

SPICE JAKO POMŮCKA K POROZUMĚNÍ SCHÉMATU

ing. Zdeněk Biolek, Ph.D.
SPŠE Rožnov p.R., Školní 1610, 756 61 Rožnov p.R.
biolk@spseroznov.cz

Abstrakt

Příspěvek se zaměřuje na dílčí problém, který se projevuje při výuce elektrotechnických předmětů tím, že významná část studentů neumí správně číst elektrotechnická schémata. Článek pojednává o některých zkušenostech se standardem SPICE, který může posloužit jako jedna z pomůcek při řešení tohoto problému.

V čem je problém?

Firmy zabývající se výrobou integrovaných obvodů hlásí v posledních letech trvalý nedostatek lidí, kteří by byli schopni tyto součástky vyvíjet. Přitom je známo, že na jednoho vývojáře, který navrhuje fyzickou podobu čipu (tzv. Layout Engineer), připadají zhruba tři obvodáři, tj. ti, kteří zapojení přímo navrhují a ověřují jeho činnost počítačovými simulacemi (tzv. Design Engineer). Odliv těchto odborníků by mohl být v blízké budoucnosti ještě výraznější, vezmeme-li do úvahy poznatky pedagogů, kterým v současné době procházejí „pod rukama“ studenti elektrotechnických oborů na středních odborných školách.

V nově nastupující generaci studentů je totiž stále méně těch, kteří mají přímou obvodářskou zkušenost. Dnešní studenti již nemívají popálené prsty od pájení neposlušných drátků a pomalu ani neví, jak voní roztavená kalafuna. Skutečnost, že nikdy nezažili proces, kdy se z pouhého schématu vytváří něco hmatatelného, co nakonec třeba hraje nebo bliká, se pak během studia promítne do roztočivých pedagogických situací, se kterými si mnohdy nevíme rady. Zdá se, že společnou příčinou mnoha problémů je *neschopnost studenta vidět za elektrickým schématem skutečné zapojení*.

Vnímání schématu jako pouhého obrázku je obrovský handicap. V následujícím oddílu je popsáno několik problémů, ke kterým tento postoj vede. Všechny jsou skutečně odporované z praxe.

Nejčastější chyby

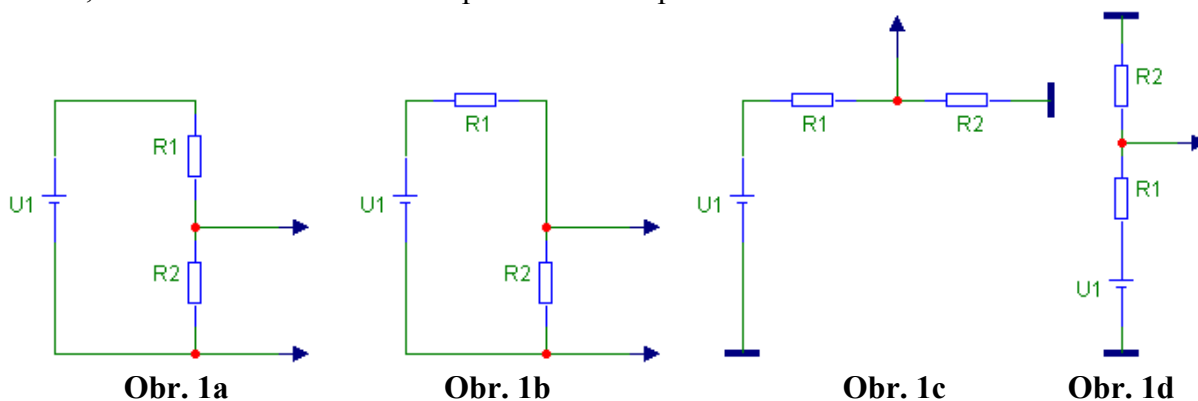
Je snadno pochopitelné, že ten, kdo nemá vlastní zkušenost 1. se zapojováním součástek do smysluplného celku a 2. s jeho ožíváním, bude mít zákonitě problémy ve dvou analogických oblastech při používání pouhého schématu. U takto handicapovaných studentů, kteří neumí číst schéma jinak než jako obrázek, lze rozpoznat problémy, které se týkají 1. topologie a 2. logiky.

