

Теория на електронните схеми

Основни понятия и определения :
активност – пасивност
линейност - нелинейност

Доц. д-р инж. Тодор Тодоров



Катедра Електронна техника, ФЕТТ



Технически университет – София



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през
целия живот и развитие на компетенции”*

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Съдържание

- ▶ Образователни цели
- ▶ Активност и пасивност
- ▶ Линейност и нелинейност



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

**„Организационна и технологична инфраструктура за учене през
целия живот и развитие на компетенции”**

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Образователни цели

След изучаването на този раздел вие ще трябва да можете:

- Да дефинирате понятията активност и пасивност; линейност и нелинейност
- Да обяснявате връзката между различните режими на функциониране на електронните схеми и основните анализи в PSpice



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Активност и пасивност

- ▶ Активността на даден елемент/схема се определя според това дали отдава или консумира енергия
- ▶ Активни елементи са източниците на електрическа енергия
- ▶ Примери:
 - източник на напрежение E
 - източник на ток I
- ▶ Пасивните елементи консумират електрическа енергия
- ▶ Примери:
 - резистор със съпротивление R
 - кондензатор с капацитет C
 - бобина с индуктивност L



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



АКТИВНОСТ И ПАСИВНОСТ

- ▶ Активността на електронните компоненти/схеми се дефинира чрез коефициента на предаване по мощност:

$$k_p = \frac{P_{\text{изх}}}{P_{\text{вх}}} > 1$$

Където:

$P_{\text{вх}}$ - входна мощност на сигнала

$P_{\text{изх}}$ - изходна мощност на сигнала



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Активност и пасивност

- ▶ Транзисторите, операционните усилватели и схемите съставени от тях са **активни**, защото имат възможност да **усилват мощността** на постъпващите на входовете им електрически сигнали, или сами да генерират трептения



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Активност и пасивност

- ▶ Един електронен компонент/схема представлява усилвател на мощността на сигналите, ако средната стойност на мощността на сигнала в изхода (товара) е по-голяма от средната стойност на мощността на входния сигнал (сигнала на генератора), т. е. $P_{ИЗХ} > P_{ВХ}$
- ▶ За да бъде възможно усилването по мощност, в схемата трябва да бъде включен източник на постоянно-токова енергия



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Линейност и нелинейност

- Според **волт-амперната характеристика** (зависимостта между приложеното напрежение върху елемента и протичащия през него ток) електронните компоненти биват:
 - Линейни (резистор $U=RI$ при $R=const$)
 - Нелинейни (полупроводникови елементи ППЕ - диоди, транзистори)
- Схемите, които съдържат нелинейни елементи са също нелинейни



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Линейност и нелинейност

- ▶ При **постояннотоковия и времевия анализ** на електронна схема се проявява силно изразения **нелинеен характер** на ППЕ (PSpice модели)
- ▶ За целите на тези анализи, електронните компоненти/схеми се описват със системи **нелинейни алгебрични или диференциални уравнения**



