

## Simulace elektrických obvodů v programu Micro-Cap

(stručný popis pro základní seznámení a práci s programem v předmětech ZEO a EOS)

Program Micro-Cap (nyní ve verzi 9) je relativně snadno zvládnutelný software pro simulaci elektrických obvodů v ustálených stavech, při přechodných dějích i pro další druhy simulací (např. citlivostní analýzu). Námi používaná demoverze má některá omezení, která však pro účely výuky základů elektrických obvodů nejsou na závadu (max. počet prvků a uzlů v obvodu, omezená rychlost simulace, omezený rozsah modelů skutečných součástek atd.). Micro-Cap je poměrně mocným nástrojem pro simulace s relativně snadným zadáváním obvodů, lehce pochopitelným nastavením parametrů simulace a dobře propracovanou a jednoduše nastavitelnou grafickou prezentací výsledků. Software Micro-Cap je určen pro operační systém Windows, lze ho však provozovat v systémech Linux pomocí emulátoru Wine.

Obvod pro analýzu se zadává nakreslením zapojení v integrovaném schématickém editoru. Program si na základě schématu sestaví matematický popis obvodu (soustavu rovnic), jejíž řešení se provádí numericky. Správnost výsledků simulace závisí na výchozích podmínkách, nastavení parametrů simulace apod. Zejména je třeba kontrolovat dostatečný počet bodů řešení přechodných jevů v časové oblasti. Zde může vlivem podvzorkování snadno dojít k mylné interpretaci výsledků simulace. Výsledky simulace je tedy vždy nutno kontrolovat zdravým selským (obvodářským) rozumem :-). Převážně se však lze na výsledky dobře zadané simulace spolehnout, zvláště v případě jednoduchých obvodů v ustálených stavech.

Zájemce o podrobné studium programu Micro-Cap lze odkázat na česky psanou knihu [1].

### 1.1 První spuštění programu, základní položky menu

Předpokládejme, že se nám podařilo program Micro-Cap úspěšně nainstalovat. Po spuštění programu se nám zároveň otevře nový prázdný soubor schématu zapojení obvodu s názvem **circuit1.cir**. Nyní již můžeme začít kreslit svůj první obvod. Nejdříve však několik poznámek k některým položkám menu.

Z položky **File** (*soubor*) pro nás budou nyní důležité následující položky nižší úrovně menu:

→ **New...** (nový soubor) – otevře nový prázdný soubor se schématem obvodu (Schematic File - **.cir** (= CIRcuit)), makro soubor (Macro File - **.mac**) a další. Jakožto začátečníci si vystačíme pouze s prvním případem. Souborů se schématem obvodu může být otevřeno více zároveň.

→ **Open...** (otevřít soubor) – otevře uložený soubor vybraného „Micro-Cap“ typu, standardně se nabízí typ **.cir** pro soubor se schématem obvodu.

→ **Save** (uložit soubor) – uloží aktuální soubor např. schéma obvodu (.cir). Soubory se ukládají standardně do adresářů definovaných v nastavení programu. Doporučuje se rozpracovaný obvod ukládat, abychom předešli případné ztrátě dat. Zvláště se doporučuje uložení úprav v zapojení před spuštěním vlastní simulace. Během simulace je přeci jen větší riziko, že program případně „ztuhne“ či „spadne“, ačkoliv se to stává spíše výjimečně.

→ **Save as...** (uložit soubor jako) – uložení souboru pod jiným jménem.

→ **Paths...**(cesty) – nastavení cest k adresářům, kde jsou uloženy datové soubory pro Micro-Cap. Cesta k souborům schémat obvodů (.cir) se nastavuje v první položce **Data**.

→ **Close...**(zavři soubor) – zavře aktuálně používaný soubor.

→ **Exit...**(konec) – ukončení programu Micro-Cap.

Některé často používané položky menu jsou, jak je zvykem, dostupné také pomocí tlačítek (ikon) v panelech nástrojů. Z menu **File** jsou to např. položky **New**, **Open** a **Save**. Při pohybech v položkách menu se zobrazuje kontextová nápověda v stavovém pruhu okna programu (Status Bar – u spodního

okraje okna). Micro-Cap poskytuje tuto kontextovou nápovědu ke většině činností při najetí kurzoru na příslušný objekt (položku menu, ikonu, součástku v zapojení, položku při nastavování parametrů simulace a vlastností součástek, nastavení grafického výstupu programu apod.). Tato vlastnost je velmi užitečná zvláště při zadávání parametrů modelu součástky a při nastavování grafického výstupu simulací, kdy kontextová nápověda obsahuje také syntaxi vkládaného parametru. Málokdy jsme tedy nuceni nahlédnout do kompletní nápovědy (**Help**) programu či do dokumentace. Při umístění kurzoru myši nad tlačítka v pruzích nástrojů se navíc zobrazí také „bublinová“ nápověda.

V další položce menu, položce **Edit** (úpravy) najdeme známé „editační příkazy“ pro práci s textem, součástkami ve schématickém editoru apod. Tedy zejména položky **Cut** (vyjmout), **Copy** (kopírovat) a **Paste** (vložit), případně také **Undo** (zpět) a **Redo** (opakovat).

Zajisté už jste nedočkaví a nejradši byste se pustili do kreslení nějakého schématu, ale napřed je vhodné se stručně zmínit o čtvrté (**Windows**) a páté (**Options**) položce menu. Položka **Windows** (okna) umožňuje kromě jiného uspořádat různá dílčí podokna v okně programu (**Cascade**, **Tile Vertical**, **Tile Horizontal**). Typicky po vykreslení výsledků analýzy v grafické podobě máme v programu alespoň dvě podokna a to okno se zapojením obvodu a okno s grafickými výsledky analýzy. Pokud jsme např. zapomněli, jak jsou očíslovány uzly či označeny součástky, tak je vhodné mít vedle sebe zobrazena obě zmíněná okna.

Položka **Options** (volby) zahrnuje nastavení mnoha různých parametrů programu. Několik prvních položek nastavuje, které lišty, panely nástrojů a další ovládací prvky budou zobrazeny (zvolené lišty či panely jsou označeny zatržením znakem „zatržítka“):

→ **Main Tool Bar** – hlavní lišta nástrojů, standardně se zobrazuje.