Problémy z oblasti topologie

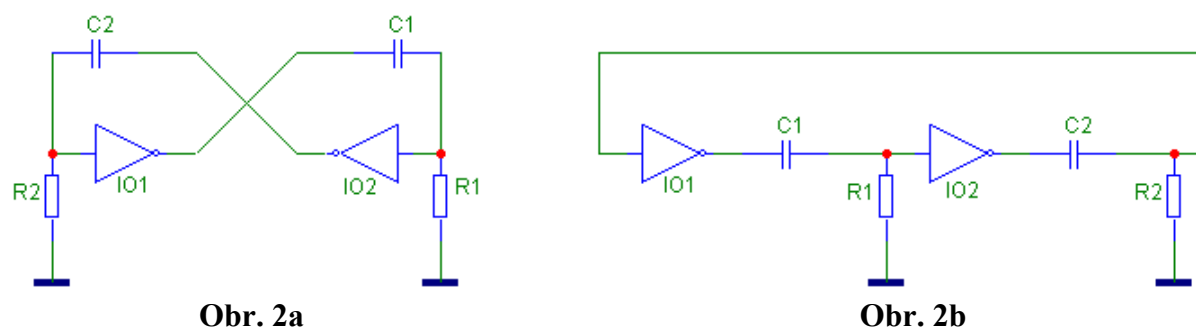
Každému, kdo je zvyklý pracovat s páječkou v ruce na prototypu typu „vrabčí hnízdo“, je jasné, že ve velké většině případů je pro funkčnost zapojení naprosto nepodstatné, jakým způsobem jsou součástky a spoje mezi nimi rozmístěny v prostoru. Je lhostejné, zda natvarujeme spojovací vodič do pravého úhlu či do oblouku, stejně jako nezáleží na tom, zda odpory napěťového děliče umístíme paralelně vedle sebe nebo kolmo k sobě. Jinak řečeno, při zachování topologie obvodu se zachovává i funkčnost.

U člověka bez této zkušenosti vznikají netušené problémy. Pokud si zafixuje jediný učebnicový příklad napěťového děliče jako pouhý obrázek (obr. 1a), může se stát, že v jinak

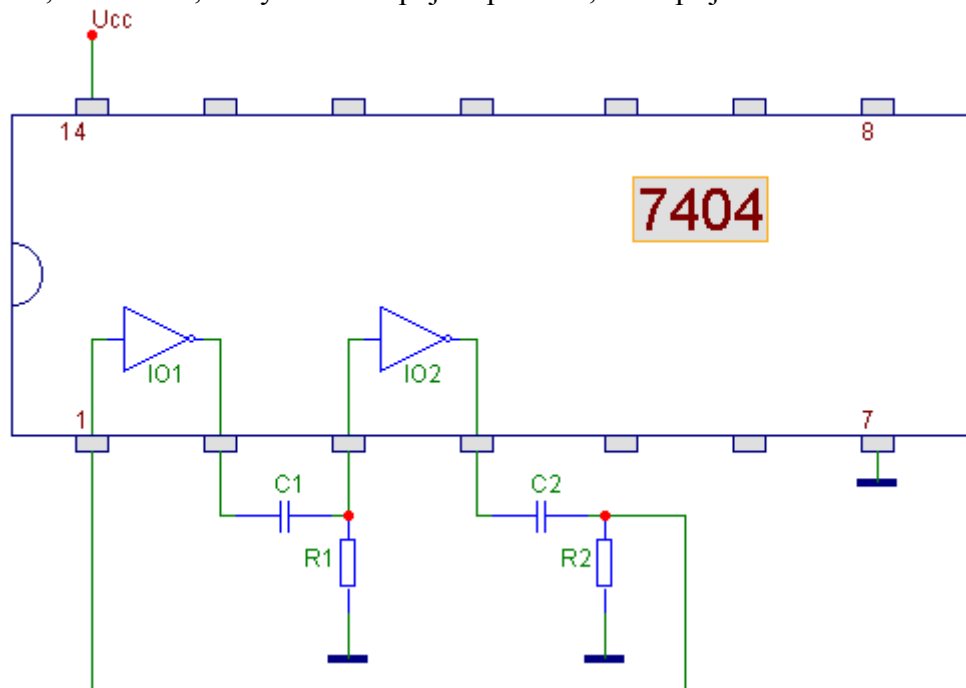
překresleném schématu téhož obvodu již napěťový dělič nepozná (obr. 1b - d). To je bohužel realita, se kterou většina kantorů dopředu vůbec nepočítá.



