

# Počítačová podpora řešení elektronických obvodů

Dalibor Biolek

VA Brno, K301, Kounicova 65, PS 13

612 00 Brno

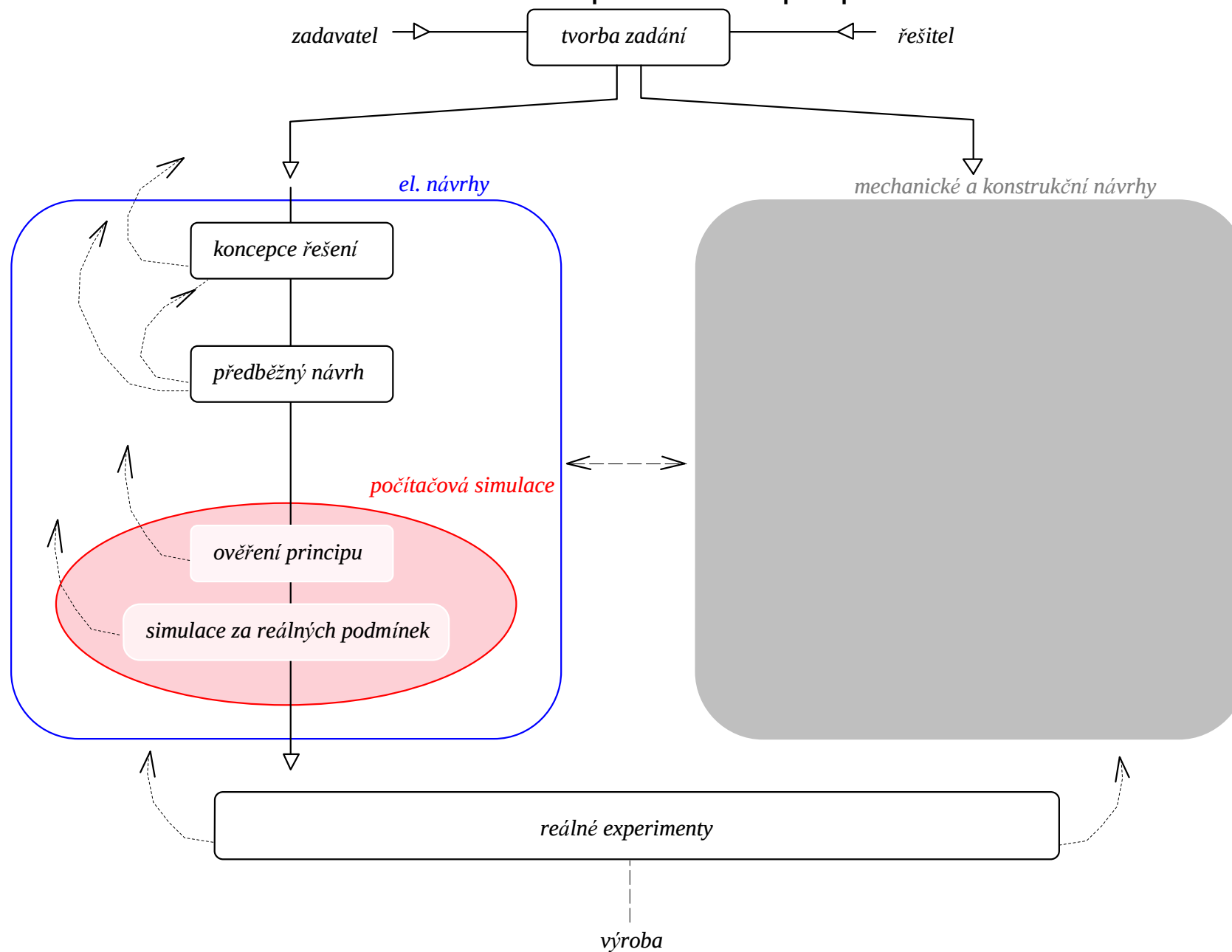
<http://www.vabo.cz/stranky/biolek>

email: dalibor.biolek@vabo.cz

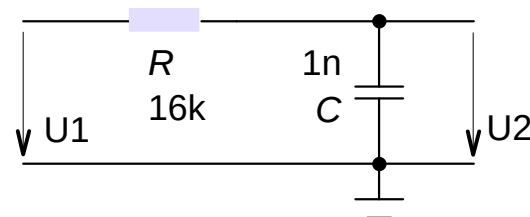
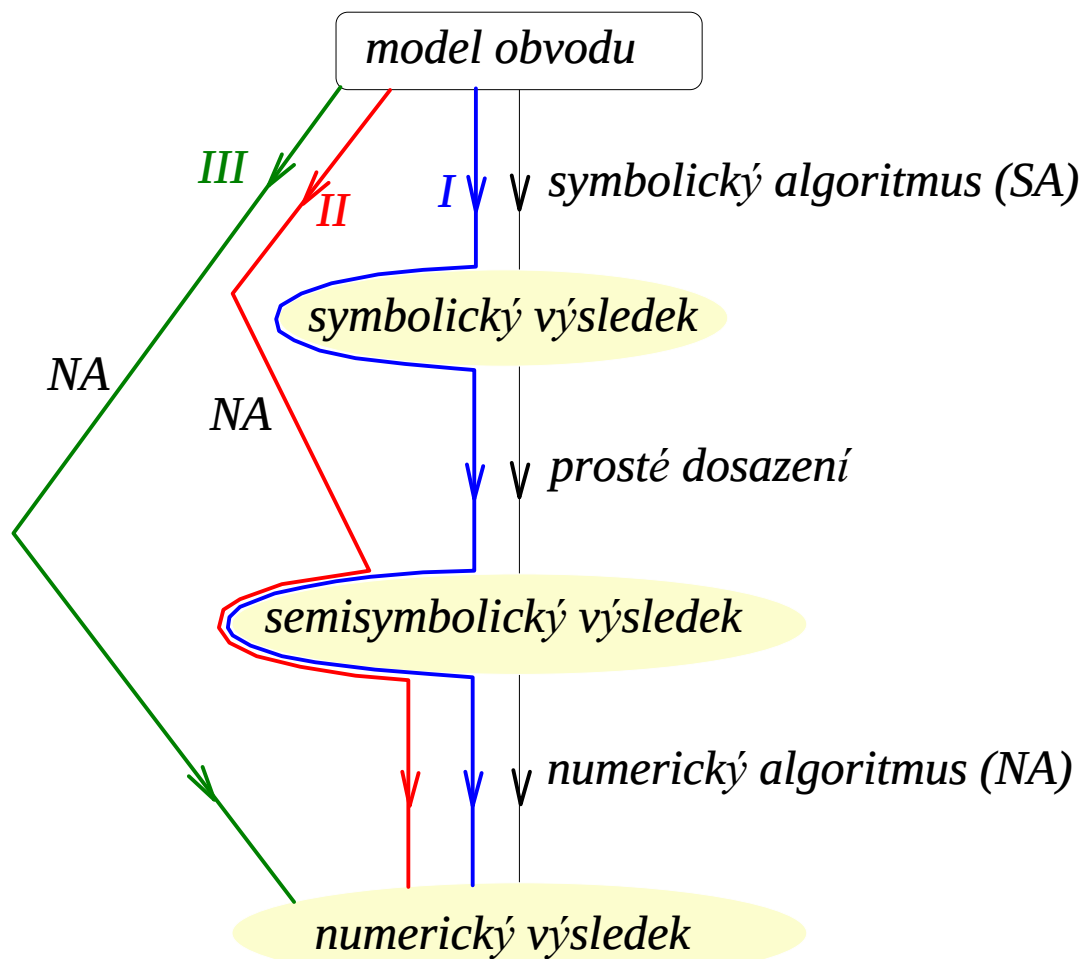
## Osnova:

- ✚ Řešení el. obvodů v kontextu počítačově podporovaného navrhování.
- ✚ „Symbolika“ a „numerika“.
- ✚ Struktura „symbolického“ programu - SNAP.
- ✚ Struktura „numerického“ programu – MicroCap.
- ✚ Typy analýz, analyzační módy a režimy.
- ✚ Analýza „Transient“ a analýzy s ní související.
- ✚ Analýza „AC“ a analýzy s ní související.
- ✚ Analýza „DC“ a analýzy s ní související.
- ✚ Rozšiřující typy analýz.
- ✚ Vybrané analyzační režimy.
- ✚ Literatura a další zdroje informací