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

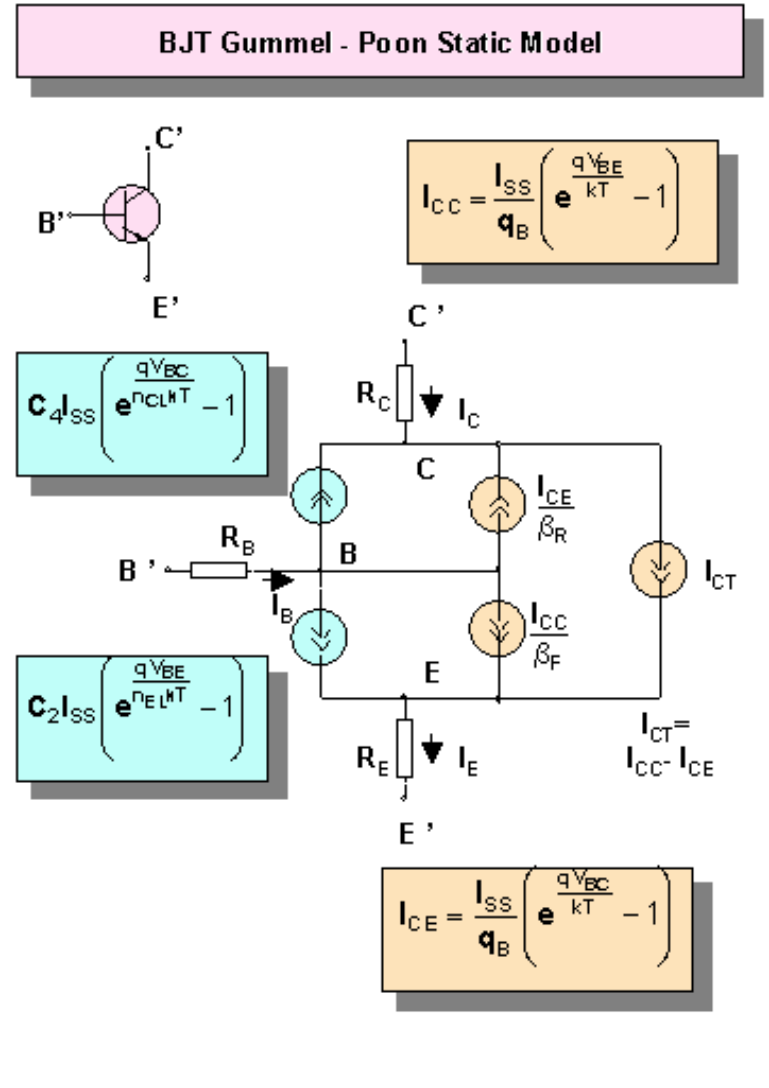
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

PSPice модели BJT

Gummel-Poon Bipolar Model: Model Description & Parameter Extraction



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

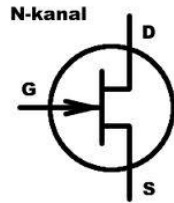
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

PSPice МОДЕЛИ JFET

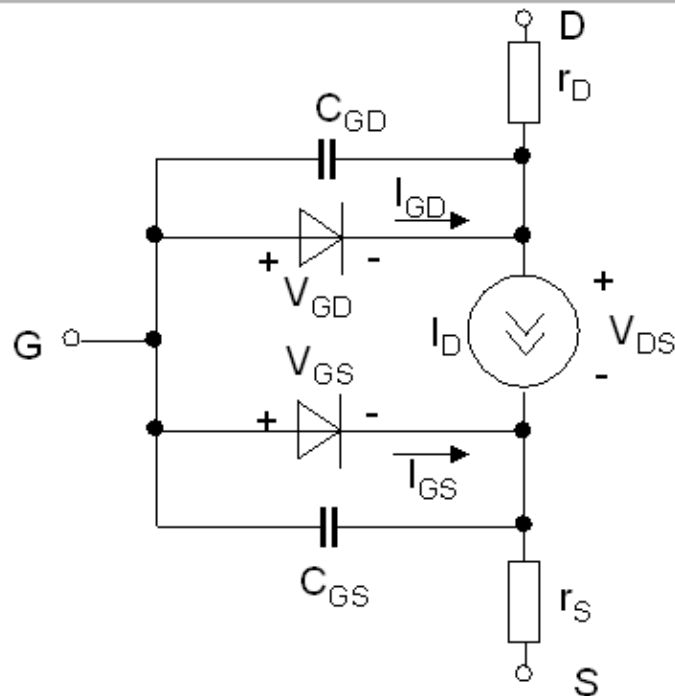


a. Normal mode. The normal mode operation is characterized in SPICE by the following relations (for $V_{DS} \geq 0$)

$$I_D = \begin{cases} 0 & \text{for } V_{GD} - V_{T0} \leq 0 \text{ (cutoff region)} \\ -A(V_{GD} - V_{T0})^2(1 + \mathcal{N}_{DS}) & \text{for } 0 < V_{GD} - V_{T0} \leq V_{DS} \text{ (saturated region)} \\ A\mathcal{N}_{DS}[2(V_{GD} - V_{T0}) - V_{DS}](1 + \mathcal{N}_{DS}) & \text{for } 0 < V_{DS} < V_{GD} - V_{T0} \text{ (linear region)} \end{cases}$$