Další příklad vidíme na obr. 2a, který ukazuje, jak se v učebnicích obvykle kreslí symetrické zapojení astabilního klopného obvodu.



Průměrného studenta většinou nenapadne, že obě zapojení podle obr. 2a a obr. 2b jsou ekvivalentní, kdežto ten, který si toto zapojení postavil, na to přijde lehce.



I kdybychom při zapojování obvodu vycházeli z předlohy na obr. 2a, dovedla by nás souhlasná orientace hradel uvnitř IO nenásilným způsobem ke schématu podle obr. 2b. Navíc se přirozeným způsobem zviditelnila zpětná vazba, díky které lze pochopit skutečnou podstatu obvodu a která je v učebnicové ukázce za cenu líbivého zapojení poněkud zastíněna.

Praktická obvodářina nás tedy může mnohému naučit. Studenti, kterým tato zkušenost chybí, mají naopak tendenci naučit se vzorové schéma nazpaměť a tím to pro ně končí.

Problémy z oblasti logiky

Každý, kdo postavil a následně oživoval „vrabčí hnízdo“ podle obr. 3, ví, že chce-li např. změřit napětí na odporu R_2 , na který se však nedostane měřicím hrotem, může totéž napětí pohodlně změřit mezi piny 1 a 7 integrovaného obvodu. Studentům bez praktických zkušeností, kteří mají k dispozici schéma, takové věci prostě nedocházejí. Schéma zapojení nadále vnímají jako pouhý obrázek bez vnitřní logiky.

Neustále se setkáváme s dalšími logickými chybami, které vyplývají z nedostatku praktických zkušeností. Častou chybou je mylná představa některých studentů, že nepřivedou-li na vstup obvodu „nic“, tj. nechají-li jej rozpojený, bude na něm nulové napětí. Teoretické vysvětlování vedené přes Ohmův zákon mnohdy nebývá úspěšné. Často se také stává, že studenti automaticky vyhodnocují všechny vodiče, které jsou ve schématu označeny hodnotou napětí, jako napěťové *vstupy* a při následné analýze mají tendenci připojovat k nim napěťové zdroje. Je-li ve schématu vyznačeno místo pro připojení symetrického napájení, mnohdy se domnívají, že vystačí pouze s jedním „vhodně polarizovaným“ zdrojem.

Úlohy, při kterých jsou studenti přímo nuceni pracovat s prvky obvodu a zapojují je při nejrůznějších měřeních nebo při práci v elektrotechnických dílnách, nejsou tedy ničím nahraditelné. Dobrým doplňkovým cvičením může být náhrada grafické podoby zapojení netlistem SPICE.