# Řešení el. obvodů v kontextu počítačově podporovaného navrhování

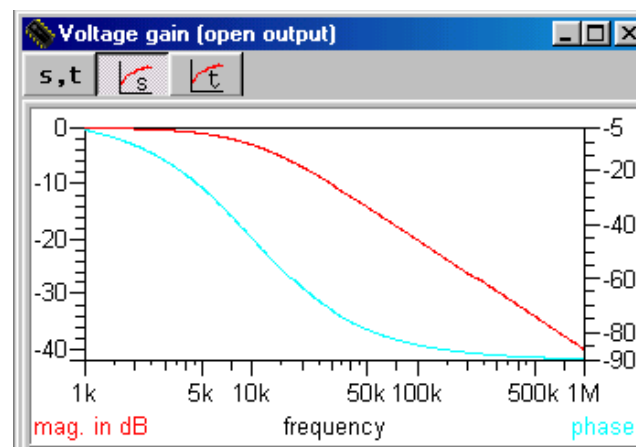


# „Symbolika“ a „numerika“.

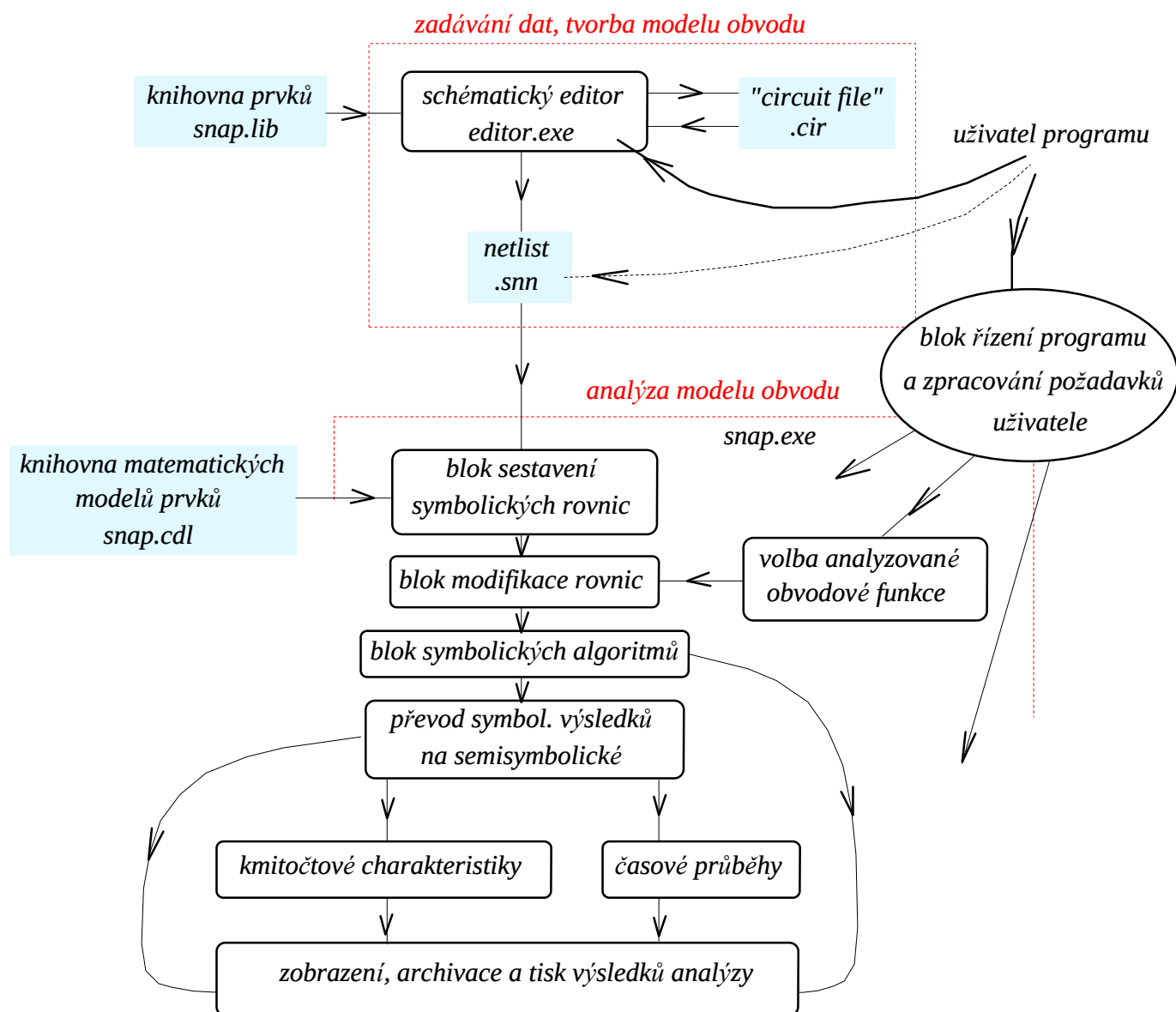


$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{1 + pRC}$$

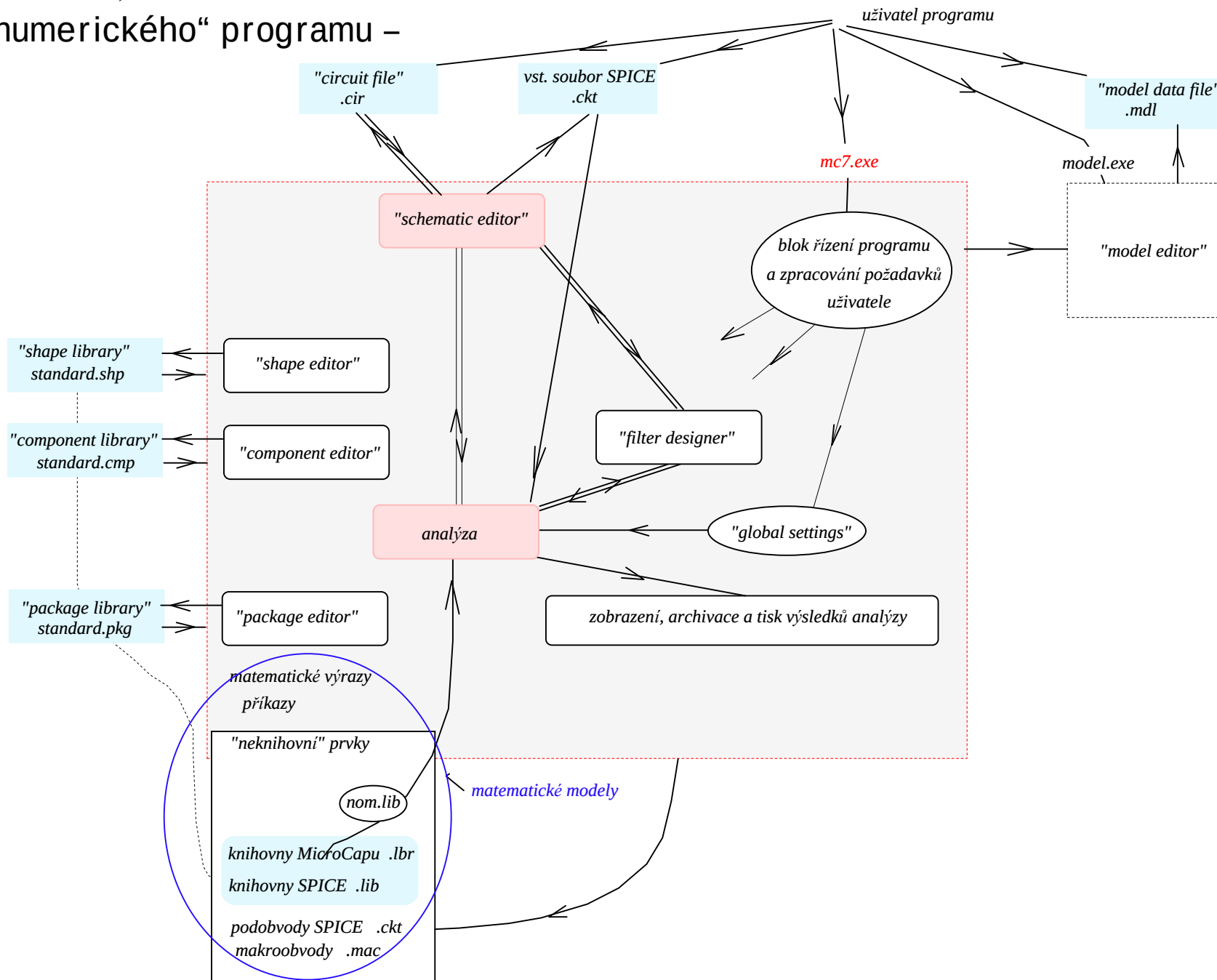
$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{1 + 16 \cdot 10^{-6} p} = 62500 \frac{1}{62500 + p}$$



# Struktura „symbolického“ programu - SNAP.



# Struktura „numerického“ programu – MicroCap.



## Typy analýz, analyzační módy a režimy.

### analyzační módy

- Klasický
- Probe (sonda)

#### základní typy analýz

- *Transient (časová)...*  
+ ss. prac. bod + Fourier. analýza a DSP  
**"intelligentní osciloskop"**
- *AC (kmitočtová, střídavá)*  
+ šumová analýza a DSP  
**"intelligentní obvodový analyzátor"**
- *DC (stejnoseměrná)*  
**"intelligentní charakterograf"**

### analyzační režimy

- Klasický
- Stepping (krokování)
- Teplotní analýza
- Performance Analysis (vyhodnocovací analýza)
- Monte Carlo (statistická analýza)
- Optimization (optimalizace)

#### rozšiřující typy analýz

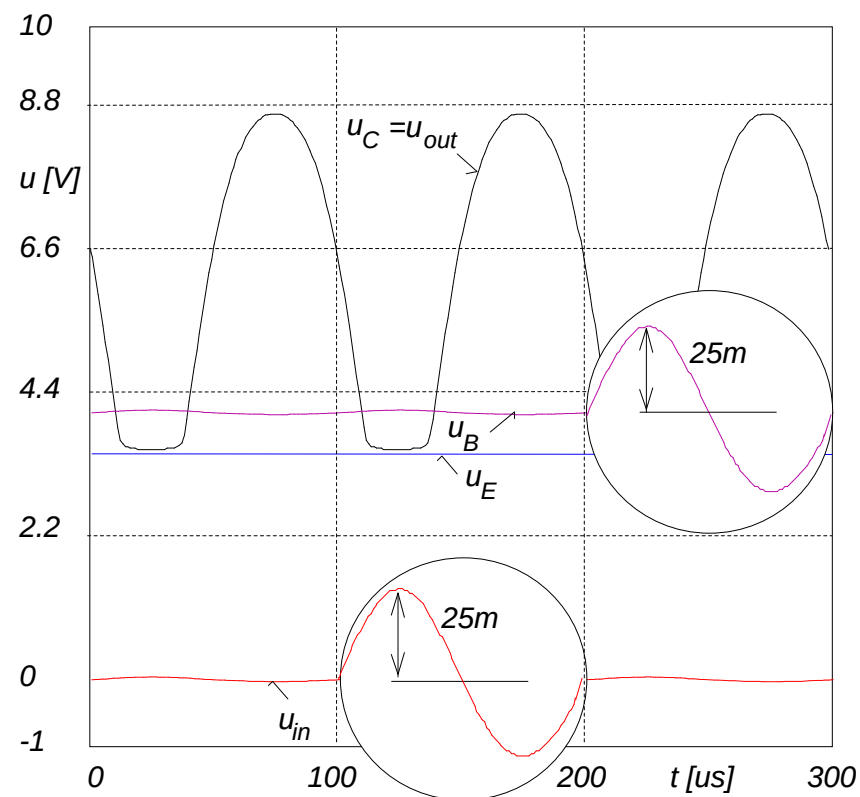
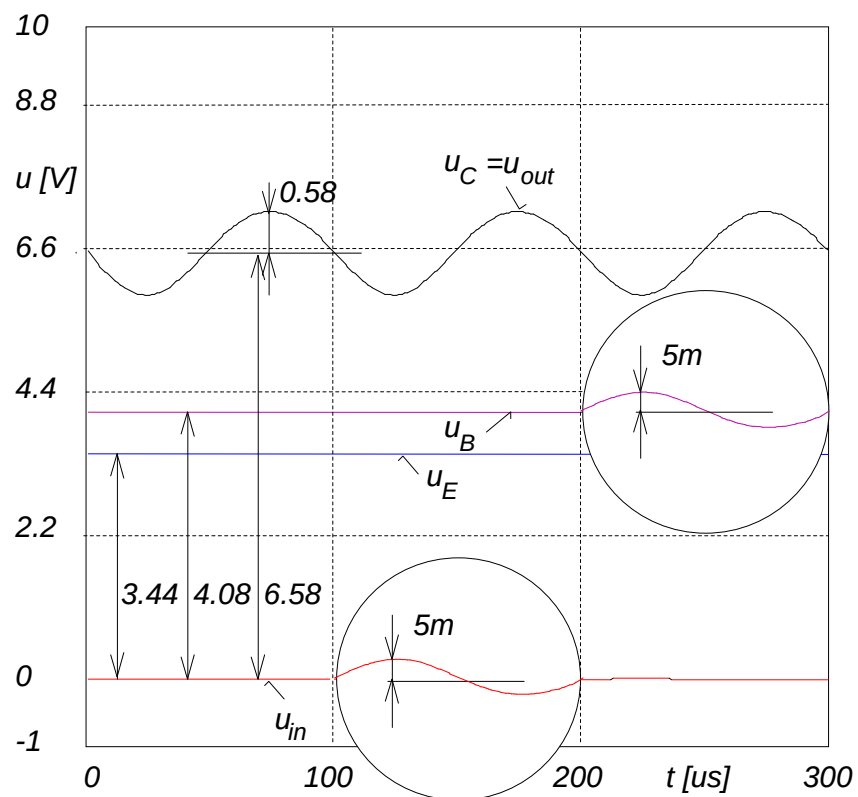
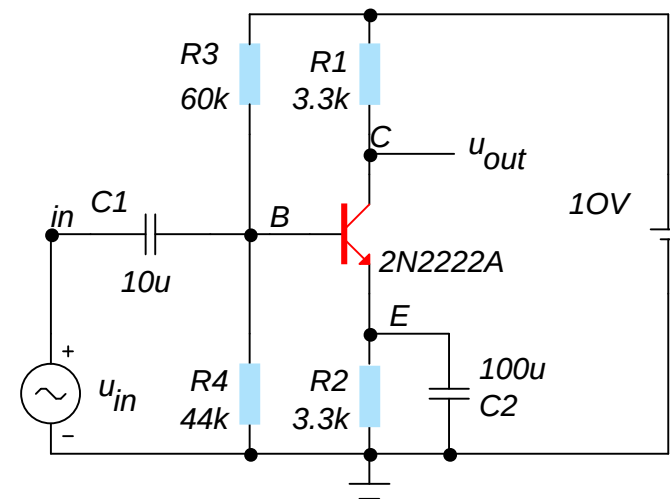
- Dynamic DC (dynamická stejnosměrná)
- Transfer Function (přenosová funkce)
- Sensitivity (citlivostní analýza)
- .....

## Analýza „Transient“.

**Prvotní cíl analýzy:** imitace činnosti „inteligentního osciloskopu“.

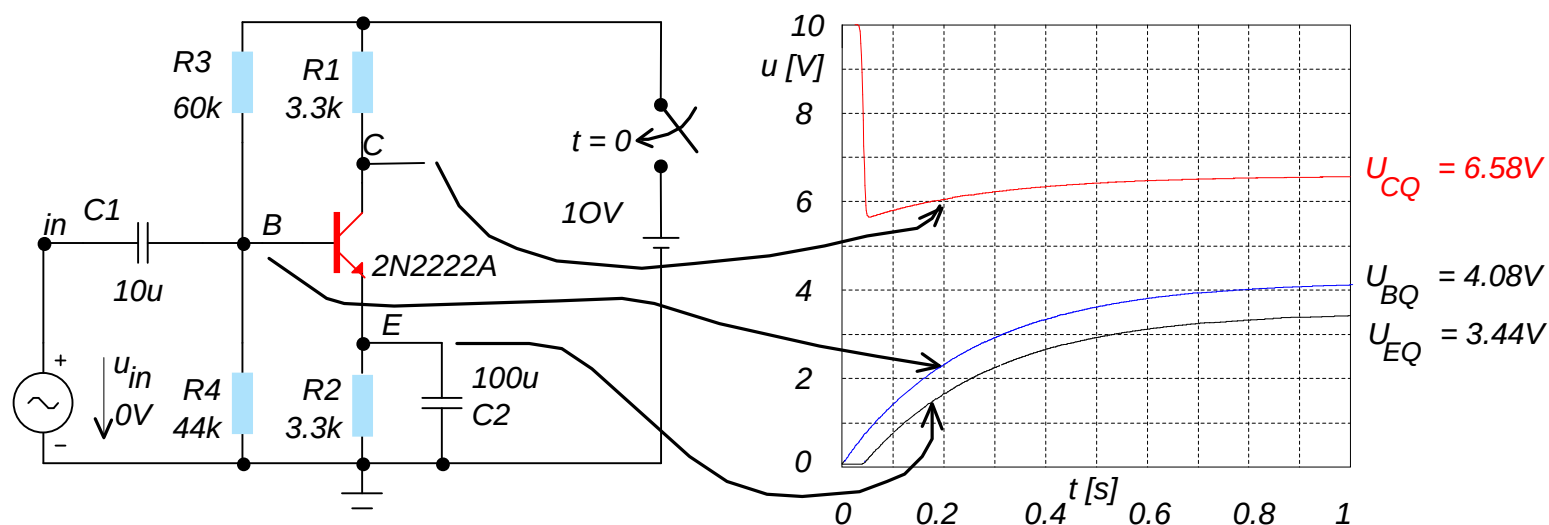
**Odvozené cíle:** další zpracování analyzovaných signálů (Fourierova analýza...).

