

$$U_1 \cdot U_2 = e^{\ln U_1 + \ln U_2}.$$

Při „praktické“ realizaci narazíme na problém, kdy součet logaritmů je příliš velká hodnota pro vstup exponenciálního zesilovače (dostaneme se do lineární části charakteristiky diody). Proto je do zapojení zařazen blok, který hodnotu součtu vydělí dvěma a obrátí znaménko. Blok obsahuje invertující zapojení operačního zesilovače se zesílením 0,5. Tento zásah ovšem způsobí, že na výstupu exponenciálního zesilovače již není samotný součin, ale jeho odmocnina. Součin můžeme získat umocněním (je v laboratoři k dispozici jako součástka), což je poslední součást zapojení na obr. 2.

Dalším specifickým virtuální počítačové elektronické laboratoře je možnost simulace chování obvodů za nereálných nebo obtížně realizovatelných situací.

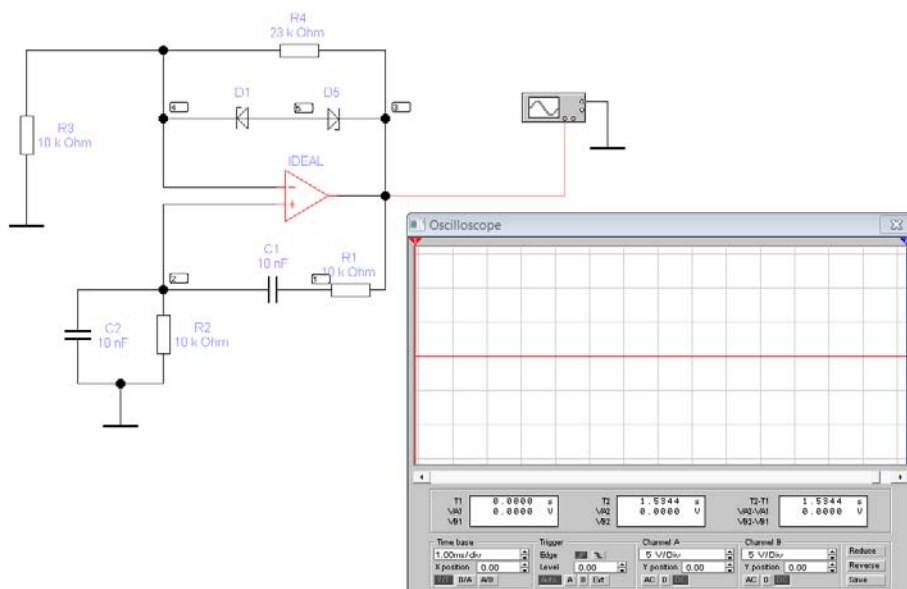
Jako příklad je na obr. 3 uvedena simulace chování oscilátoru s operačním zesilovačem, který má ve zpětné vazbě zapojen Wienův článek. Stabilizace amplitudy je prováděna dvěma antisériově zapojenými Zenerovými diodami ve zpětné vazbě operačního zesilovače. Osciloskop je součástí virtuální laboratoře a ukazuje průběh harmonického signálu na výstupu operačního zesilovače.



Obr. 3 – Zapojení oscilátoru s Wienovým článkem

Na zapojení lze ověřit mj. platnost vztahu pro rezonanční kmitočet, vliv zpětných vazeb na zesilovač, amplitudovou a fázovou podmínku vzniku oscilací v obvodu nebo např. chování obvodu v případě záměny modelu reálného operačního zesilovače za ideální. V takovém případě operační zesilovač nemá žádnou asymetrii a v obvodu nevzniknou bez dalšího vnějšího podnětu oscilace. Posledně uvedenou situaci bychom ve skutečnosti těžko realizovali, přitom je pro pochopení podstaty vzniku oscilací v obvodu významná (obr. 4).