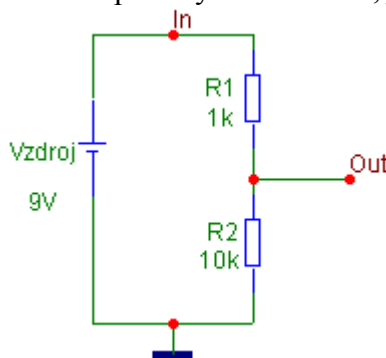
Základy použití SPICE

Zkratka SPICE je odvozena od slovního *spojení Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*, což lze volně přeložit jako „Simulační program určený především pro zapojení s integrovanými obvody“. Program slouží k všestranné analýze elektrických obvodů, přičemž vlastní zapojení obvodu, požadavky na druh a způsob analýzy a zpracování výsledků se zadávají ve formě textového vstupního souboru. Dnes je zkratkou SPICE označován nejen program, ale mnohdy také formát, kterým je napsán tento vstupní soubor. SPICE je dnes na poli obvodových simulátorů nepsaným standardem.

Vývoj programu proběhl počátkem 70. let na Kalifornské univerzitě v Berkeley a byl financován ze státního rozpočtu USA, proto je ve veřejném užívání (public domain). Dnes existuje řada komerčních podob tohoto programu. Mnohé simulátory umí kromě zadání schématu grafickou cestou také načítat zapojení v textovém formátu SPICE.

Struktura vstupního souboru

Pro pedagogické účely bude zajímavý právě onen textový formát, kterým se dá popsat schéma zapojení (a dokonce i vlastnosti použitých součástek, jak uvidíme později).



Obr. 4

Zápis napěťového děliče z obr. 4 by mohl vypadat v textové podobě takto:

```
Napetovy delic
*Povinna hlavicka, ktera neni programem interpretovana
*
*Zapis schematu
VZDROJ In 0 9V
R1 In Out 1K
R2 Out 0 10K
*
*Prikazy pro rizeni simulace
.DC VZDROJ 0 9 0.1
.TEMP 27
.PLOT DC V([OUT]) 0,10
*
*konec vstupniho souboru
.END
```

Celý zápis má neměnnou strukturu, která začíná povinnou hlavičkou. Hlavičku tvoří první řádek, jehož obsah není programem nijak interpretován a slouží pouze jako titulek, do kterého můžeme psát název obvodu, verzi simulace apod. Tento řádek také může zůstat prázdný.

Druhé části se někdy říká „netlist“. Zde je popsáno schéma zapojení z hlediska propojení všech použitých součástek i jejich vlastností. Typ součástky se určí podle prvního znaku jména (např. zdroje napětí začínají na „V“, rezistory na „R“, kapacitory na „C“, induktory na „L“), za jménem součástky následuje výčet uzlů, mezi které je součástka svými vývody připojena. Řádek identifikující součástku je zakončen údajem, který popisuje její vlastnosti. V případě napěťového zdroje je to hodnota napětí ve voltech, v případě rezistoru je to hodnota odporu v ohmech.

Ve třetí části vstupního souboru se nacházejí příkazy, které říkají programu, jaký typ analýzy se má spustit, za jakých podmínek má simulace proběhnout a jakým způsobem mají být výsledky simulace zobrazeny.

Vstupní soubor je zakončen příkazem „end“.

Naše zapojení se dá stručně popsat takto:

- Napěťový zdroj Vzdroj o napětí 9V je připojen kladným pólem k uzlu „In“ a záporným na zem (která má vždy číslo „0“).
- Mezi uzel „In“ a výstupní uzel „Out“ je zapojen rezistor R_1 o odporu 1k Ω .
- Mezi uzel „Out“ a zem je zapojen rezistor R_2 o odporu 10k Ω .
- Program vykoná stejnosměrnou (DC) analýzu, při které vypočítává ustálené hodnoty všech napětí a proudů při postupně se zvětšujícím napětí zdroje Vzdroj od 0 do 9V po 0.1V.
- Simulace probíhají pro teplotu součástek 27° C.
- Na výstupní zařízení (monitor) se tisknou v grafické podobě výsledky stejnosměrné (DC) analýzy, přičemž závisle proměnnou bude napětí na uzlu „Out“ a osa nezávisle proměnné (napětí zdroje Vzdroj) bude začínat na „0“ a končit na „10“.