Pomocí **běžného osciloskopu** je možné sledovat časové průběhy napětí v různých uzlech obvodu v ustáleném stavu:

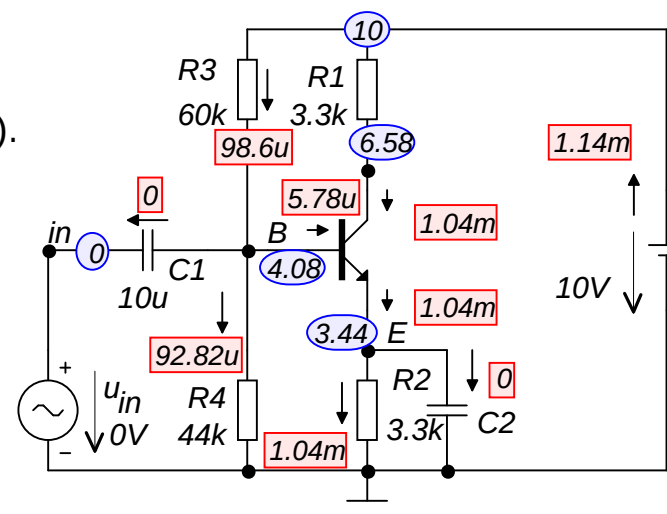


„Intelligentní osciloskop“: všechny funkce běžného osciloskopu + něco navíc:

- Zobrazení všech možných časových průběhů, které lze odvodit na základě napětí a proudů (výkony, náboje na kapacitorech a mag. indukční toky induktory, účinnosti energetických přenosů, ...)
- Simulace činnosti dokonalého paměťového osciloskopu k zaznamenávání jednorázových přechodných dějů

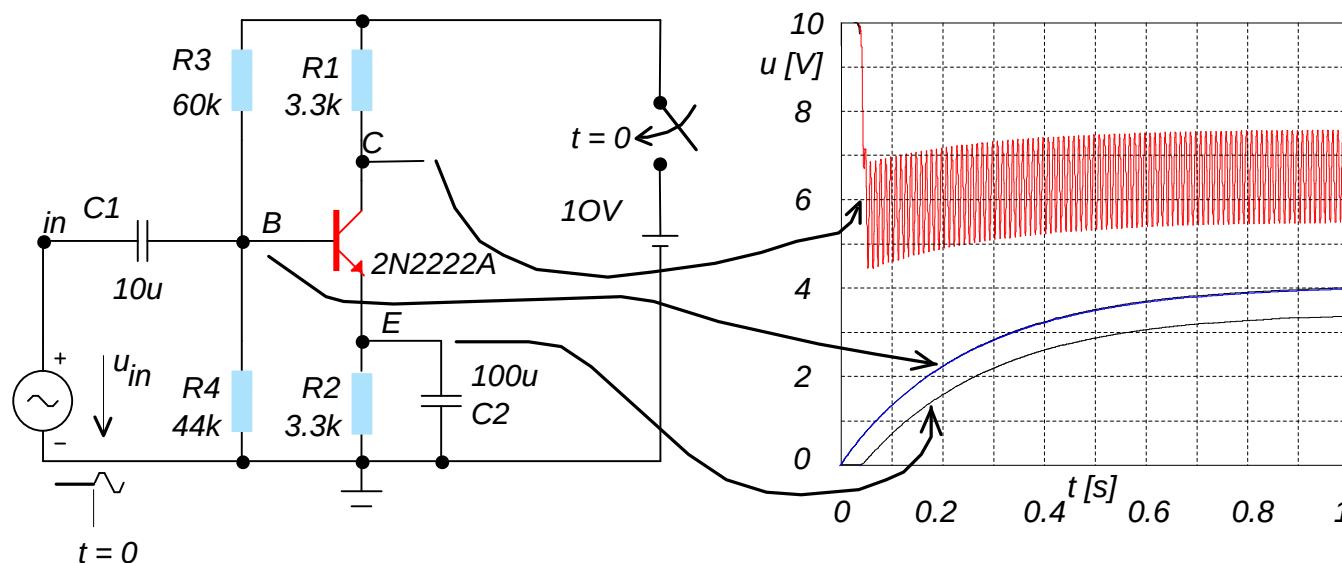


- Uvažování obecných počátečních podmínek přechodných dějů (vybíjení kapacitorů, závislost napětí na spínači na proudu induktorem...).
- Přímé hledání stejnosměrných ustálených stavů a pracovních bodů





■ „Rozkouskování“ analýzy na vzájemně navazující děje, postupné hledání ustálených stavů



(MicroCap)

■ Přímé nalezení ustálených stavů

(CIA)

Odvozené analýzy „pod čarou“:

- spektrální analýza časových průběhů
- analýza zkreslení v kmitočtové oblasti (THD..)

.....

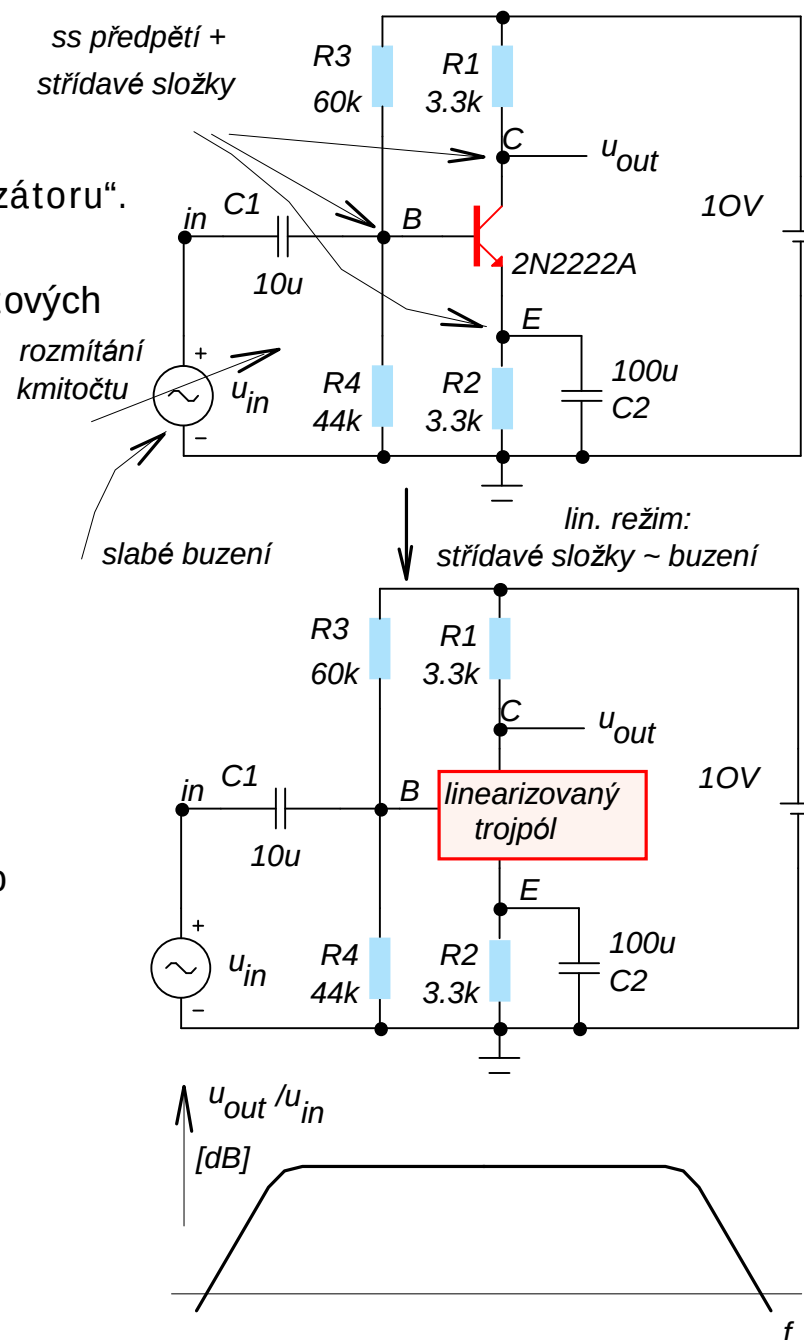
## Analýza „AC“.

**Prvotní cíl analýzy:** imitace činnosti „inteligentního obvodového analyzátoru“.

**Odvozené cíle:** šumová analýza, získávání časových průběhů z kmitočtových charakteristik algoritmem IFT...

### Standardní obvodový analyzátor:

budí měřený objekt slabým kmitočtově rozmítaným harmonickým signálem, vyhodnocuje odezvu na buzení a vykresluje na obrazovce kmitočtovou závislost přenosových nebo impedančních funkcí. Při měření se obvod musí nacházet v lineárním režimu, tj. nesmí docházet k nelineárnímu zkreslení signálu vlivem přebuzení. To je obecně obtížný úkol, protože k přebuzení nesmí docházet v žádné části obvodu. Mnohdy však uživatel nemá dovnitř obvodu přístup nebo není v jeho moci „hlídat“ všechny důležité měřicí body. Nastavení extrémně slabého budicího signálu není vhodným řešením z hlediska šumových poměrů. Další známé problémy jsou spojeny s rychlostí rozmítání vstupu, zejména při proměřování v pásmu nízkých kmitočtů.



## „Inteligentní obvodový analyzátor“:

Výše uvedené problémy jsou z principu potlačeny. Jsou k dispozici další možnosti:

- Je možné měnit polohu výchozího pracovního bodu a zkoumat, jaký to bude mít vliv na přenosové vlastnosti.
- Je možné zkoumat střídavé poměry ve všech uzlech a na všech individuálních součástkách „najednou“.
- Není nutné se omezovat jen na kmitočtové charakteristiky typu „přenos napětí“ nebo impedance, dosažitelné je vše, co lze popsat rovnicemi.
- Možnosti grafického vyjádření výsledků jsou rovněž značné (Nyquistovy komplexní kmitočtové charakteristiky, Smithův diagram atd.).
- Jednobodová analýza střídavých poměrů v obvodu na jednom konkrétním kmitočtu.

Nejvhodnějším zobrazením výsledků je rozložení napětí a proudů (amplitud a počátečních fází), případně komplexních výkonů přímo ve schématickém editoru, tak jak je to u stejnosměrné analýzy. Bohužel tuto funkci MicroCap (verze 7) nenabízí. Ze známých simulačních programů umožňuje práci v tomto režimu program TINA.

Odvozené analýzy „pod čarou:

- 
- šumová analýza (jak se vlastní šum součástek promítá na výstup, kmitočtová závislost spektrálních hustot napětí)
  - analýza impulsní charakteristiky obvodu z jeho kmitočtové charakteristiky aplikací inverzní FT.

.....

## Analýza „DC“

**Prvotní cíl analýzy:** imitace činnosti „inteligentního charakterografu“.

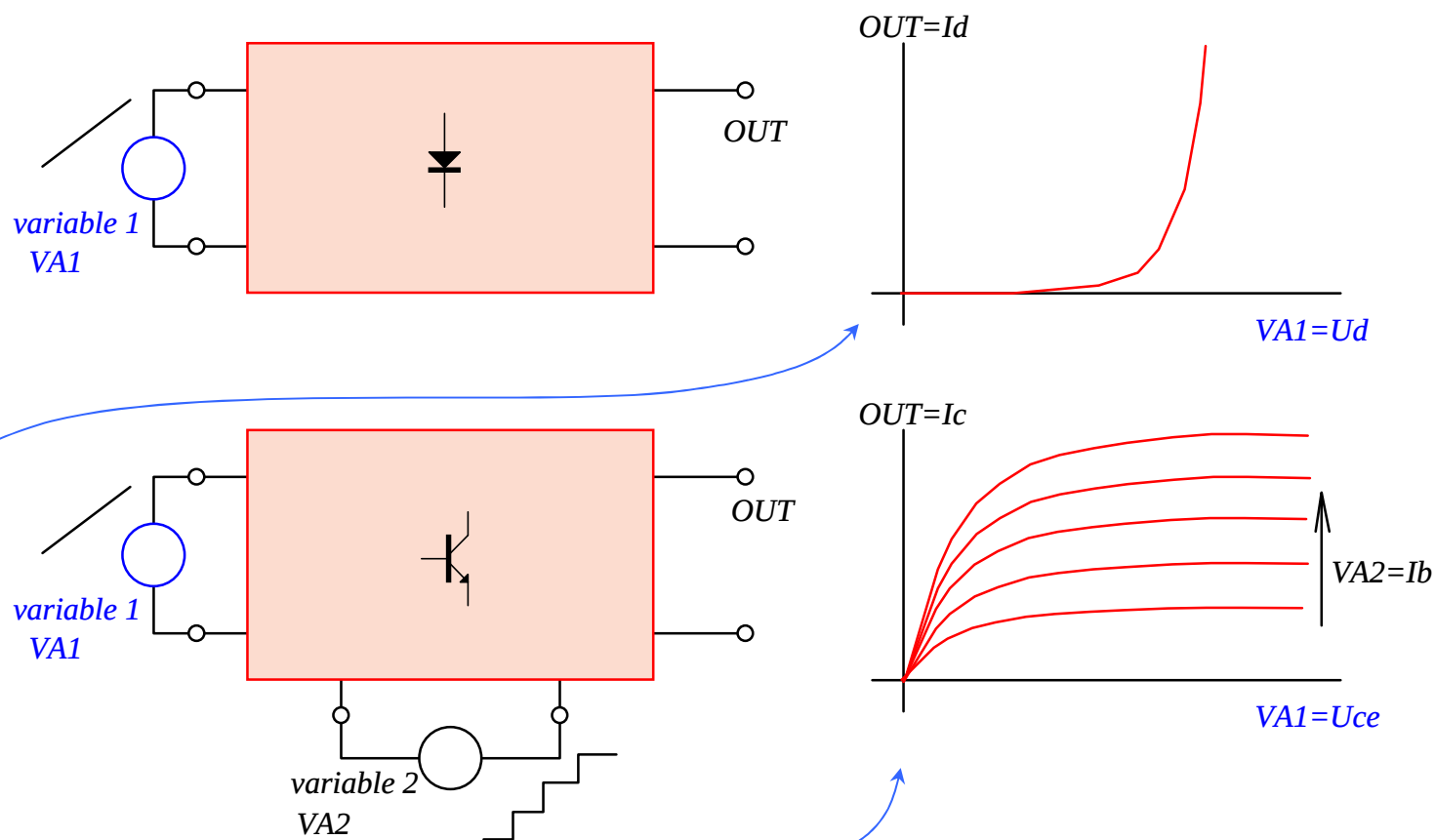
**Odvozené cíle:** rozšiřující stejnosměrná analýza.