→ **Default Main Tool Bar** – obnovení „default“ nastavení a rozvržení tlačítek hlavní lišty nástrojů.

→ **Status Bar** – stavový pruh na spodním okraji okna (kontextová nápověda), standardně se zobrazuje.

→ **Panel** – postranní panel s nabídkou obvodových prvků (součástek), pohodlná alternativa k výběru součástek (při kreslení zapojení obvodu) ze standardního menu **Component** nebo z palet součástek (**Options** → **ComponentPalletes**).

→ **Window Tabs** – zobrazování „poutek“ („oušek“) u dílčích programu. Poutka se zobrazují u spodního okraje podokna a obsahují jeho název. Pomocí poutek lze snadno mezi okny přepínat.

## 1.2 Kreslení schématu zapojení, prvky obvodů

Kreslení zapojení můžeme zahájit poté, co máme otevřený nový prázdný soubor (.cir) pomocí příkazu **File** → **New...** nebo automaticky po spuštění programu. Součástky vybíráme ze seznamu a umístíme kliknutím na plochu editoru schémat, součástky propojujeme pomocí vodičů. Schématický editor má několik různých módů, kdy buďto vybíráme a umístíme prvky (součástky), propojujeme je pomocí vodičů, zadáváme popisný text, kreslíme grafické objekty a podobně. Aktuální mód editoru se nastavuje pomocí menu **Options** → **Mode** → nebo pomocí tlačítek na druhém horním pruhu nástrojů (1. skupina tlačítek (prvních 10 tlačítek)). Základní módy, se kterými je nutno se seznámit jsou:

→ **Select Mode** – umožňuje označit (vybrat) prvek, vodič, skupinu prvků a označené prvky poté přesouvat, mazat je, kopírovat atd. Prvek zvolíme jednoduchým kliknutím na jeho grafický symbol, držíme-li klávesu <Shift> lze označit najednou více prvků. Skupinu prvků lze také vybrat označením obdélníkové oblasti (stisknout levé tlačítko myši a držet, táhnutím myši označit oblast, tlačítko uvolnit). Označené prvky jsou zvýrazněny barevným podkladem. Označené prvky lze „uchopit“ myší a přesunout je na jiné místo (drag & drop = táhni a pusť), smazat klávesou <Del>, zkopírovat a vložit pomocí <Ctrl+C> a <Ctrl+V>, případně vyjmout a vložit pomocí <Ctrl+X> a <Ctrl+V>. Příkazy pro manipulaci s označenými objekty jsou též dostupné z menu **Edit**. Často potřebnou funkcí je duplikace již existující součástky, kterou provedeme nejnázne následovně. Stiskneme a držíme klávesu <Ctrl> a

pomocí myši „uchopíme“ a „táhneme“ zvolenou součástku (nebo celou označenou skupinu součástek) na jiné místo a následně součástku „pustíme“ a teprve poté uvolníme klávesu <Ctrl>. „Tažená“ součástka zůstane na původním místě a na místě, kde jsme „pustili“ se objeví její duplikát. Držíme-li klávesu <Ctrl> a opakujeme postup „uchop – táhni – pust“, jednoduše si tak danou součástku mnohonásobně „naklonujeme“.

Standardně se při přesunu na jiné místo daný prvek nebo skupina „utrhne“ od vodičů v místech spojení. Pokud chceme spojení vodiči zachovat, aby se při přesunu „natáhly jako gumičky“, je nutno zapnout volbu **Rubberbanding**. To je možné buď komplikovaně přes menu: **Options** → **Preferences** → **Options-Circuit** a pak zatrhnout volbu **Rubberbanding**. Nebo rychleji pomocí tlačítka v druhé části druhého panelu nástrojů (poslední ikona 2. části, něco jako šipka ukazující na značku cívky) či pomocí klávesové zkratky <Ctrl+Shift+R>, jejíž použití vám umožní snadno najít zmiňované tlačítko, které se „zamáčkne“.

→ **Component Mode** – vkládání součástek na plochu editoru. Součástky jsou rozděleny do několika logicky členěných skupin (knihoven) a podskupin. Součástku napřed vybereme některým z možných způsobů: 1. z menu pod položkou **Component**, poté vybereme skupinu, podskupinu a nakonec příslušnou součástku (prvek); 2. z postranního panelu, který je nutno mít zobrazen (viz menu **Options** → **Panel**); 3. z menu přes položku **Options** → **ComponentPalletes** →. Součástku umístíme na plochu jednoduchým kliknutím, po němž se otevře okno s nastavením parametrů součástky, kde je možno a někdy i nutno nastavit alespoň některé parametry a potvrdit tlačítkem **OK**. Okno parametrů prvku kdykoliv znovu zobrazíme dvojklikem na jeho značku (doprostřed). Chceme-li součástku při umístění otočit do jiné polohy (po 90°) stiskneme a podržíme levé tlačítko myši a opakovaným stiskem pravého tlačítka natočíme součástku do žádané polohy a poté uvolníme levé tlačítko. Stejným postupem můžeme natočit již umístěnou součástku. Mezi **Select Mode** a **Component Mode** lze rychle přepínat pomocí mezerníku na klávesnici.

→ **Text Mode** – vkládání textu, textových popisků.

→ **Orthogonal Wire Mode** – kreslení pravoúhle vedených vodičů pomocí myši, vodiče lze kreslit po částech, automaticky se napojují. Standardně se jako zvýrazněné uzly vykreslují pouze místa spojení tří a více vodičů (větví). Je možné zobrazit všechna místa napojení vodičů, což může odhalit např. místa nechtěného propojení křížících se vodičů. Zobrazení všech bodů napojení aktivujeme buďto z menu **Options** → **View** → **Pin Connections** nebo alternativně tlačítkem v druhé části druhého panelu nástrojů (předposlední ikona 2. části panelu, vypadá to jako „činka“). Označování, přesouvání, mazání a kopírování vodičů viz poznámky k módu **Select Mode**.

→ **Diagonal Wire Mode** – kreslení úhlopříčně vedených vodičů pomocí myši.

Ostatní módy nejsou pro základní kreslení schémat obvodů až tak důležité a je možno je ponechat na samostudium. Kromě jiného slouží další módy např. ke grafickému „okrašlování“ schématu.