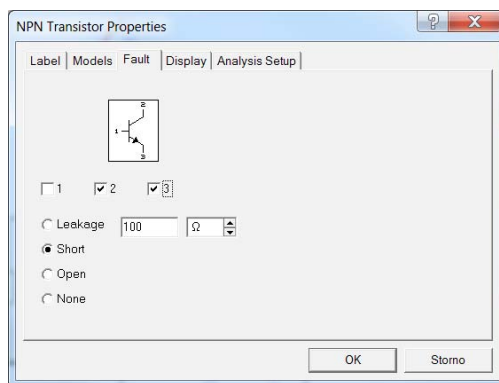
Další zajímavé situace při simulaci chování elektronických systémů mohou vzniknout, zasáhneme-li do modelů jednotlivých součástek. Můžeme např. modifikovat parametry modelů stávajících součástek, čímž vytvoříme model nové součástky, nebo můžeme nastavit závadu u vybrané součástky.



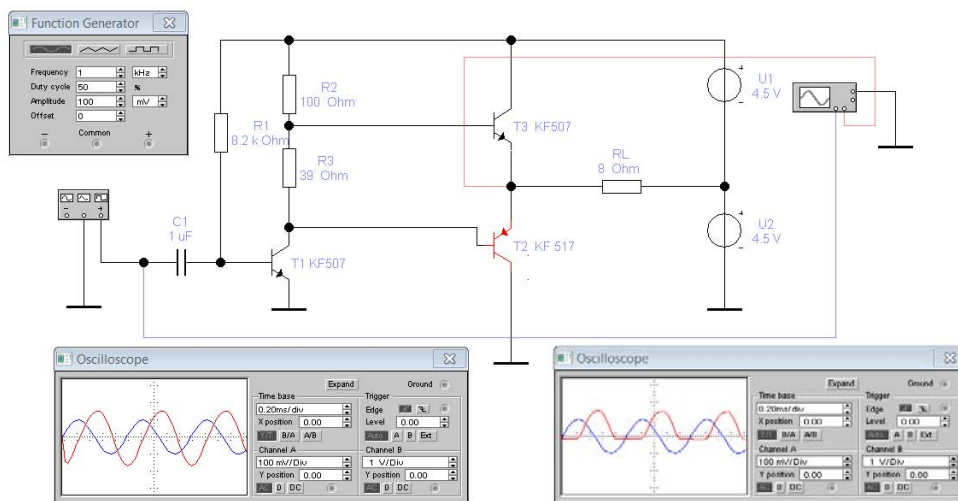
Obr. 4 – Chování oscilátoru při záměně modelu OZ za ideální

Závada může být typu zkrat, rozpojení nebo zadaná ohmická hodnota mezi zvolenými vývody součástek. Na obr. 5 je ukázáno nastavení závady typu zkrat mezi kolektorem a emitorem bipolárního tranzistoru. Tímto způsobem může vyučující podpořit tvůrčí činnost studentů při hledání závady v obvodu.

Jako příklad je uvedeno na obr. 6 zapojení dvojčinného zesilovače s komplementárními tranzistory a s děleným napájecím zdrojem. Závada typu přerušení mezi bází a kolektorem je nastavena u tranzistoru T2. Jako zdroj vstupního signálu je použit funkční generátor, který generuje střídavý signál harmonického průběhu, jehož parametry jsou zřejmé z obr. 6.

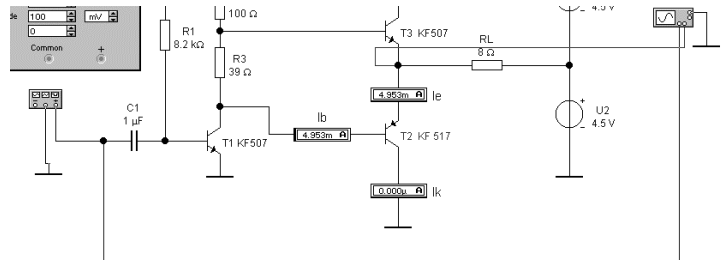


Obr. 5 – Ukázka nastavení závady typu zkrat u tranzistoru



Obr. 6 – Dvojčinný zesilovač s komplementárními tranzistory – na osciloskopu je vidět chování před nastavením závady T2 a po ní