### Standardní charakterograf:

Ke klasickému charakterografu připojujeme pomocí speciálních přípravků definovaným způsobem buď dvojpóly (diody, nelineární rezistory) nebo vybrané typy vícepólů (zejména tranzistory). Charakterograf pak může pracovat ve dvou různých režimech:

1. Základní „dvojpolový“ režim. Výsledkem je jedna ampérvoltová charakteristika.

2. Parametrický režim. Výsledkem je sít' charakteristik, např. výstupní charakteristiky tranzistoru.



„**Intelligentní charakterograf**“: všechny funkce běžného charakterografu + něco navíc:

- Neexistuje omezení na typ analyzovaného obvodu.

Můžeme snímat ampérvoltovou charakteristiku diody stejně jako třeba napěťovou převodní charakteristiku celého integrovaného zesilovače.

- Nejsou kladena žádná omezení na typ obvodových veličin, které mohou být sledovány současně a vyhodnocovány tak jejich souvislosti.

Samozřejmostí je krokování teploty, tak jako u ostatních analýz.

Analýza „pod čarou“:



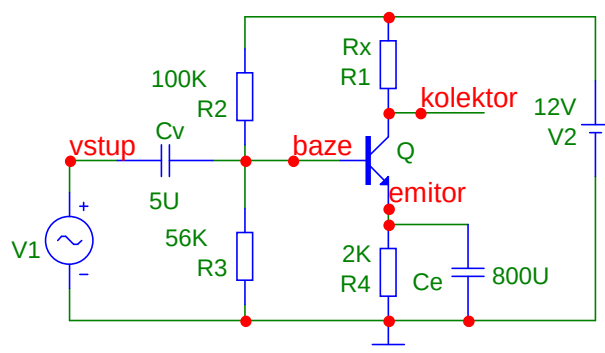
Rozšiřující stejnosměrná analýza

Možnost sledování, jak nejrůznější parametry součástek obvodu (například proudový zesilovací činitel tranzistoru) nebo další parametry (např. teplota) mohou ovlivňovat stejnosměrné poměry.

Tato funkce simulátoru nabízí nevídané možnosti v zkoumání stejnosměrných vlastností obvodů.

## Příklady rozšiřující stejnosměrné analýzy

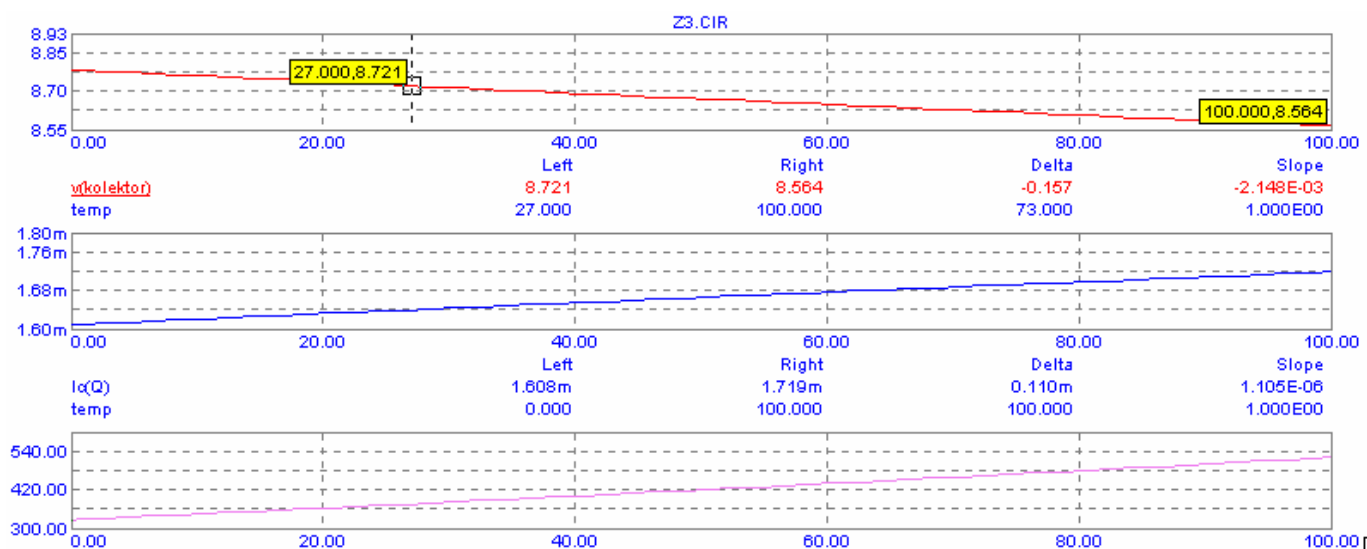
### Jednostupňový tranzistorový zesilovač, třída A, s blokovacím kapacitorem Ce



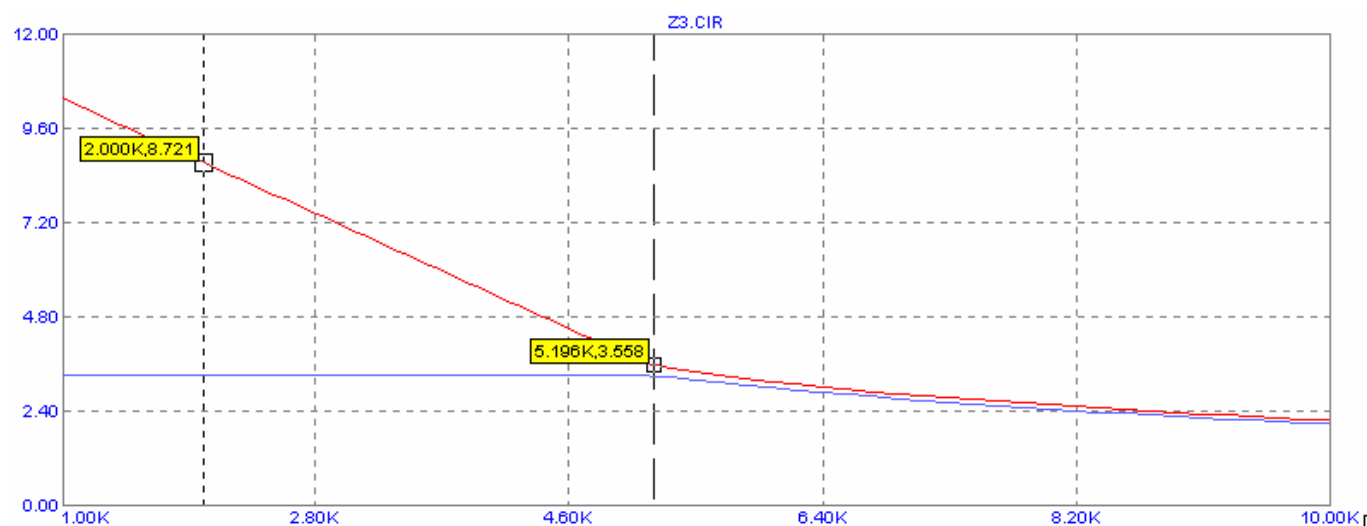
Zdroj V1 je harmonický 1kHz/10mV

.define Rx 2k

### Teplotní závislosti kolektorového napětí a proudu a proudového zesilovacího činitele

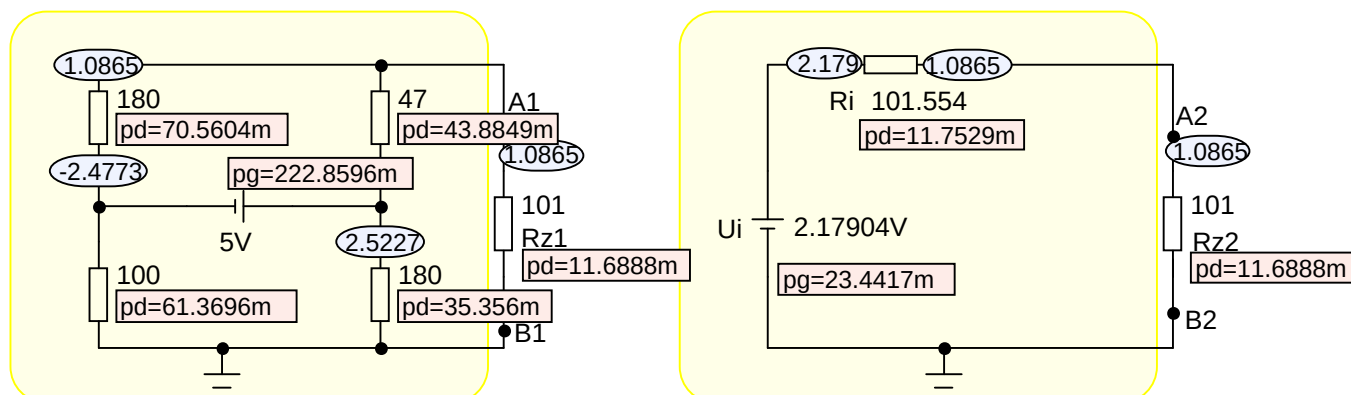


### Závislosti kolektorového a emitorového napětí na odporu Rx.

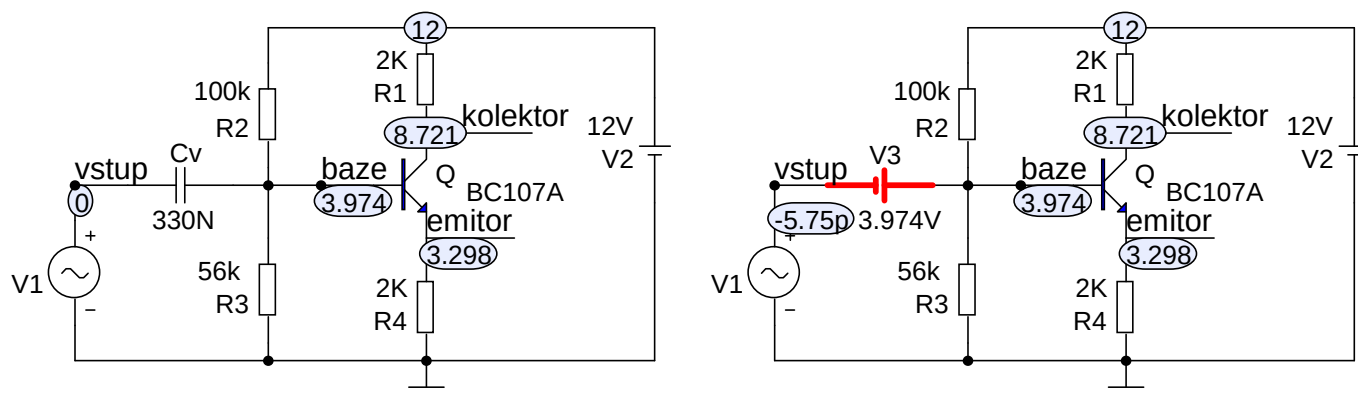


## Rozšiřující typy analýz.

### Dynamická stejnosměrná analýza (Dynamic DC).



### Přenosová funkce (Transfer Function).



**Transfer Function**

Output Expression:

Input Source Name:

Transfer Function:  ☐ Place Text

Input Impedance:

Output Impedance:

**Transfer Function**

Output Expression:

Input Source Name:

Transfer Function:  ☐ Place Text

Input Impedance:

Output Impedance:

## Citlivostní analýza (Sensitivity).

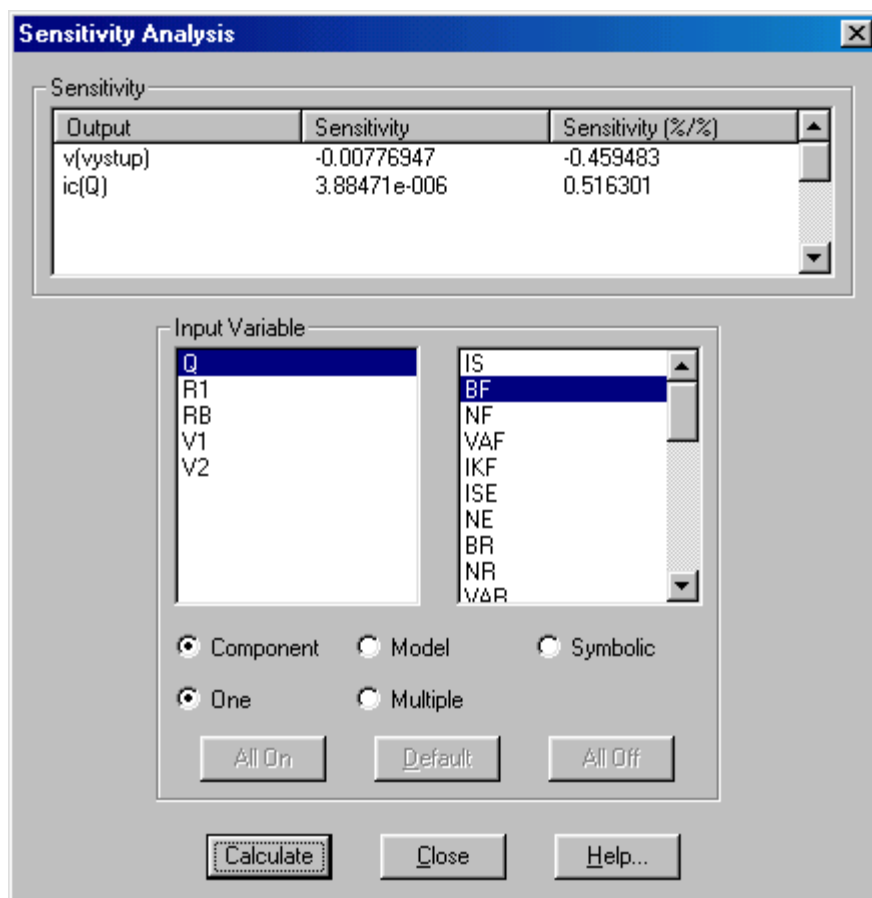
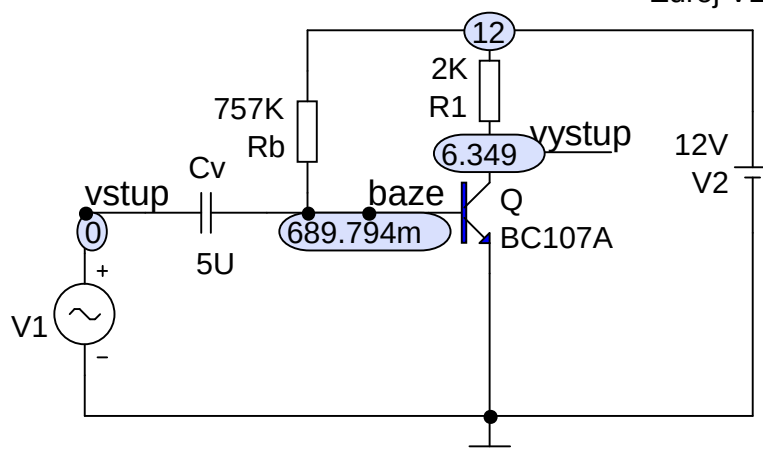
Je počítána **stejnoseměrná** citlivost jedné nebo více veličin, vyjádřené vzorcem nebo vzorci, na jednu nebo více vstupních proměnných.

Citlivost je počítána takto:

Změna ve vzorci/malá změna vstupní proměnné.

### Jednostupňový tranzistorový zesilovač, třída A, bez stabilizace prac. bodu

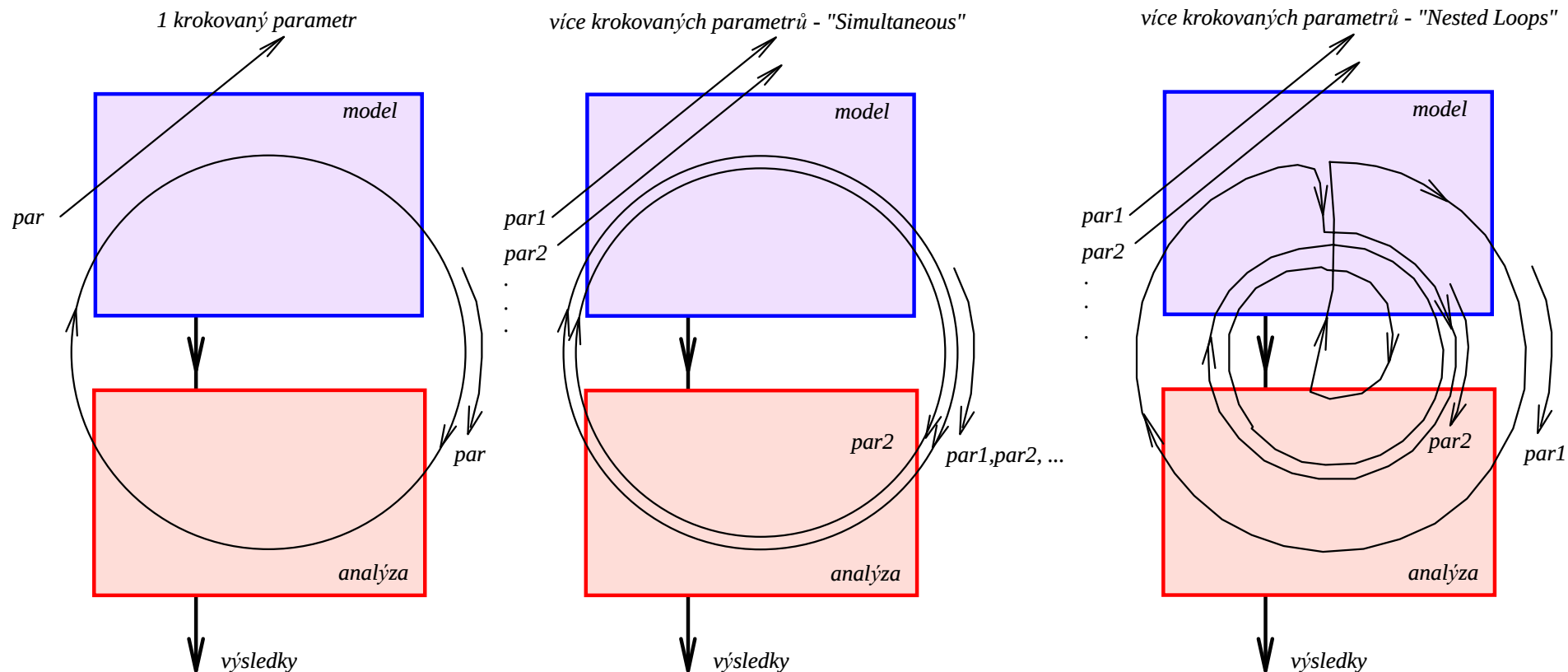
Zdroj V1 je harmonický 1kHz/20mV





## ✚ Vybrané analyzační režimy.

### Krokování (Stepping).



Metody krokování: Linear, Log, List

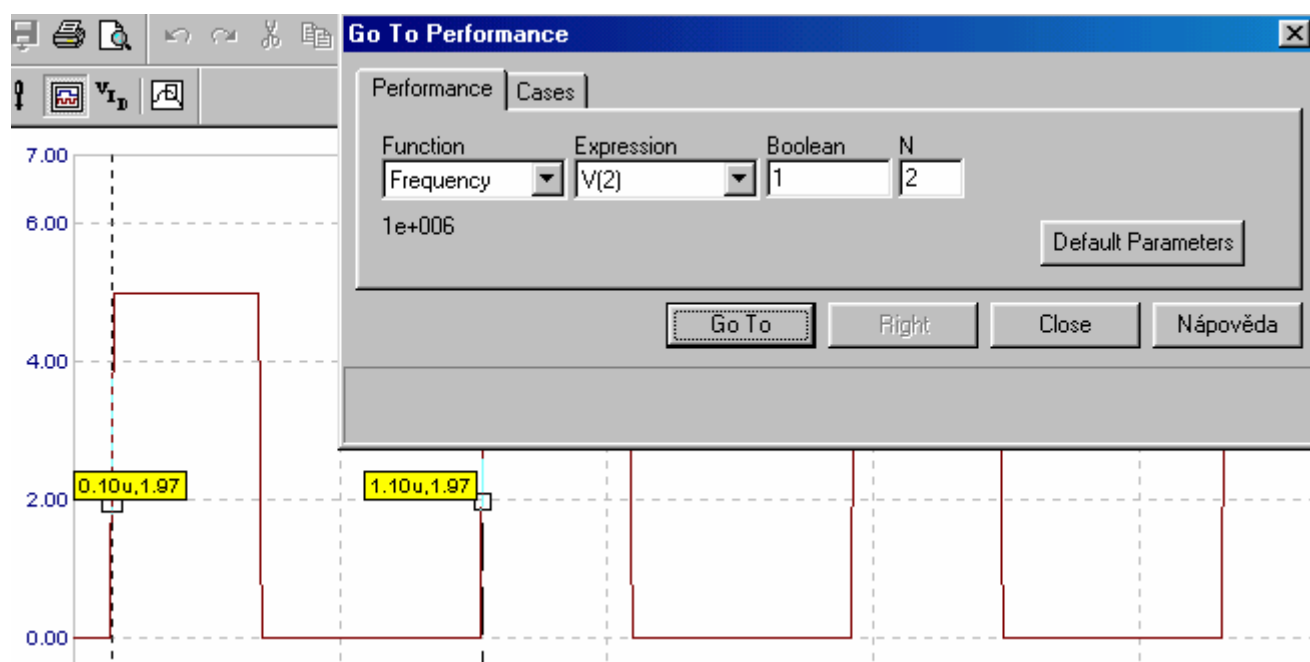
Co lze krokovat: závisí na simulačním programu (V MicroCapu lze krokovat téměř vše).

## Vyhodnocovací analýza (Performance Analysis).

Výsledky analýzy = značné množství numerických dat. K jejich zpracování jsou určeny tzv. **vyhodnocovací funkce** („Performance Functions“). Tyto funkce slouží k hledání „jednobodových“ charakteristik celých křivek, jako jsou například lokální či globální maxima a minima křivek, doby náběhu impulsů, šířky impulsů, opakovací kmitočet či perioda signálu a řada dalších.