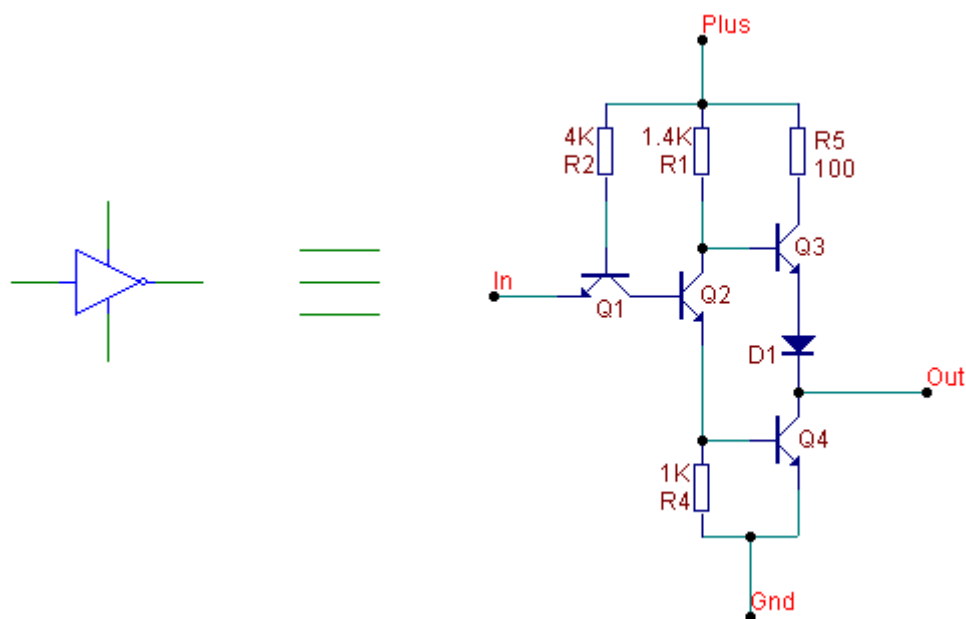
Některé programy umožňují zadat příkazy pro řízení simulace svým vlastním způsobem, v těchto případech můžeme tuto sekci ve vstupním souboru vynechat a zapisovat pouze netlist. To platí pro program MicroCap 7, který je pro výuku velmi vhodný.

Vstupní soubor napsaný pro schéma podle obr. 4 platí pro všechny varianty uvedené na obr. 1b - d, tj. pro všechna zapojení zachovávající topologii a parametry.

Makroobvody

Vyskytuje-li se v zapojení složitější celek jako např. integrovaný obvod, můžeme s ním pracovat jako s obyčejnou součástkou reprezentovanou svými vývody, přičemž vnitřní zapojení, které je do součástky zapouzdřeno, nás ani nemusí příliš zajímat. V dnešní době nabízejí výrobci integrovaných obvodů makromodely svých výrobků na Internetu zcela běžně.

Astabilní klopný obvod podle obr. 2a je postaven ze dvou hradel TTL invertorů, jejichž vnitřní zapojení je na obr. 5. Model invertoru musí mít 4 vývody (vstup, výstup, napájení a zem), čemuž odpovídá jeho schematická značka. U takto modelované součástky lze např. zkoumat, co se stane, opatříme-li každé hradlo jiným napájením.