Osciloskop vlevo ukazuje průběhy vstupního a výstupního signálu před nastavením závady, na osciloskopu vpravo je vidět, jak nastavená závada ovlivnila průběh výstupního signálu. Pro zajímavost lze uvést, že oba průběhy na osciloskopu je možné pro přehlednost barevně rozlišit obarvením přívodních vodičů k jednotlivým kanálům osciloskopu. Při hledání závady mají studenti k dispozici veškeré měřicí přístroje. Nalezení závady v tomto případě nebude činit problém, neboť z průběhu výstupního signálu na osciloskopu je zřejmé, že zesilovač nezpracovává zápornou půlvlnu signálu, lze tedy usuzovat na závadu tranzistoru T2. Domněnku si mohou studenti potvrdit např. změřením proudů elektrodami „podezřelého“ tranzistoru, jak je vidět na obr. 7 (stejný bázevý a emitorový proud, nulový proud kolektorem tranzistoru T2).

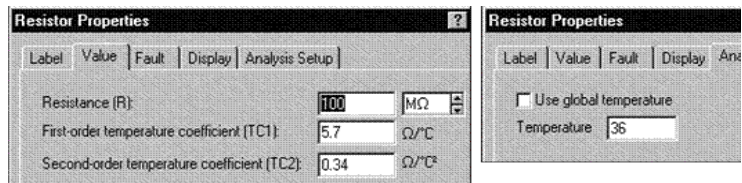


Obr. 7 – Ověření „podezřelé“ součástky měřením proudů elektrodami

Při práci se samotným simulačním programem nejsou studenti omezeni počtem součástek ani měřicích přístroji typu voltmetr nebo ampérmetr. Určité omezení však představuje nabídka typů součástek, pro které jsou připraveny simulační modely. Přestože existují desítky tisíc modelů součástek, může se stát, že požadovaný typ chybí. Může však být k dispozici model ekvivalentní součástky nebo je také možné modifikovat parametry stávajícího modelu, čímž se můžeme modelu požadované součástky přiblížit. Vytvořit však plnohodnotný simulační model složitější součástky není jednoduchou záležitostí. Pro zajímavost lze uvést, že používaný model bipolárního tranzistoru zahrnuje přes 40 modifikovatelných parametrů.

Hodnoty součástek lze v simulačním programu snadno a rychle nastavovat i mimo vyráběné řady hodnot včetně hodnot extrémních, které nelze realizovat vůbec nebo jen těžko. Kromě základních hodnot modelu je možné zadávat také některé další parametry související s teplotní simulací. Lze nastavit teplotu platnou pro zapojení jako celek (globální) nebo teplotu platnou pro konkrétní součástku.

Na obr. 8 jsou ukázány parametry nastavované pro rezistor. Vedle hodnoty rezistance se zadávají další dva teplotní koeficienty  $T_{C1}$  a  $T_{C2}$ .