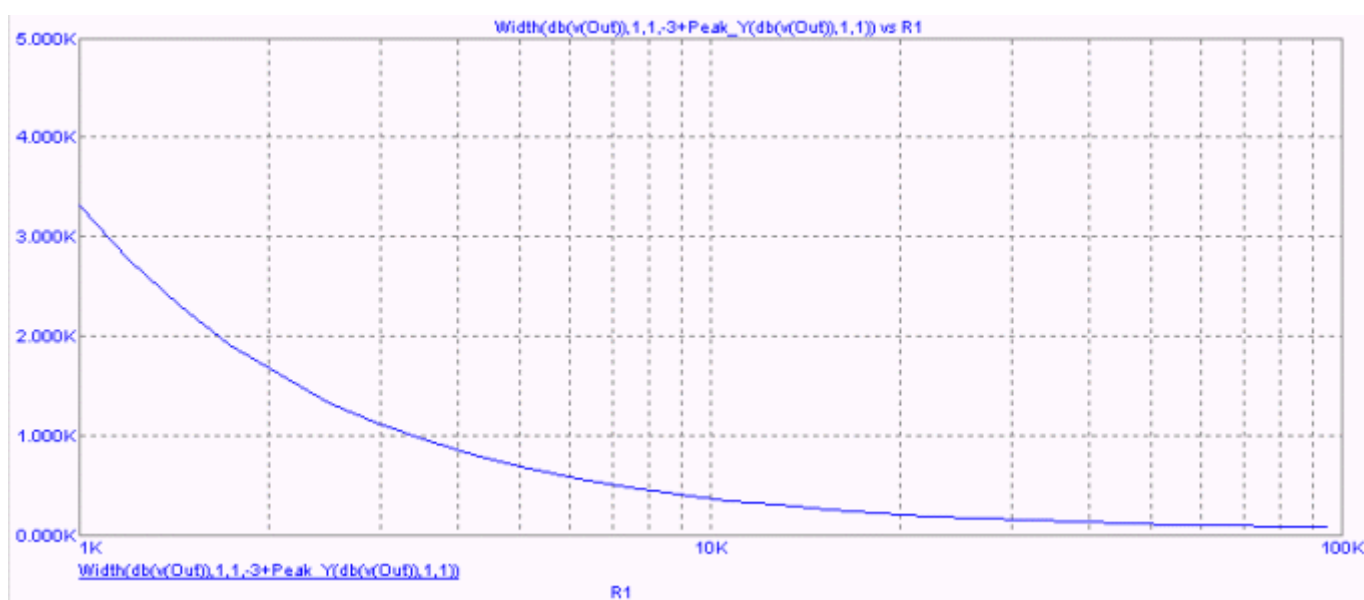
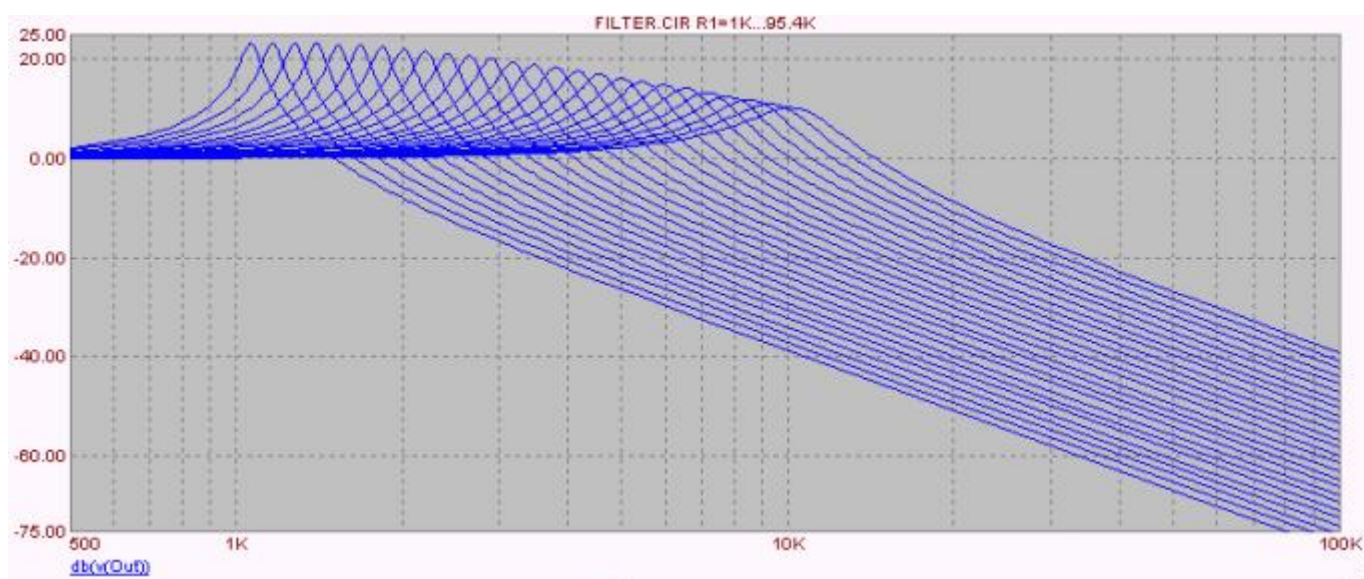
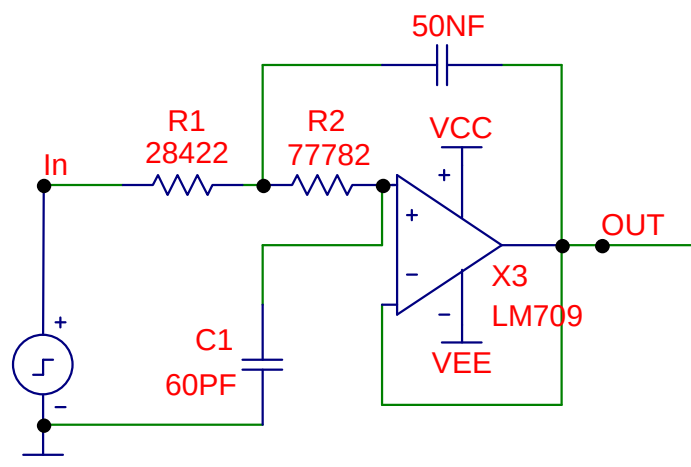
Vyhodnocovací funkce mohou být použity ve dvou různých režimech:

Okamžitý režim („Immediate Mode“) – aplikace vyhodnocovací funkce přímo u vyhodnocované křivky.



Vyhodnocovací grafy („Performance plots“): V tomto režimu se zpracovávají výsledky vícenásobné analýzy, vzniklé krokováním parametrů. Výsledkem jsou grafy závislostí vyhodnocovacích funkcí na krokovaných parametrech.

# Příklad vyhodnocovacích grafů – závislost šířky pásma filtru na odporu R1.

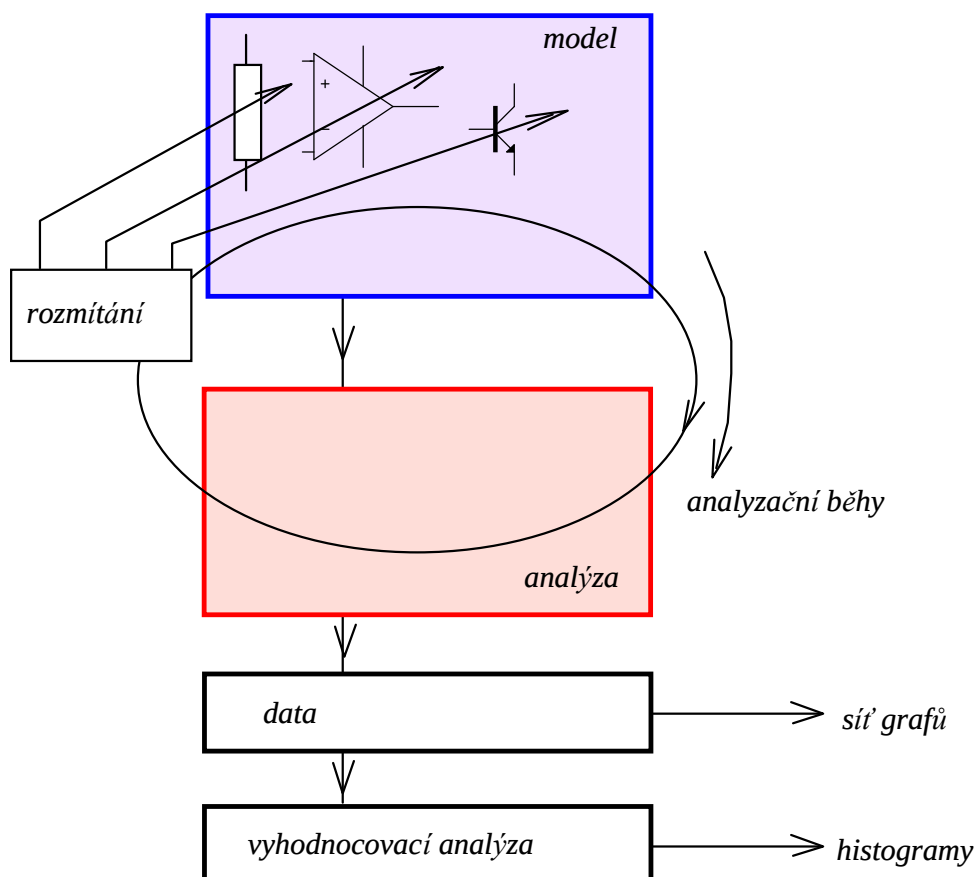


## Statistická analýza (Monte Carlo).

**Cíl analýzy:** Zjistit, nakolik výrobní rozptyly parametrů jednotlivých součástek ovlivňují vlastnosti obvodu. Jinými slovy, jak může nedodržení jmenovitých hodnot jednotlivých parametrů odklonit výsledné charakteristiky obvodu od charakteristik požadovaných.

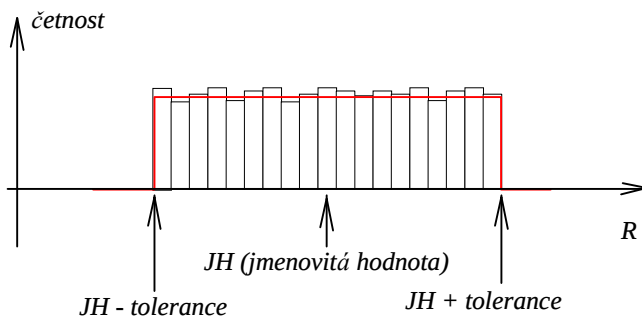
**Praktická aplikace statistické analýzy** znamená:

- Výběr parametrů součástek, které budou vykazovat tolerance. Definice velikostí těchto tolerancí a statistického zákona jejich výskytu.
- Provedení mnohonásobné analýzy obvodu. Při každém analyzačním běhu jsou za hodnoty parametrů, které vykazují tolerance, dosazena náhodná čísla, která závisí na jmenovitých hodnotách parametrů a na statistickém rozložení příslušných tolerancí kolem těchto jmenovitých hodnot. Výsledkem není jedna, ale celá síť analyzovaných závislostí.
- Vyhodnocení výsledků mnohonásobné analýzy. Vyhodnocení může být buď vizuální (zda síť charakteristik není příliš "široká", nebo statistické (statistická analýza velkého množství dat s využitím vyhodnocovacích funkcí; výsledkem jsou histogramy a číselné statistické charakteristiky jako střední hodnota, rozptyl apod.).

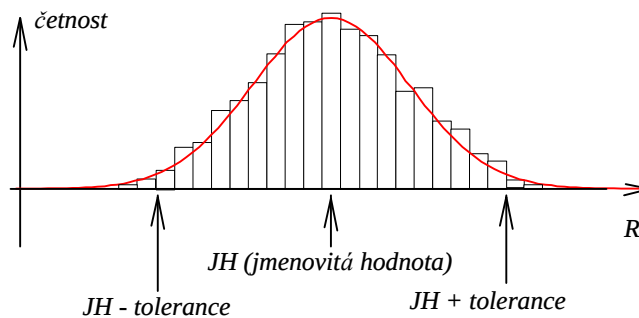


## Zákony pravděpodobnostního rozložení parametrů součástek

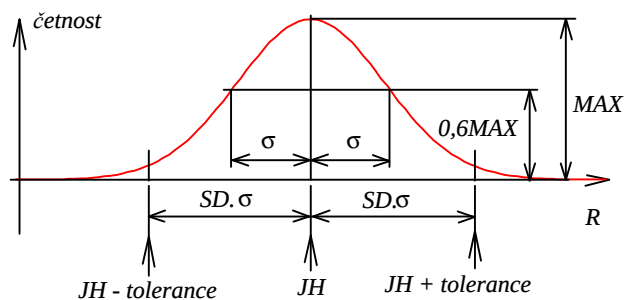
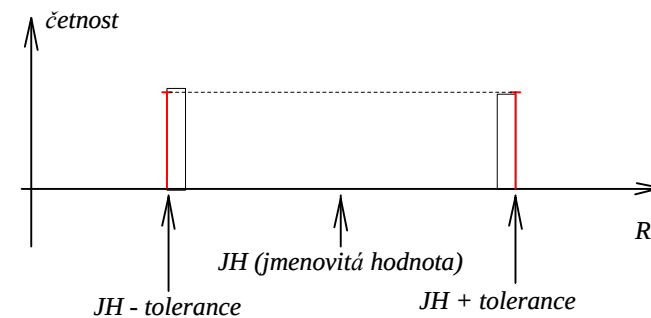
### Rovnoměrné