### 1.3 Důležité základní obvodové prvky, parametry prvků

Obvodové prvky jsou rozděleny do pěti základních kategorií a to:

– **Analog Primitives** – základní analogové (ideální) obvodové prvky a obecné modely některých skutečných analogových součástek, např. polovodičových (dioda, tranzistor, tyristor...). Až na výjimky prvky dostupné i v demo verzi Micro-Capu.

– **Analog Library** – rozsáhlé knihovny modelů skutečných analogových součástek (výběr podle skutečného typového označení). Většina modelů není v demo verzi dostupná (v menu označeno šedým písmem, v postranním panelu poznámkou „(Professional version only)“. V demo verzi je přístupno vždy jen několik málo základních notoricky známých typů součástek od každého druhu.

– **Digital Primitives** – základní digitální (či spíše „logické“) prvky, převážně různé typy hradel a generátory logických signálů. Patrně všechny prvky dostupné i v demo verzi Micro-Capu.

– **Digital Library** – rozsáhlé knihovny modelů skutečných digitálních součástek (výběr podle skutečného typového označení). Většina modelů není v demo verzi dostupná (viz **Analog Library**).

– **Animation** – animované prvky, které se při simulaci hýbou, svítí a točí (voltmetr, ampérmetr, spínač, přepínač, LED dioda, motor ad.). Všechny „oživlé“ prvky jsou dostupné i v demo verzi.

Následuje výběr prvků důležitých pro teorii elektrických obvodů s ohledem na rozdělení do kategorií a podkategorií. Potřebné prvky nalezneme v podstatě pouze v kategorii **Analog Primitives**, prvky z kategorie **Animation** pak poněkud „zlidští“ některé simulace a probudí pozornost jinak apatických studentů ;-). Některé základní prvky mají též své tlačítko ve 3. sekci 1. panelu nástrojů.

### **Analog Primitives** → **Passive Components** (pasivní prvky) →

– **Resistor** – (ideální) rezistor – zadává se hodnota odporu v ohmech (políčko s názvem (políčko „Name“) **RESISTANCE**, číselná hodnota se zadává do políčka „Value“). Takto (číselnou hodnotou odporu) zadaný rezistor je lineární, existuje způsob, jak definovat rezistor jako nelineární.

Číselné hodnoty je možno v Micro-Capu zadávat několika způsoby. Např. odpor 1 kiloohm je možno zapsat jako **1000** nebo **1e3** (exponenciální vyjádření) nebo „inženýrským“ zápisem **1k**. Fyzikální jednotka je určena podle zadávaného parametru, nezapisuje se ani nezobrazuje. Předpony v „inženýrském“ zápisu jak je chápe a zobrazuje Micro-Cap (zápis **tučně**) mají následující význam: **f** = femto =  $1 \cdot 10^{-15}$ , **p** = piko =  $1 \cdot 10^{-12}$ , **n** = nano =  $10^{-9}$ , **u** = mikro =  $10^{-6}$ , **m** = mili =  $10^{-3}$ , **K** = kilo =  $10^3$ , **MEG** = mega =  $10^6$ , **G** = giga =  $10^9$ , **T** = tera =  $1 \cdot 10^{12}$ . Micro-Cap snese i záměnu velkých písmen za malá a naopak. Zákeřná chyba, kterou je snadné udělat, je záměna předpon **mili** a **mega**. Totiž pro Micro-Cap **m** = **M** = mili, ale **MEG** = **meg** = mega. Správné rozlišení podle normy mezi **m** (mili) a **M** (mega) tady tedy jaksi nefunguje.

Pokud by vám Micro-Cap zobrazoval „americkou“ značku rezistoru („cik-cak drát“) namísto „evropské“ (obdélníček), lze přenastavení provést pomocí „Component Editor“. Z menu zvolíme **Windows** → **Component Editor...**, poté vybereme v pravém sloupci z nabídky **rezistor** a přenastavíme druhou položku na řádce označené **Shape** z hodnoty „Resistor“ na hodnotu „Resistor\_Euro“. Ukončíme „Component Editor“ a potvrdíme uložení změn.

– **Capacitor** – (ideální) kapacitor – zadává se hodnota kapacity ve faradech (políčko s názvem (políčko „Name“) **CAPACITANCE**, číselná hodnota se zadává do políčka „Value“). Číselnou hodnotou kapacity zadaný kapacitor je lineární.

– **Inductor** – (ideální) induktor – zadává se hodnota indukčnosti v henry (políčko s názvem (políčko „Name“) **INDUCTANCE**, číselná hodnota se zadává do políčka „Value“). Zde se musíme s „americkou“ značkou induktoru („spirálka“) smířit, jde jen o drobnou odlišnost. (Komu by to vadilo, může si vytvořit evropský symbol v „Component Editor“.) Číselnou hodnotou indukčnosti zadaný induktor je lineární.

– **Transformer** – bezeztrátový transformátor (dvojice vázaných induktorů) – zadává se hodnota vlastní indukčnosti primárního a sekundárního vinutí a koeficient vazby.

### **Analog Primitives** → **Waveform Sources** (nezávislé zdroje signálů) →

– **Battery** (baterie) – představuje nezávislý (ideální) zdroj stejnosměrného napětí (pro stejnosměrnou analýzu nebo (přechodovou) analýzu v časové oblasti). Pro vytvoření nezávislého zdroje stejnosměrného napětí lze použít i prvek „univerzální zdroj napětí“ (**Voltage Source**), ale prvek **Battery** to umožňuje pouhým jednoduchým nastavením hodnoty napětí bez nutnosti porozumět spoustě parametrů, které se nastavují u „univerzálního zdroje napětí“. Napětí ss zdroje se nastaví v položce s názvem (políčko „Name“) **VALUE** na požadovanou hodnotu ve voltech (v políčku „Value“). Proč se nastavovaná hodnota jmenuje **VALUE** a ne logičtěji **VOLTAGE** se mě neptejte. Z hlediska symboliky není příliš vhodné použití značky „baterie“ pro nezávislý (ideální) zdroj napětí,

ale často se to dělá i při výuce elektrických obvodů. Značka „baterie“ správně přísluší skutečné součástce, která ale má nenulový vnitřní odpor. Je tedy třeba upozornit na nejednotnost tohoto značení a případnou možnost záměny.