b. Inverted mode. The inverted mode operation is characterized in SPICE by the following relations (for $V_{DS} < 0$):

$$I_D = \begin{cases} 0 & \text{for } V_{GD} - V_{T0} \leq 0 \text{ (cutoff region)} \\ -A(V_{GD} - V_{T0})^2(1 + \mathcal{N}_{DS}) & \text{for } 0 < V_{GD} - V_{T0} \leq V_{DS} \text{ (saturated region)} \\ A\mathcal{N}_{DS}[2(V_{GD} - V_{T0}) - V_{DS}](1 + \mathcal{N}_{DS}) & \text{for } 0 < V_{DS} < V_{GD} - V_{T0} \text{ (linear region)} \end{cases}$$



The ohmic resistance are modeled by the two linear resistors r_S and r_D .

The two diodes in static model are modeled by the following equations:

$$I_{GD} = \begin{cases} -I_S + V_{GD} G_{MIN} & \text{for } V_{GD} \leq -5 \frac{kT}{q} \\ I_S (e^{qV_{GD}/kT} - 1) - V_{GD} G_{MIN} & \text{for } V_{GD} > -5 \frac{kT}{q} \end{cases}$$

$$I_{GS} = \begin{cases} I_S (e^{qV_{GS}/kT} - 1) + V_{GS} G_{MIN} & \text{for } V_{GS} > -5 \frac{kT}{q} \\ -I_S + V_{GS} G_{MIN} & \text{for } V_{GS} \leq -5 \frac{kT}{q} \end{cases}$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

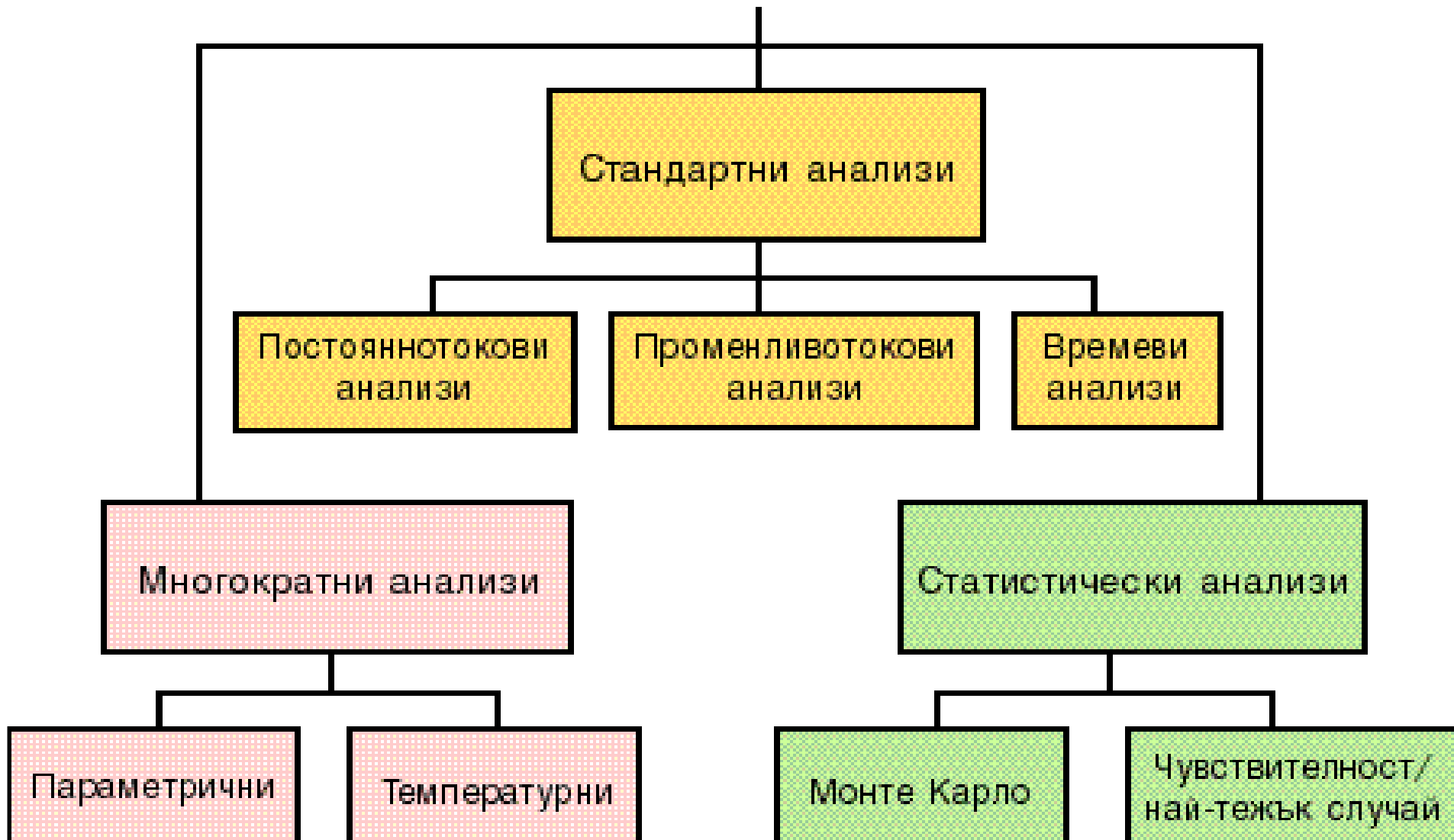
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