Obr. 5

Zápis makromodelu neboli „vnitřku“ složitější součástky má opět jednoduchou, avšak pevně stanovenou strukturu. Uveďme si model TTL invertoru z obr. 5.

```
.subckt In Out Plus Gnd SN7404
D1 7 Out DIODA
Q1 2 9 In QN
Q2 1 2 3 QN
Q3 6 1 7 QN
Q4 Out 3 Gnd QN
R1 Plus 1 1.4K
R2 Plus 9 4K
R4 3 Gnd 1K
R5 6 Plus 100
.MODEL DIODA D (IS=10F TT=10N CJO=900F VJ=0.7)
.MODEL QN NPN (BF=75 IS=1F CJC=5P CJE=2P VAF=50 TF=.5N TR=5N
+ VAR=100)
.ENDS
```

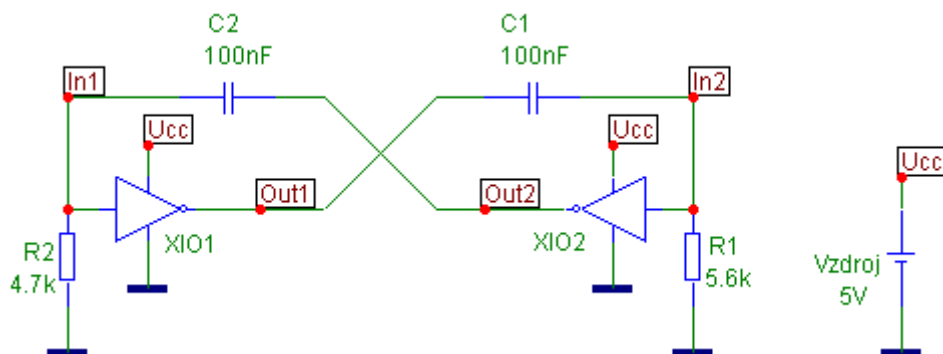
Úvodní příkaz „subckt“ značí definici „podobvodu“ a závěrečný příkaz „ends“ znamená konec podobvodu, všechno mezi těmito příkazy popisuje vnitřní zapojení. Za klíčovým

slovem „subckt“ následuje seznam pojmenovaných vývodů (In, Out, Plus a Gnd) a řádek je zakončen jménem součástky (SN7404).

Vnitřní uzly integrovaného obvodu jsou očíslovány a k nim jsou připojeny rezistory (R), bipolární tranzistory (Q) a dioda (D). Za jménem tranzistoru (např. Q1) následuje seznam uzlů, ke kterým jsou připojeny kolektor, báze a emitor. Za jménem diody (D1) jsou čísla uzlů, ke kterým jsou připojeny anoda a katoda. Na posledním místě, na kterém byla u rezistoru hodnota odporu, je u tranzistoru a diody jméno modelu (QN a DIODA). Polovodičové součástky jsou totiž charakterizovány celým vektorem parametrů a nevystačí pouze s jedinou hodnotou. Tyto vektory se deklarují příkazem „model“, ve kterém je jméno modelu přiřazen typ (NPN nebo PNP pro bipolární tranzistory, D značí polovodičovou diodu) a v závorce jsou vyjmenovány hodnoty parametrů, které se u tohoto konkrétního typu odlišují od implicitních – přednastavených hodnot. Prázdná závorka by znamenala součástku s hodnotami, které SPICE považuje za nejběžnější.

Makroobvody SPICE běžný uživatel nevytváří, většinou je dává k dispozici výrobce součástky a je možno si je stáhnout na Internetu. Více k formátu SPICE nalezne čtenář v [1].

Makromodel lze uchovávat v textovém souboru a ze vstupního souboru se na něj můžeme odvolávat.