– ***ISource*** – nezávislý (ideální) zdroj stejnosměrného (konstantního) proudu. Podobně jako baterie je „*ISource*“ speciální prvek pro realizaci nezávislého stejnosměrného zdroje, tentokrát zdroje proudu. Pro vytvoření nezávislého zdroje stejnosměrného proudu lze použít i prvek „univerzální zdroj proudu“ (***Current Source***), ale prvek ***ISource*** to umožňuje pouhým jednoduchým nastavením hodnoty proudu v položce s názvem (políčko „Name“) **VALUE** na požadovanou hodnotu v ampérech (v políčku „Value“). Značka ss proudového zdroje ***ISource*** je jen drobně odlišná od značení používaného při výuce ZEO a EOS na FEL a je shodná se značkou „univerzálního zdroje proudu“ v Micro-Capu. Vizuelně tedy není možné univerzální zdroj proudu a zdroj ss proudu rozlišit.

– ***Voltage Source*** – univerzální nezávislý (ideální) zdroj napětí. Podle volby záložky v okně parametrů zdroje můžeme zdroj definovat např. jako stejnosměrný zdroj, pulzní zdroj, harmonický zdroj a podobně. Zvláště se nastavuje chování pro různé druhy analýz (viz dále), parametr pro „stejnosměrnou analýzu“ (stacionární ustálený stav) je označen **DC**, parametry pro „střídavou analýzu“ (harmonický ustálený stav) jsou označeny **AC**, další parametry slouží pro tranzientní analýzu v časové oblasti atd. Značka napětíového zdroje je „americká“ a tudíž odlišná od značky používané v ZEO a EOS. Znaménka + a – nahrazují šipku napětí a mohou budit dojem ss zdroje.

— univerzální nezávislý (ideální) zdroj proudu. Další viz poznámky ke zdroji ***Voltage Source***. Grafická značka totožná se značkou nezávislého zdroje stejnosměrného proudu, rozdíl je v možnostech nastavení parametrů v okně parametrů prvku.

Dále je možno použít „jednoúčelové“ zdroje např. ***Sine Source*** nebo ***Pulse Source***, případně další speciální typy zdrojů. Pokud při nastavování parametrů zdrojů není dostatečný kontextový help ve stavovém pruhu okna parametrů zdroje je možno použít rychlý přístup k nápovědě syntaxe parametrů pomocí „kouzelného“ tlačítka ***Syntax...***

***Analog Primitives*** → ***Dependent Sources*** (řízené zdroje) →

- ***IofI*** – (ideální) lineární zdroj proudu řízený proudem
- ***IofV*** – (ideální) lineární zdroj proudu řízený napětím
- ***VofV*** – (ideální) lineární zdroj napětí řízený proudem
- ***VofI*** – (ideální) lineární zdroj napětí řízený napětím

***Analog Primitives*** → ***Connectors*** →

– ***Ground*** – zem, společná svorka, referenční uzel s napětím 0. Velmi důležitý prvek, v obvodu musí být alespoň jednou použit, jinak nelze spustit analýzu (hláška: „Nodes x, y, ... have no DC path to ground“).

***Analog Primitives*** → ***Special Purpose*** →

- ***S (V-Switch)*** – spínač řízený napětím (např. pro analýzu přechodných jevů, spínaných zdrojů ap.).
- ***Switch*** – spínač řízený napětím, proudem nebo časem (použití viz ***S (V-Switch)***).

**Animation** (animované prvky) →

Animované prvky jsou užitečné zejména pro „dynamické“ analýzy (**Dynamic DC** a **Dynamic AC**), kdy jejich stav interaktivně reaguje na změny provedené v obvodu.

– **Animated Meter** – animovaný analogový/digitální voltmetr/ampérmetr. Příslušnou funkci měřícího přístroje je možno nastavit buďto v okně parametrů prvku nebo pomocí dvojkliku na příslušné nápisy na značce přístroje (*Digital/Analog, Volts/Amps*, příp. *Autoscale* pro analogový přístroj). „Oživlý“ kapesní multimetr. V analogové podobě téměř nepoužitelný. Je sice hezké, že se hýbe ručička, ale grafické provedení stupnice v podstatě znemožňuje použitelné odečítání hodnot. Digitální varianta je dobře použitelná pro čitelné zobrazování zaokrouhlených hodnot napětí a proudů (velké čitelné číslice oproti zobrazení hodnot napětí a proudů přímo v obvodu). Pozor na údaj o jednotce zobrazované veličiny pod stupnicí nebo displejem přístroje a na „zákeřnou“ volbu *Autoscale* u analogové varianty.

Animovaný měřicí přístroj ukazuje buďto stejnosměrnou hodnotu (složku) napětí nebo proudu, nebo v případě analýzy přechodných jevů standardně (není-li nastaveno jinak) poslední okamžitou hodnotu analýzy. Tato hodnota záleží na délce analýzy a na okamžiku jejího konce a obecně tedy není totožná s ustálenou stejnosměrnou hodnotou. Animovaný voltmetr nebo ampérmetr má tedy v podstatě smysl používat pouze u „stejnosměrných“ analýz, zejména **Dynamic DC...** (viz níže).

– **Animated SPST Switch** – animovaný jednopólový spínač. Při dvojkliku doprostřed spínače se změni jeho stav a to i při probíhající analýze. Např. při „stejnosměrné“ analýze (**Dynamic DC**) je možno sledovat odezvu obvodu na tuto změnu např. právě i pomocí animovaných měřících přístrojů.

– **Animated DPST Switch** – animovaný dvojpólový spínač. Při dvojkliku doprostřed spínače se změni jeho stav.

– **Animated SPDT Switch** – animovaný jednopólový přepínač. Při dvojkliku doprostřed spínače se změni jeho stav.

## 1.4 Základní typy analýzy obvodu

Simulační programy obvykle nabízejí tři základní typy analýzy obvodu, které odpovídají třem nejčastěji sledovaným provozním režimům (stavům) v elektrických obvodech. Podobně je tomu i u Micro-Capu, kde se jednotlivé typy analýzy spouští pomocí položek menu **Analysis**:

– **Transient...** – analýza (přechodných dějů v obvodech) v časové oblasti, neboli také „transientní analýza“. Výsledkem analýzy jsou časové průběhy zvolených obvodových veličin ve zvoleném časovém intervalu. Podrobný popis nastavení parametrů této analýzy ponecháme na později.