### Gaussovo (normální)

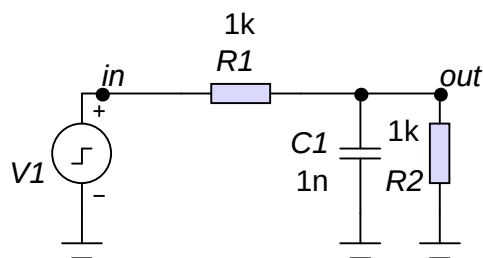


### Nejhorší případ (Worst Case)

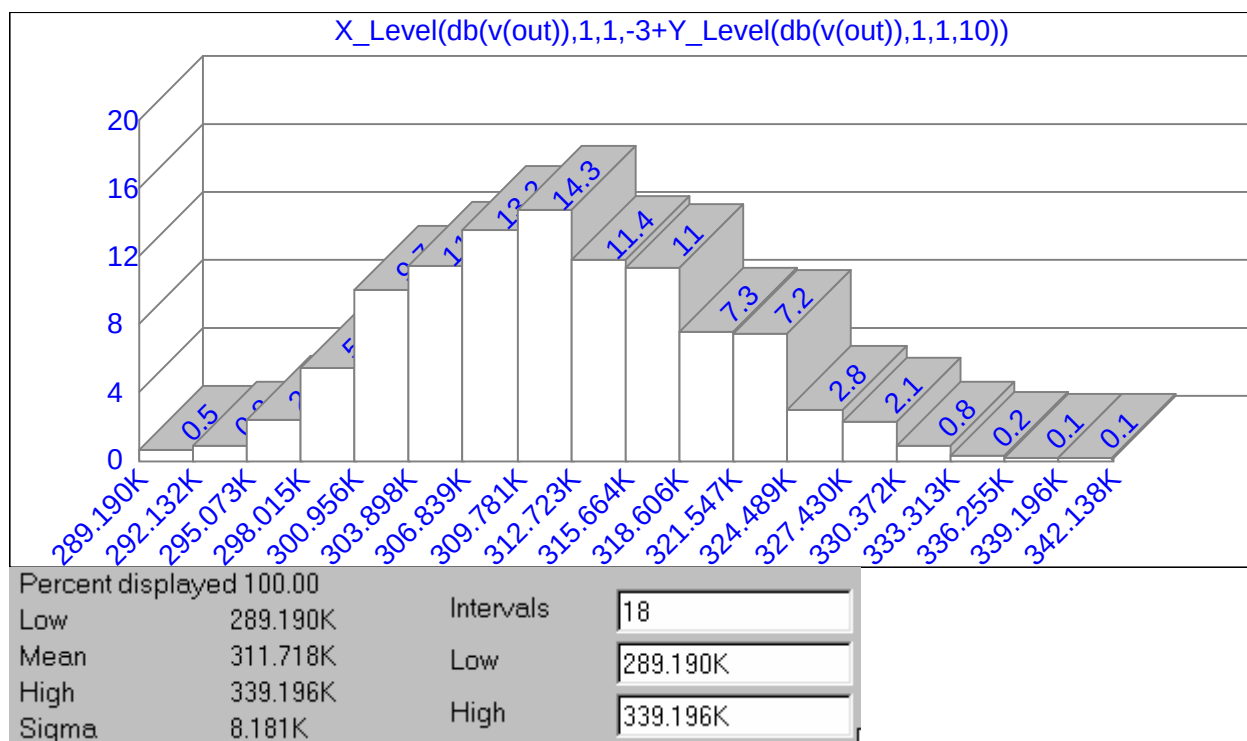
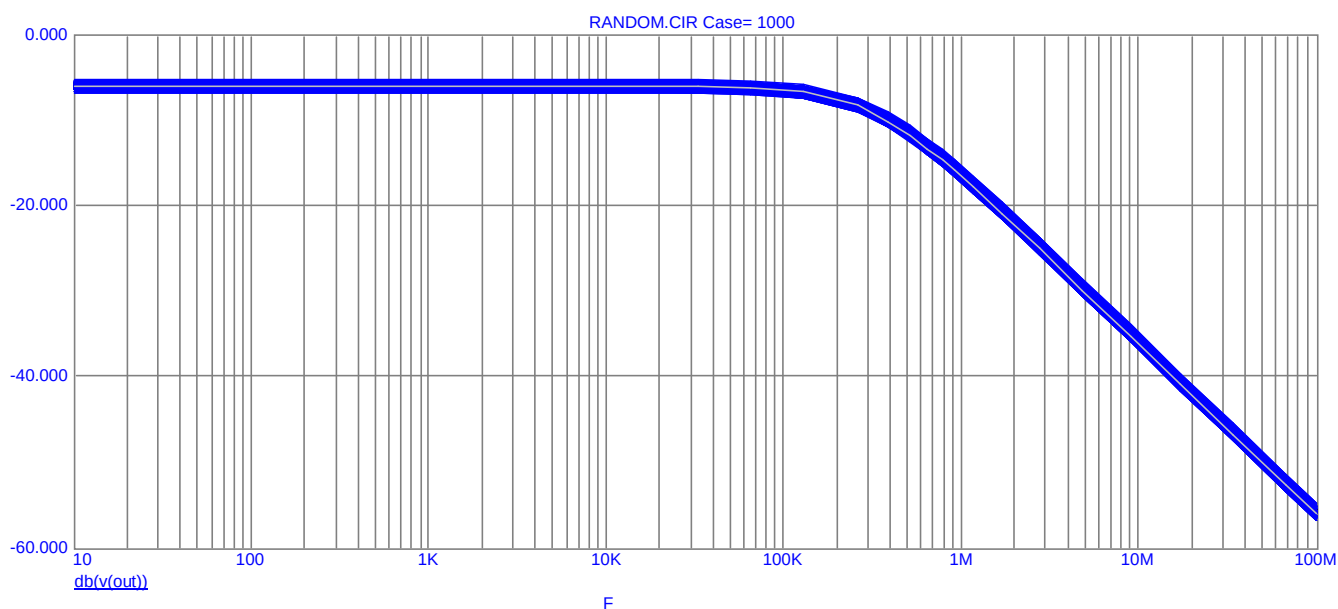


| SD   | procento výskytů<br>v tolerančním pásu |
|------|----------------------------------------|
| 1    | 68                                     |
| 1,96 | 95                                     |
| 2    | 95,5                                   |
| 2,58 | 99                                     |
| 3    | 99,7                                   |
| 3,29 | 99,9                                   |

## Příklad statistické analýzy



.MODEL ODPOR1 RES (R=1 LOT=10%)



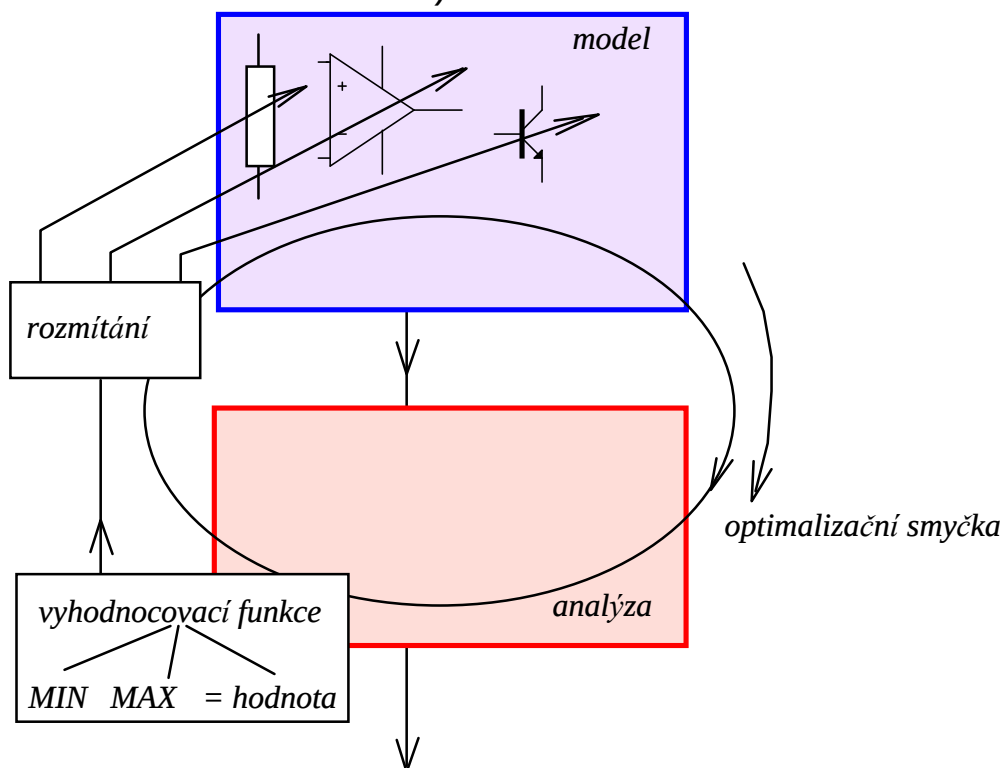
Střední hodnota lomového kmitočtu je asi 312 kHz. Teoretická hodnota se dá odvodit ze schématu jako

$$\frac{1}{2p} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C \approx 318 \text{ kHz}$$

. Rozptyl kolem střední hodnoty je menší než 2,7 % střední hodnoty.

## Optimalizace (Optimization).

- Podle toho, jakých **cílů** chceme při optimalizaci dosáhnout, je třeba zadat **kritéria optimalizace** (například maximalizace činného výkonu na rezistoru R8). Kritérií může být více a jejich působení se tak může sdružovat.
- Dále je nutné zadat parametry součástek obvodu, které bude simulátor měnit a hledat jejich optimální velikosti tak, aby bylo naplněno optimalizační kritérium.  
Je třeba zadat povolený interval změn těchto parametrů, případně i tzv. omezení při optimalizaci („Constraints“) ve formě booleovských výrazů (například  $V_{CE}(Q1) \leq 200\text{m}$ , tj. kolektorová ztráta tranzistoru Q1 nesmí přesáhnout hodnotu 200 mW).



Příklady použití optimalizačních kritérií:

### MIN:

minimalizace přenosu napětí filtru na kmitočtu 50 Hz – návrh pásmové zadržky, nalezení optimálních hodnot součástek.

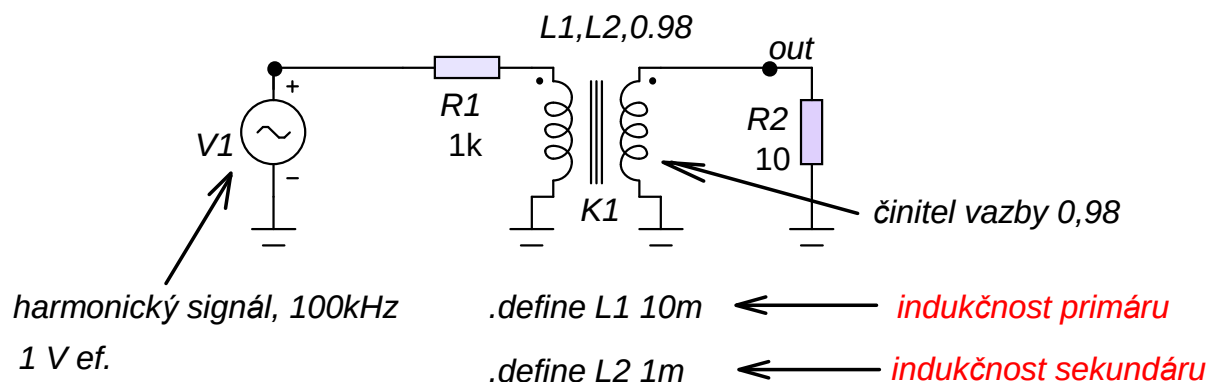
### MAX:

maximalizace činného výkonu přeneseného ze zdroje do spotřebiče volbou optimální kompenzační kapacity.

### = hodnota:

proložení kmitočtové charakteristiky zesilovače zadanými body.

## Ukázka optimalizace – návrh transformátoru pro výkonové přizpůsobení

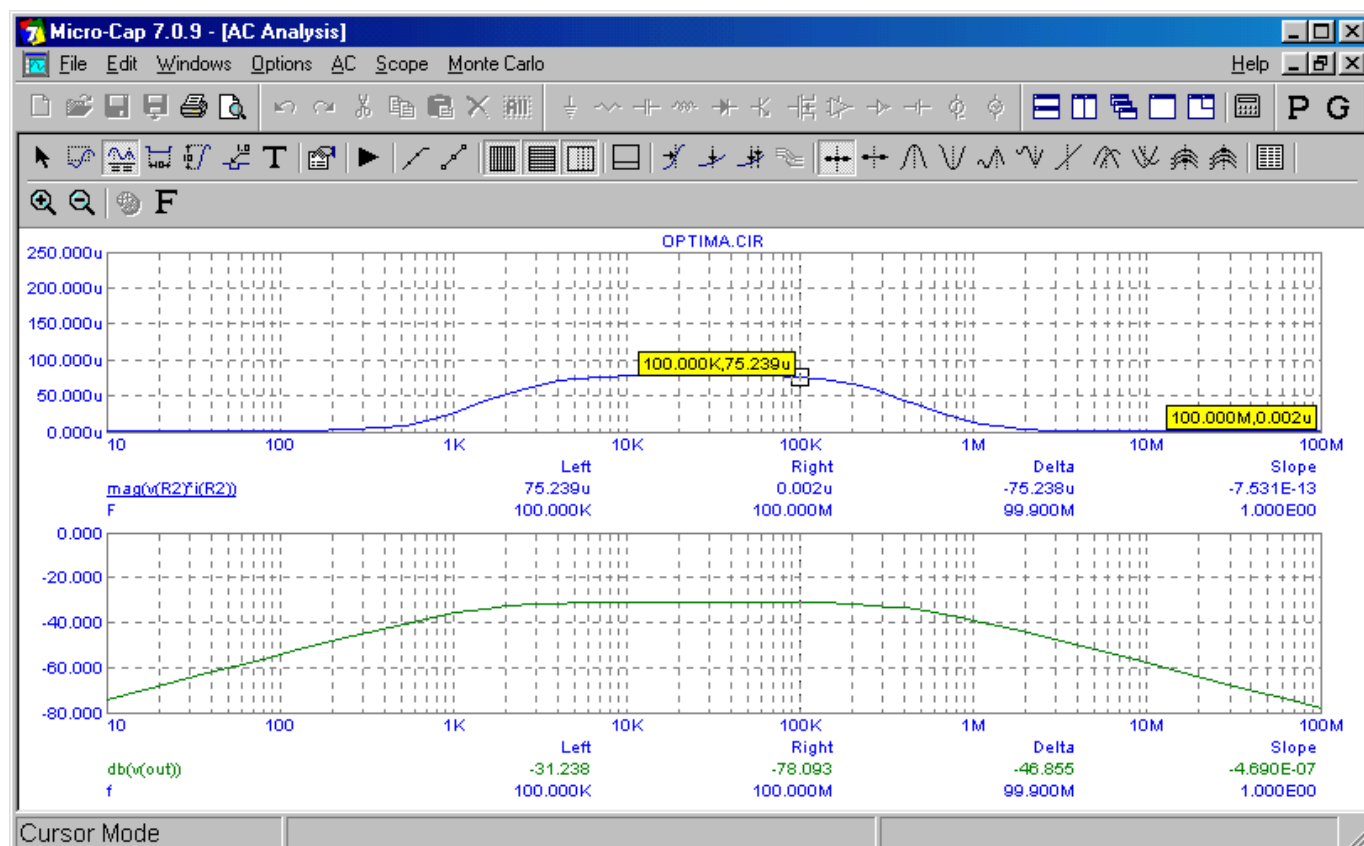


Úkolem je optimalizovat  $L1$  a  $L2$  tak, aby na kmitočtu 100 kHz byl maximalizován přenos činného výkonu do odporové zátěže  $R2$ .