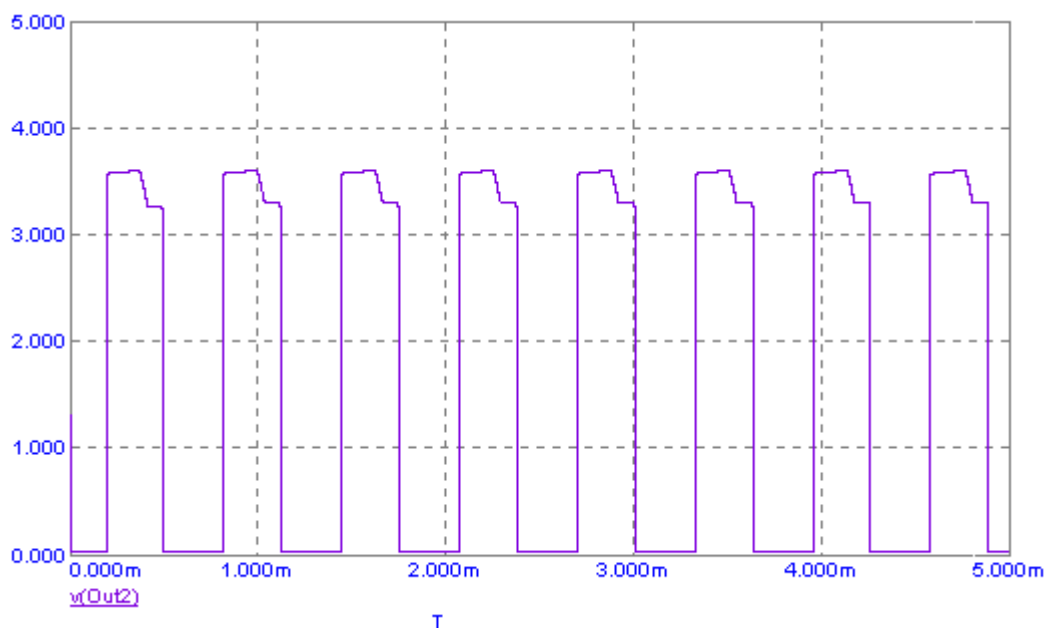
Obr. 6

Předpokládejme, že makromodel TTL invertoru je umístěn v souboru SN7404.LIB. Netlist popisující astabilní klopný obvod podle obr. 6 pak bude vypadat následovně.

```
Astabilni klopný obvod
*
*Zapis schematu
VZDROJ Ucc 0 5V
R1 In2 0 5.6K
R2 In1 0 4.7K
C1 In2 Out1 100nF
C2 In1 Out2 100nF
XIO1 In1 Out1 Ucc 0 SN7404
XIO2 In2 Out2 Ucc 0 SN7404
*
.lib ./SN7404.LIB
*link na knihovnu s makroobvodem
*konec vstupniho souboru
.END
```

Makroobvody (v tomto případě integrované invertory) se považují za jeden typ součástky, jejíž jméno začíná na „X“. Následuje seznam uzlů, ke kterým jsou připojeny její vývody a nakonec se uvádí jméno makroobvodu (které se musí shodovat se jménem v příkazu „subckt“).

Na obr. 7 je ukázka časového průběhu výstupního napětí na uzlu Out2, tak jak ho vypočítal simulátor.