– **AC...** – analýza obvodů v harmonickém ustáleném stavu (HUS) neboli analýza ve frekvenční oblasti, nepřesně také označována jako „střídavá analýza“ nebo „AC analýza“. Slouží ke zjištění a vykreslení různých kmitočtových charakteristik analyzovaného obvodu a jejich vykreslení.

– **DC...** – analýza obvodů ve stacionárním ustáleném stavu (SUS), nebo také nepřesně řečeno „stejnosměrná analýza“. Tato analýza umožňuje zjištění statických voltampérových nebo převodních charakteristik obvodů, tedy výpočet různých poloh pracovního bodu v závislosti na proměnné hodnotě některé stejnosměrné budící veličiny. Typicky tak může být výstupem DC analýzy grafické znázornění voltampérové charakteristiky diody nebo např. výstupních charakteristik tranzistoru. Jelikož pro lineární obvody, kterými se zabýváme v ZEO a EOS, jsou všechny takové charakteristiky lineární, není pro nás tato základní DC analýza s grafickým výstupem příliš vhodná pro simulaci lineárních odporových obvodů. Použijeme s výhodou její interaktivní variantu **Dynamic DC...** bez grafického výstupu zato však s interaktivním výstupem číselných výsledků simulace.

Další dva typy analýzy jsou vlastně jen varianty základních analýz **AC** a **DC** s odlišnou formou prezentace výsledků simulace. Při těchto variantách analýzy jsou jednorázově spočítány napětí a proudy v obvodu pro aktuální hodnoty budících zdrojů a aktuální hodnoty ostatních prvků. Při změně některého parametru obvodu jsou napětí a proudy okamžitě přepočítány.

Standardně jsou zobrazována napětí uzlů vůči uzlu referenčnímu (tedy „uzlová napětí“) a to ve formě číselného údaje v „bublině“, která se nachází nad daným uzlem. Orientace napětí není zobrazována, používá se standardní dohoda pro orientaci („šipku“) uzlového napětí a to od příslušného uzlu k uzlu referenčnímu (**Ground**). Napětí v referenčním uzlu je pochopitelně nulové a tato hodnota se u něj nezobrazuje. Pojem „uzel“ je nutno chápat (jak je v teorii obvodu běžné) jako množinu vodivě spojených větví (vodičů), které mají vůči referenčnímu uzlu stejné napětí. Pod jeden uzel tedy může spadat několik „míst spojení vodičů“, která lze také chápat jako „fyzické uzly spojení“. Je proto nutné upozornit na možnost záměny různého chápání pojmu „uzel“. Dále je možné v popisovaných interaktivních („dynamických“) analýzách zapnout zobrazení proudů prvků, výkonů na prvcích (dodávaných nebo spotřebovávaných). O ovládání zobrazení výsledků („dynamické“) analýzy a o možnostech interaktivního ovládání parametrů prvků pojednáme podrobněji později při popis samotné analýzy **Dynamic DC**. Micro-Cap nabízí následující interaktivní typy analýzy:

– **Dynamic AC...** – interaktivní („dynamická“) analýza obvodů v harmonickém ustáleném stavu (HUS) neboli analýza ve frekvenční oblasti (nepřesně také „střídavá analýza“). Umožňuje výpočet a zobrazení číselných hodnot napětí, proudů a výkonů v analyzovaném obvodu pro jednu konkrétní frekvenci budících zdrojů. Je též možné výpočet opakovat pro více frekvencí ze zadaného seznamu. Napětí, proudy a výkony jsou reprezentovány komplexními čísly dle pravidel symbolicko-komplexní metody pro analýzu harmonického ustáleného stavu (impedance, admittance, fázory). Formát zobrazení veličin je možno zvolit, standardně se zobrazuje amplituda a fáze (vychází se tedy z exponenciálního tvaru příslušného komplexního čísla, hodnota fáze se defaultně udává ve stupních). Při změně parametrů obvodových prvků, zapojení obvodu nebo kmitočtu jsou veličiny automaticky přepočítány pro nové hodnoty a zobrazení aktualizováno.

– **Dynamic DC...** – interaktivní („dynamická“) analýza obvodů ve stacionárním ustáleném stavu (SUS), (nepřesně také „stejnoseměrná analýza“). Umožňuje výpočet a zobrazení číselných hodnot napětí, proudů a výkonů v analyzovaném obvodu. Při změně parametrů obvodových prvků nebo zapojení obvodu jsou veličiny automaticky přepočítány pro nové hodnoty a zobrazení aktualizováno.

Při použití standardních analýz **Transient**, **AC** a **DC** nastavujeme formát grafického výstupu (zobrazované veličiny, počty grafů, měřítka aj.) vyplňováním příslušných políček v okně parametrů analýzy (okno **Limits**). Pokud by nám toto nastavování připadalo pracné a složité a pokud se spokojíme se skromnějšími možnostmi grafického výstupu můžeme použít interaktivní „laboratorní“ varianty zmíněných analýz, jejichž název začíná slůvkem **Probe** (sonda). V průběhu analýzy obsahuje pracovní plocha dvě okna, jedno se zapojením obvodu a druhé s grafickým výstupem analýzy (grafy). V zapojení pak kurzorem ve tvaru měřicí sondy „pátráme“ v obvodu a kliknutím na daný uzel či prvek můžeme okamžitě zobrazit např. časových průběh (v analýze **Probe Transient**) libovolné veličiny. Opakovaným kliknutím zobrazení zrušíme, zobrazeno může být současně více veličin.

– **Probe Transient...** – interaktivní („laboratorní“) analýza v časové oblasti (přechodných dějů v obvodech). Výstupem analýzy jsou časové průběhy zvolených obvodových veličin ve zvoleném časovém intervalu. Volba veličin ke zobrazení se provádí pomocí „sondy“.

– **Probe AC...** – interaktivní („laboratorní“) analýza obvodů v harmonickém ustáleném stavu (HUS) neboli analýza ve frekvenční oblasti. Výstupem analýzy jsou zvolené kmitočtové charakteristiky analyzovaného obvodu. Volba veličin ke zobrazení se provádí pomocí „sondy“.