Z teorie (ideální transformátor):

Poměr čtverců počtu závitů primární a sekundární cívky měl být roven poměru odporů  $R1$  a  $R2$ , tedy 100. Tomuto poměru by měl zhruba odpovídat poměr indukčností  $L1$  a  $L2$ . Ve skutečnosti je tento poměr 10. Kromě toho je však třeba uvážit kmitočtové závislosti přenosu, které nejsou v těchto jednoduchých výpočtech zohledněny.  $L1$  a  $L2$  tedy nejsou navrženy optimálně. Maximální možný přenesený výkon do  $R2$  = výkon na  $R1$  =  $0,5^2/R1=250 \mu\text{W}$ .

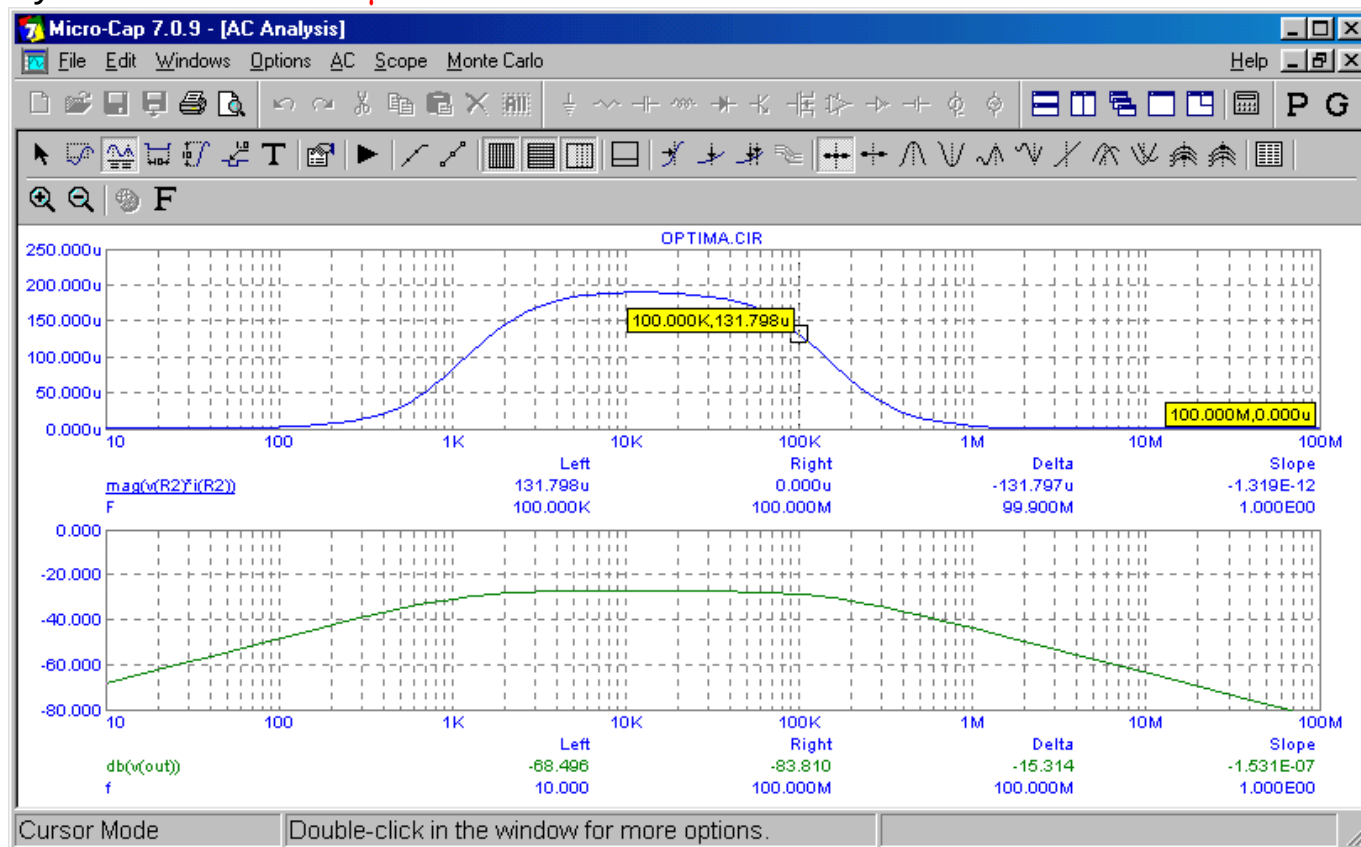
Výsledek analýzy – na 100kHz je výkon jen  $75\mu\text{W}$ .





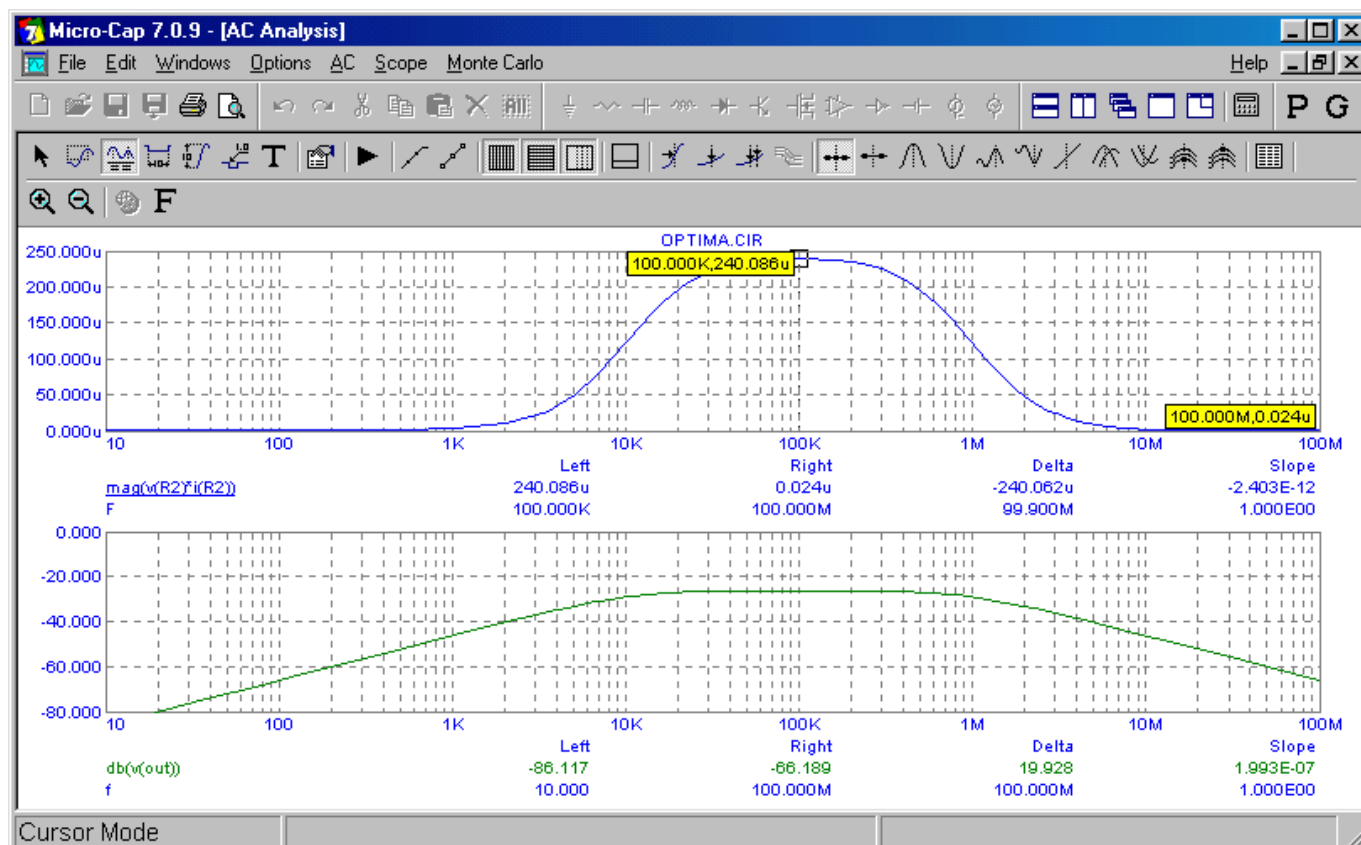
Výsledek dílčí optimalizace – **optimalizujeme jen parametr L1:**

Výkon vzrostl na **132 $\mu$ W**.



Výsledek celkové optimalizace – **optimalizujeme parametry L1 i L2:**

Výkon je maximalizován na **240 $\mu$ W**.



## Literatura a další zdroje informací

### Informace o simulačních programech:

#### SPICE

<http://www.cadencepcb.com/products/pspice/>

<http://www.ee.mtu.edu/faculty/rzulinsk/pspice.htm>

KOLKA, Z.: MicroSim PSpice A/D™. Program pro analýzu elektrických obvodů. Skriptum VUT Brno, 1997.

BURIAN, Z. - KREJČÍŘÍK, A.: .Simuluj! – simulace vlastností analogových elektronických obvodů. BEN, technická literatura, 2002.

KEJHAR, M. - KIRSCHNER, M. - MUSIL, V. - STRÍBRNÝ, V.: Program SPICE v příkladech. 1. vyd., ČVUT Praha, 1995. 240 s.

#### MicroCap

<http://www.spectrum-soft.com>

BIOLEK, D.: "Behaviorální" modelování v programu MicroCap VI. ELEKTROREVUE, červen 2000. K dispozici na

<http://www.elektrorevue.cz/clanky/00021/>

#### Tina

<http://www.designsoftware.com/TINA.HTM>

#### MultiSim:

<http://www.cadware.cz/cad204.htm>

<http://www.electronicworkbench.com/>

#### CIA

DOBEŠ, J.: Návrh radioelektronických obvodů počítačem. Skriptum ČVUT Praha, 1997.

DOBEŠ, J.: Analýza nelineárních statických a dynamických elektronických obvodů. 1. seminář "Spolupráce vysokých a středních škol", Pardubice, 13. říjen 1999, s. 13-18.

#### SABER

[1] [http://www.synopsys.com/products/avmrg/saber\\_cosim\\_ds.html](http://www.synopsys.com/products/avmrg/saber_cosim_ds.html)

#### ELDO

<http://www.mentor.com/eldo/overview.html>

#### Analog Insydes

<http://www.analog-insydes.de/>

#### Snap

<http://www.fee.vutbr.cz/UREL/snap>

BIOLEK, D.: Program SNAP v. 2.6: Nové možnosti pro výuku i výzkum. STO-7, VA Brno, 1999, s. 66-69. ISBN 80-214-1392-1. K dispozici na [http://www.vabo.cz/Stranky/biolek/veda/articles/STO7\\_3.pdf](http://www.vabo.cz/Stranky/biolek/veda/articles/STO7_3.pdf)

#### LTP2

<http://www.fee.vutbr.cz/UTEE/OBVODY/index.html>

### O komerčních simulačních programech „pro každého“:

LÁNÍČEK, R.: Simulační programy pro elektrotechniku. Nakladatelství BEN, 2000.

### O symbolických a semisymbolických programech:

BIOLEK, D.: Využití programů pro symbolickou a semisymbolickou analýzu elektrických obvodů ve výuce i výzkumu. ELEKTROREVUE, prosinec 1999. K dispozici na <http://www.elektrorevue.cz/clanky/99012/index.htm>

### O počítačové analýze a simulaci se zaměřením na MicroCap:

BIOLEK, D.: Analýza elektrických obvodů (nejen) na počítači. Připravováno pro nakladatelství BEN.