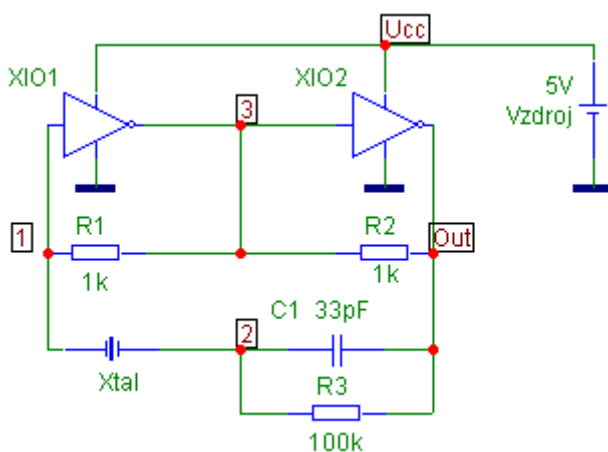


Obr. 7

SPICE jako užitečná pomůcka

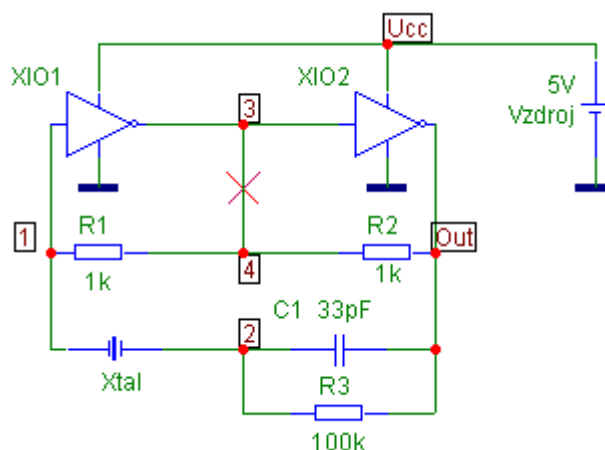
Vstupní soubor SPICE se dá metodicky použít jako pomůcka proti nešvaru vnímat schéma jako obrázek. Dá se použít převod „schéma – netlist“ i opačný postup „netlist – schéma“.

V prvním případě, kdy ze schématu zapojení tvoříme textový zápis netlistu, napodobujeme přirozený postup budování jednotlivých propojek podle grafické předlohy. Tak většinou postupujeme při praktické práci s páječkou v ruce. Student je přímo nucen uvědomit si, kde jsou uzly, musí si je označit a mezi ně „připojit“ součástky.



Obr. 8

Typ propojení, ve kterém se často chybí, je na obr. 8. Studentům dělá problém uzel 3, do kterého nezahrnou spojení mezi R1 a R2. Pokud toto spojení pojmenují jinak, výsledkem budou dva různé uzly bez vzájemného propojení, jak ukazuje obr. 9. Zapojení samozřejmě nefunguje, o čemž se student může přesvědčit následnými pokusy se simulátorem.



Obr. 9

Opačný postup, kdy dáme studentům za úkol nakreslit schéma zapojení podle netlistu, je ještě zajímavější. Sestavit schéma z netlistu není jednoznačnou úlohou, neboť máme neomezenou volnost k přeskupování prvků schématu. Víme pouze, jak jsou jednotlivé součástky propojeny mezi sebou navzájem. Takové úlohy jsou vynikající k procvičení topologie a tím i fantazie, které je pro práci se schématem zapotřebí.

Závěr

Příčiny odlivu zájmu studentů o praktickou činnost v oblasti klasické elektroniky jsou zřejmě v konzumní orientaci současné společnosti. Je přece mnohem snadnější koupit si hotový výrobek než vyvíjet a stavět něco sám. Velkým lákadlem pro mladé lidi je moderní výpočetní technika a s ní bohužel i převážně pasivní trávení volného času. Existuje-li lék na potíže vylíčené v tomto článku, pak je to úsilí o zavedení větší názornosti do výuky skrze praktickou činnost.

Pro cvičení představivosti a vytváření správných návyků při práci s elektrotechnickým schématem lze s úspěchem použít obvodový standard SPICE. Dosavadní zkušenosti ukazují, že tato metoda může mít u žáků úspěch. Jde o zajímavou práci s počítačem. Součástí projektů je simulace činnosti obvodů s moderními součástkami, jejichž modely bývají volně dostupné na Internetu. Nezanedbatelná část studentů využívá tohoto prostředku k předběžnému ověřování funkčnosti svých maturitních výrobků.

Všechny příklady v tomto článku jsou zpracovány ve studentské verzi simulačního programu MicroCap 7, který je zdarma dostupný na Internetu [2].

Literatura

- [1] Kejhar, M., Kirschner, M., Musil, V., Stříbrný, V.: Program SPICE v příkladech. Skriptum. Vydavatelství ČVUT, Praha 1995.
- [2] Studentská verze programu MicroCap 7.
<http://www.spectrum-soft.com/demo.shtm>