– **Probe DC...** – interaktivní („laboratorní“) analýza obvodů ve stacionárním ustáleném stavu (SUS). Výstupem analýzy jsou zvolené statických voltampérové nebo převodních charakteristik obvodů. Volba veličin ke zobrazení se provádí pomocí „sondy“.

Pokud z menu *Analysis* spustíme některou z analýz, nejprve se objeví okno s nastavením parametrů analýzy. Nastavení parametrů mohou být velmi rozmanitá od několika parametrů pro analýzu *Dynamic DC* až po detailní definování požadovaných časových či frekvenčních průběhů u analýz *Transient* nebo *AC*. Většinou jsou všechny parametry nějak přednastaveny a Micro-Cap automaticky přednastaví zobrazení alespoň jednoho průběhu. Pokud tedy nemáme v úmyslu některé údaje měnit nebo nadefinovat další průběhy v grafech, můžeme okno s parametry (s titulkem: „[název analýzy] *Limits*“) potvrdit tlačítkem „Run“ nebo „OK“, čímž analýzu spustíme.

Po spuštění analýzy a jejím proběhnutí dojde k modifikaci hlavního menu programu počínaje položkou *Analysis*. Položka *Analysis* je buď nahrazena položkou se jménem dané analýzy (pro analýzy *Transient*, *AC*, *DC*, a všechny typy *Probe*) nebo je nová položka pro danou analýzu (v případě analýz *Dynamic AC* a *Dynamic DC*) za položku *Analysis* přidána. Dále jsou původní položky *Design* a *Model* nahrazeny položkami *Scope* a *Monte Carlo*, případně položkami *Vertical*, *Horizontal* a *Scope* pro *Probe* varianty analýz. K obnovení původní podoby hlavního menu dojde až po opuštění módu analýzy. Pro většinu analýz zůstane okno *...Limits* po spuštění analýzy otevřené, ale minimalizuje se na lištu Windows. Pokud po „doběhnutí“ analýzy chceme změnit její parametry a spustit ji znovu, okno *...Limits* obnovíme z lišty, provedeme potřebné změny a analýzu opětovně spustíme. Okno *...Limits* lze vyvolat i z menu dané analýzy pomocí položky *Limits...* (a to i v případě, není-li okno na liště zobrazeno).

Pokud jsme stále v módu analýzy, můžeme ji po změně parametrů nechat proběhnout znovu tlačítkem „Run“ v okně *...Limits*, případně tlačítkem „Run“ na panelu nástrojů okna s výsledky analýzy (tlačítko má tvar šipky „Play“ z přehrávačů). V módu analýzy jsou u analýz *Transient*, *AC* a *DC* aktivní dvě okna a to okno s výsledky analýzy a okno se zapojením obvodu. Standardně jsou okna umístěna přes sebe a přepínat se mezi nimi dá pomocí „poutek“ u spodního okraje oken. Pokud v okně zapojení změním v módu analýzy zapojení nebo parametr některého prvku či třeba přepneme přepínač, analýza se automaticky spustí znovu a výsledky se aktualizují podle provedených změn. U analýz typu *Probe* se okno zapojení a okno výsledků analýzy zobrazují standardně vedle sebe, což odpovídá filozofii těchto analýz. U analýz *Dynamic AC* a *Dynamic DC* se zobrazují číselné výsledky přímo v zapojení obvodu (dynamicky v závislosti na provedených změnách v obvodu), takže okno je zde pouze jedno. Mód analýzy ukončíme z položky menu příslušné analýzy pomocí *→Exit Analysis*, případně zavřením okna s výsledky analýzy. Rozsáhlejší změny v obvodu se doporučuje provádět mimo mód analýzy. Každá změna v obvodu v módu analýzy vyvolá nový běh výpočtu, což může být v některých případech značně časově náročné. Při aktivním módu analýzy není možné změny provedené v obvodu ukládat (do souboru). Možnost automatického „přepočítání“ analýzy po změně v obvodu je zde jaksí navíc oproti starším simulačním programům, které umožňovali jen ruční opakování posloupnosti kroků: zadání obvodu – analýza – úprava obvodu – analýza atd.

Nyní přehledně shrneme základní vlastnosti jednotlivých typů analýz s ohledem na jejich význam a souvislost s laboratorním měřením na reálných obvodech.

– *Transient...* – analýza (přechodných) dějů v časové oblasti. Výsledkem analýzy jsou časové průběhy zvolených obvodových veličin ve zvoleném časovém intervalu. Odpovídá laboratornímu měření přechodných jevů pomocí paměťového osciloskopu nebo funkčně ekvivalentního měřicího systému.

– *AC...* – analýza obvodů v harmonickém ustáleném stavu (HUS) neboli analýza ve frekvenční oblasti. Výsledkem analýzy jsou kmitočtové charakteristiky zvolených obvodových funkcí analyzovaného obvodu. Odpovídá laboratornímu měření kmitočtových charakteristik pomocí tzv. „obvodového analyzátoru“ (Network Analyser), jak se nazývají měřiče kmitočtových charakteristik.

– *DC...* – analýza obvodů ve stacionárním ustáleném stavu (SUS). Výsledkem analýzy jsou statické voltampérové nebo převodní charakteristiky obvodů. Odpovídá laboratornímu měření voltampérových nebo převodních charakteristik pomocí měřiče charakteristik (charakterografu).



– **Dynamic AC...** – interaktivní („dynamická“) analýza obvodů v harmonickém ustáleném stavu. Výsledkem analýzy jsou číselné hodnoty fázorů napětí, proudů a „komplexních“ výkonů v obvodu při jedné dané frekvenci. Odpovídá laboratornímu měření harmonických napětí a proudů ve „střídavých obvodech“ pomocí tzv. „vektorvoltmetru“ a funkčně ekvivalentních přístrojů schopných měřit nejen amplitudy či efektivní hodnoty harmonických průběhů, ale také jejich vzájemné fázové vztahy. (Běžný „střídavý“ voltmetr či ampérmetr měří pouze efektivní hodnotu daného harmonického napětí či proudu, „střídavý“ wattmetr činný výkon.)