PSpice анализи



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Стандартни анализи в Pspice: DC

ПОСТОЯННОТОКОВИ АНАЛИЗИ

DC sweep (развивка)

- ▶ Изчисляват се напреженията, токовете и логическите състояния (при цифровите устройства) в схемата при поредица от стойности на източник на ток или на напрежение, на моделен параметър или температура.

Bias point detail (Подробна информация за работната точка)

- ▶ Изчислява се и се извежда подробна информация за постояннотоковата работна точка и режимите на функциониране на елементите в схемата: възловите потенциали, токовете през източниците на напрежение, пълната разсейвана мощност, токовете и/или напреженията в зависимите източници, работния режим и малосигналните параметри на транзисторите и др.
Работната точка се изчислява автоматично от PSpice A/D, независимо дали е избран този режим или не.

DC sensitivity (Чувствителност в постояннотоковата област)

- ▶ Изчислява се постояннотоковата чувствителност на зададени изходни променливи (потенциали, напрежения или токове) в схемата по отношение на параметрите на всички схемни елементи.

Small-signal DC transfer (Малосигнална предавателна функция)

- ▶ Схемата се линеаризира за установената работна точка и се изчисляват някои външни малосигнални (четириполюсни) характеристики като предавателна функция (отношение на изходна към входна електрическа величина), входното и изходното съпротивление на схемата.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