Obr. 8 – Ukázka nastavení parametrů rezistoru

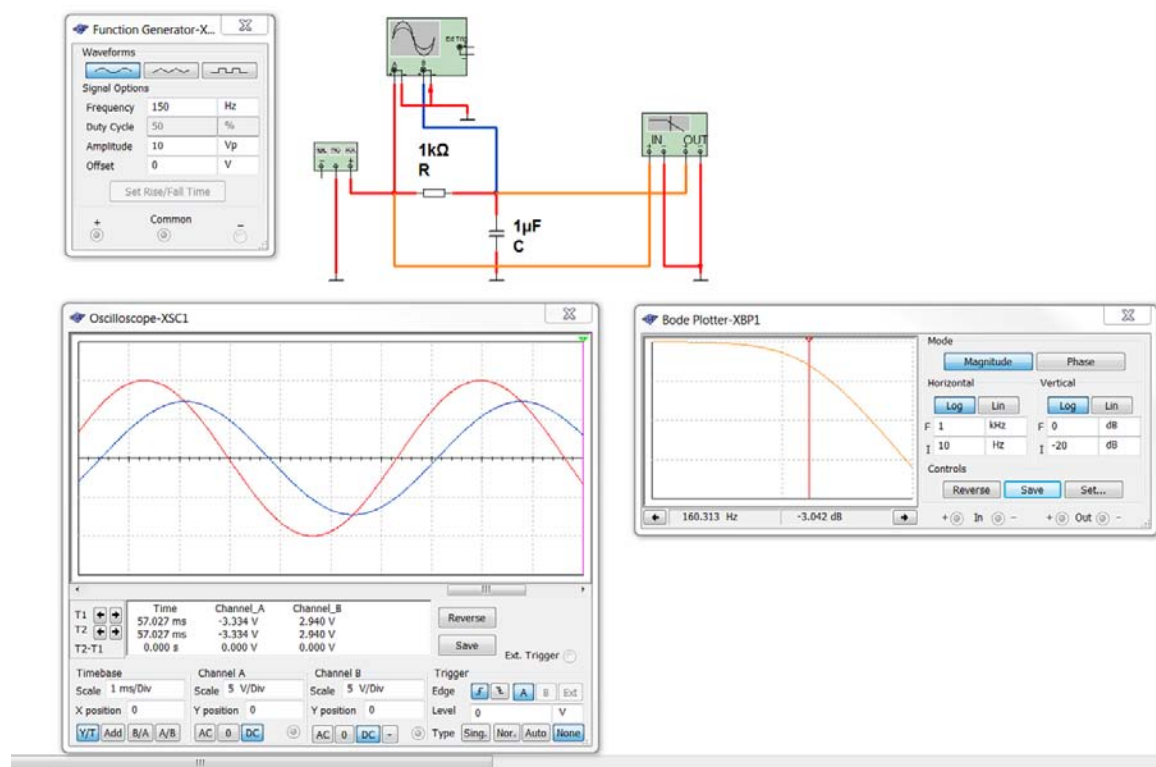
Výslednou hodnotu rezistance pak simulátor počítá z rovnice:

$$R = R_0 \left[ 1 + T_{C1} \cdot (T - T_0) + T_{C2} \cdot (T - T_0)^2 \right],$$

- kde  $R$  ..... rezistance součástky  
 $R_0$  ..... rezistance součástky při teplotě  $T_0$   
 $T_0$  ..... normálová teplota (27 °C)  
 $T_{C1}$  ... první teplotní koeficient  
 $T_{C2}$  ... druhý teplotní koeficient  
 $T$  ..... teplota rezistoru

Dalším specifikem práce ve virtuální počítačové elektronické laboratoři je, že výsledky simulace jsou bezprostředně k dispozici v různých formách. Ukázky zobrazení osciloskopu a Bodeho zapisovače při simulaci chování integračního RC článku jsou uvedeny na obr. 9. Bodeho zapisovač je přístroj virtuální elektronické laboratoře, který zobrazuje amplitudovou frekvenční charakteristiku a fázovou frekvenční charakteristiku.

Velké množství informací o simulovaném obvodu poskytují v grafické podobě také jednotlivé typy analýz, které má virtuální laboratoř k dispozici.



Obr. 9 – Ukázka zobrazení výstupů simulace na osciloskopu a Bodeho zapisovači

Vedle základních typů analýz, jako je např. analýza stejnosměrného pracovního bodu, frekvenční analýza nebo přechodová analýza, lze využít analýzu šumovou, Fourierovu, parametrickou, analýzu Monte Carlo a některé další.

Dalším velmi podstatným specifickým při používání virtuální počítačové elektronické laboratoře je fakt, že výstupy simulace jsou závislé na podmínkách, které nastavíme před spuštěním simulace. Nevhodně zvolené hodnoty parametrů simulace nebo nesprávně nastavený typ analýzy může způsobit stav, kdy se nepodaří dospět při analýze ke konečnému řešení a simulátor může nahlásit chybu. Na druhou stranu opakování počítačové simulace se stejnými nastavenými parametry poskytuje vždy shodné výsledky.