– **Dynamic DC...** – interaktivní („dynamická“) analýza obvodů ve stacionárním ustáleném stavu. Výsledkem analýzy jsou číselné hodnoty stejnosměrných napětí, proudů a výkonů v obvodu. Odpovídá laboratornímu měření stejnosměrných napětí, proudů a výkonů ve „stejnosměrných obvodech pomocí stejnosměrných měřících přístrojů.

**Probe...** (sonda) varianty analýz **Transient**, **AC** a **DC** pak pouze vizuálně přibližují simulaci způsobu měření v reálných obvodech pomocí reálných měřících přístrojů. Prostě taková „virtuální laboratoř“.

## 2.1 Analýza stacionárního ustáleného stavu pomocí „Dynamic DC“

Pro analýzu lineárních odporových obvodů v předmětech ZEO a EOS je patrně nejvhodnější interaktivní analýza obvodů ve stacionárním ustáleném stavu, tedy **Dynamic DC**. Jelikož chování lineárních odporových obvodů nezávisí na tvaru časového průběhu, je také možné provádět jejich analýzu v časové oblasti, tedy v Micro-Capu analýzu **Transient...** Pak lze studentům demonstrovat, že v lineárním odporovém obvodu mají při libovolném buzení všechny obvodové veličiny tvarově shodný časový průběh, např. harmonický ap. Linearitu obvodu tohoto typu lze také demonstrovat na linearitě voltampérových a převodních charakteristik obvodu pomocí analýzy **DC**. Principy analýzy lineárních odporových obvodů lze však snadno „stravitelně“ demonstrovat při buzení obvodu stejnosměrnými veličinami, při simulaci tedy s využitím analýzy **Dynamic DC**, které se nyní budeme věnovat podrobněji.

Máme-li připraveno zapojení obvodu, můžeme přistoupit k samotné simulaci – analýze. Po zvolení položky menu **Analysis** → **Dynamic DC** se otevře okno **Dynamic DC Limits**, ve kterém máme možnost nastavit parametry analýzy. Parametrů je narozdíl od jiných analýz pouze několik a nemáme-li v úmyslu jejich nastavení měnit, stačí okno pouze potvrdit tlačítkem „OK“ a spustit tak samotnou analýzu. Pomocí tlačítek v pruhu nástrojů okna **Dynamic DC Limits** lze nastavit, které výsledky analýzy budou zobrazovány ve schématu zapojení obvodu. Vzhledem k tomu, že zmíněná nastavení lze provádět kdykoliv během probíhající analýzy (pomocí menu nebo shodným tlačítkem v pruhu nástrojů okna se schématem zapojení), popíšeme jejich význam později. Nicméně již v oknu **Dynamic DC Limits** je možné si nastavení zobrazovaných údajů vyzkoušet, jakákoliv změna nastavení zobrazení pomocí tlačítek se okamžitě projeví ve schématu zapojení (dobré je odsunout okno stranou, aby nám nezakrývalo pohled na schéma).

Dále se v parametrech analýzy nastavuje teplota (**Temperature List**, přednastaveno 27°C), což má smysl tehdy, když máme některé prvky teplotně závislé a chceme sledovat závislosti chování obvodu na teplotě. Jelikož v modelech obvodů pracujeme pouze s ideálními lineárními teplotně nezávislými prvky, tak nastavení teploty výsledky analýzy neovlivní. Pracujeme tedy např. pouze s teplotně nezávislými lineárními rezistory, které mají nastaveny nulové koeficienty teplotní závislosti. Tyto koeficienty je možno pro teplotně závislé rezistory nastavit v okně parametrů rezistoru (po dvojkliku na jeho značku). Nejsou-li teplotní koeficienty nastaveny, považují se za nulové. Zatržení možnosti **Place Text** zapíná zobrazení textu se základními informacemi o analýze v rámci schématu obvodu. Položka **Slider Percentage Step Size** udává, o kolik procent jmenovité hodnoty se změní hodnota parametru součástky při jeho změně pomocí „posuvného jezdce (slideru)“ nebo pomocí kurzorů (podrobněji viz dále). Přednastavená hodnota jednoho kroku je 10%.

Po samotném spuštění analýzy proběhne analýza stejnosměrného pracovního bodu zapojení (řešení stacionárního ustáleného stavu, „stejnosměrná analýza“) a číselné hodnoty zvolených stejnosměrných veličin jsou zobrazeny přímo ve schématu obvodu. Při jakékoliv změně (modifikaci) v obvodu

proběhne analýza automaticky znovu a všechny údaje jsou aktualizovány. Změnit můžeme zapojení obvodu, parametry prvků, polohu spínačů a přepínačů, přidávat a mazat prvky ap. Standardně je zapnuto zobrazování napětí v uzlech obvodu (uzlových napětí) vůči uzlu referenčnímu (**Ground**). Napětí se zobrazují ve formě číselného údaje v „bublině“, která se nachází nad daným uzlem. Orientace napětí není zobrazována, používá se standardní dohoda pro orientaci („šipku“) uzlového napětí a to od příslušného uzlu k uzlu referenčnímu (**Ground**). K číselnému údaji může být připojena též odpovídající „řádová“ předpona (**u, m, K** apod.). Zobrazení nebo nezobrazení příslušného typu veličin je možno zapnout/vypnout pomocí menu pomocí položky **Options** → **View** → nebo pomocí příslušných tlačítek ve druhé sekci druhé nástrojové lišty.

Zobrazení uzlových napětí (**Node Voltages**) ovládá tlačítko s dvoumístným číslem v rámečku, zobrazení proudů tekoucích prvky (**Currents**) pak tlačítko se šipkou proudu nad značkou diody, výkonů dodávaných nebo spotřebovávaných prvky (**Powers**) pak tlačítko s „ohníčkem“ nad značkou diody, zobrazení stavů aktivních prvků resp. spínačů ovládá tlačítko s textem „ON“ nad značkou diody. V případě zobrazení výkonu je „směr toku“ energie resp. výkonu vyjádřen zkratkou před (vždy kladným) číselným údajem – **pg** znamená výkon dodávaný prvkem (zdrojem) do obvodu (**pg** = „power generated“ = generovaný, dodávaný výkon), **pd** znamená výkon spotřebovávaný daným prvkem (**pd** = „power dissipated“ = disipovaný, rozptýlovaný, spotřebovávaný výkon). Formát zobrazení a počet desetinných míst zobrazovaných číselných údajů je možno nastavit v menu **Options** → **Preferences** → **Format** → **Schematic Voltages/Current/Power**.

Další údaje, které lze zobrazit či skrýt se netýkají výsledků analýzy, ale různých textových a grafických informací o prvcích, parametrech analýzy a schématu zapojení. Zobrazení obecných textových polí (**Grid Text**) ovládá tlačítko s textem „TEXT“, zobrazení textových popisků prvků obvodu (**Attribute Text**) tlačítko s „americkou cik-cak“ značkou rezistoru označeného **R1**, zobrazení čísel uzlů (**Node Numbers**) pak tlačítko s jednomístným číslem v rámečku. Je také možné zobrazit všechna místa spojení vodičů a vývodů prvků (**Pin Connections**), což může být užitečné např. pro odhalit míst nechtěného propojení křížících se vodičů a vývodů. Taková nechtěná propojení bývají někdy příčinou nesmyslných a nepochopitelných výsledků analýzy. Zobrazení **Pin Connections** ovládá tlačítko se symbolem, který vzhledem připomíná „činku“.

Pokud provádíme v obvodu nějaké změny a sledujeme jejich vliv na činnost obvodu, bude pro nás užitečná možnost nastavit, které prvky či části obvodu mají být při analýze brány v úvahu (být „funkční“) a které se mají ignorovat. Tato možnost nám dovoluje vyhnout se zbytečnému mazání a opětovnému přidávání prvků. V Micro-Capu jsou „funkční“ prvky ve stavu „**Enable**“ a „nefunkční“ prvky ve stavu „**Disable**“. Každá součástka, kterou přidáváme při kreslení obvodu do schématu má přednastavený stav „**Enable**“ a je tedy při simulaci uvažována. Chceme-li součástku dočasně ze simulace „vyřadit“, zrušíme zaškrtnutí políčka „**Enabled**“ v okně vlastností příslušné součástky. Prvek či část obvodu „zakázaná“ pro simulaci je ve schématu poté zobrazena světle šedou barvou. Vyřadit ze simulace lze také celé části obvodu a to pomocí tlačítka módu **Region Enable** na druhé liště nástrojů (vykřičník v zeleném kroužku + křížek v červeném kroužku), případně pomocí odpovídajících příkazů z menu (**Edit** → **Enable** a **Edit** → **Disable**), kdy je nutné zvolenou oblast předem označit.

Ještě je třeba se zmínit o dalších tlačítkách módů schématického editoru. V předcházejícím textu jsme zatím zmínili módy **Select Mode**, **Component Mode**, **Text Mode**, **Orthogonal Wire Mode**, **Diagonal Wire Mode** a mód **Region Enable**. Dalším módem je mód **Info Mode** (tlačítko s hodně tučným písmenem **i**), kdy se po (jednoduchém) kliknutí na prvek otevře okno s jeho parametry, které lze jinak v **Select Mode** vyvolat dvojklikem. Klikneme-li na prvek v **Help Mode** (tlačítko s kurzorovou šipkou a otazníkem) otevře se okno s k prvku příslušnou nápovědou. Zbývající módy **Bus Mode** (kreslení sběrnic) a **Graphics** (kreslení grafických prvků) nejsou pro naše účely důležité a proto jejich využití ponecháme na samostudium pro případné zájemce.

Kromě standardního způsobu zobrazování číselných výsledků analýzy *Dynamic DC* je možné hodnoty některých veličin zobrazit též alternativním způsobem. Při aktivní analýze se některé údaje (proud, výkon či další informace) zobrazí po najetí kurzoru na daný prvek ve stejné formě jako „bublinová“ nápověda. Pro čitelné zobrazování zaokrouhlených hodnot napětí a proudů je vhodné použít animovaný voltmetr nebo ampérmetr (*Animated Meter*) v digitálním módu zobrazení. Dále je možné získat souhrn číselných výsledků analýzy v textové podobě pomocí položky menu *Dynamic DC* → *Numeric Output*.

Během analýzy se dají měnit parametry prvků několika způsoby. Jednak můžeme u každého prvku změnit hodnoty v okně jeho parametrů. Dále je možné editovat parametry prvků, které se ve schématu zobrazují, např. hodnotu odporu u rezistoru. Dvakrát klikneme na hodnotu, kterou chceme změnit, a můžeme ji editovat. Chce to trochu cviku, ale jde to. Editaci ukončíme např. klávesou <Esc> nebo kliknutím mimo editační pole. Specifický způsob změny hodnoty, který je možný jen u některých součástí, využívá kurzorových kláves nebo posuvných jezdců (sliderů). Tímto způsobem je možné měnit napětí napěťových zdrojů a proudy proudových zdrojů, odpor (stejnoseměrný) rezistorů, kapacitu kapacitorů a indukčnost induktorů. Změna probíhá po krocích (v procentech jmenovité hodnoty), jejichž velikost závisí na parametru *Slider Percentage Step Size* nastaveném v okně parametrů analýzy (*Dynamic DC Limits*).

Chceme-li měnit hodnotu příslušného parametru pomocí kurzorových šipek z klávesnice, postupujeme následovně. Součástku, jejíž hodnotu chceme měnit označíme (vybereme) a poté lze danou hodnotu měnit pomocí kurzorových kláves (nahoru/dolů). Další možností je zvolenému prvku přiřadit posuvný jezdec (slider), který se bude zobrazovat v samostatné liště vedle okna se schématem zapojení. Slidery můžeme prvkům přiřadit a zobrazit je pomocí menu *Dynamic DC* → *Slider* →. Další možností je u prvků, které tento způsob nastavení hodnoty umožňují, nechat zobrazit posuvný jezdec (slidery) přímo ve schématu obvodu vedle značky příslušného prvku. Zobrazení sliderů ve schématu se zapíná v menu *Options* → *Preferences* → *Slider* → *Component Slider* zaškrtnutím políčka *Show Slider*.

Analýzu ukončíme z menu pomocí položky *Dynamic DC* → *Exit Analysis*.

**T o b e c o n t i n u e d . . .**

## **Literatura**

[1] BIOLEK, Dalibor. *Řešíme elektronické obvody – aneb kniha o jejich analýze*. 1. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-125-X.