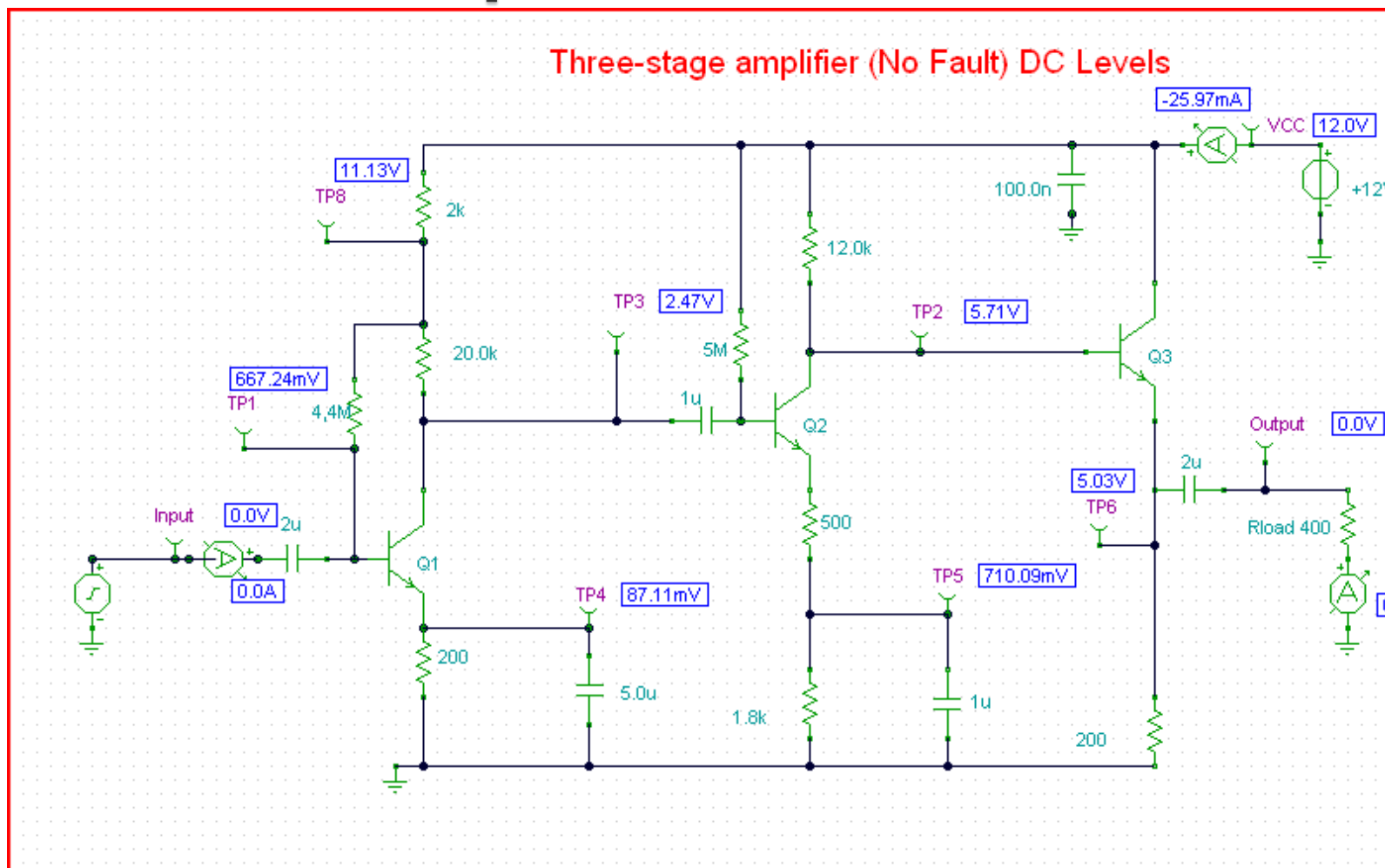
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

PSPice DC: работна точка



ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Времеви анализи в PSpice

Transient response

- ▶ При преходния (времеви) анализ поведението на вашата схема се симулира във времето при изменение на един или няколко входни източници, или се определят осцилациите във вашата схема, ако тя е проектирана като генератор на променливи сигнали.
 - В първия случай се определя реакцията на схемата при входни въздействия с променливи във времето стойности (синусоидални, импусни....), т.е. изчисляват се напреженията, токовете и логическите състояния в схемата като функции на времето.
 - Във втория случай, само включването на постояннотокото захранване е достатъчно, за да предизвика самовъзбуждането на генераторната схема и тогава *PSpice* изчислява и визуализира формата на променливите сигнали в схемата.

Fourier components (Хармоничен (Фурие) анализ)

- Хармоничният анализ може да бъде изпълнен заедно с преходния анализ. Изчисляват се постояннотокотова съставка и хармоничните съставки (компонентите на Фурие) по амплитуда и фаза чрез разлагане на резултатите от преходния анализ.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

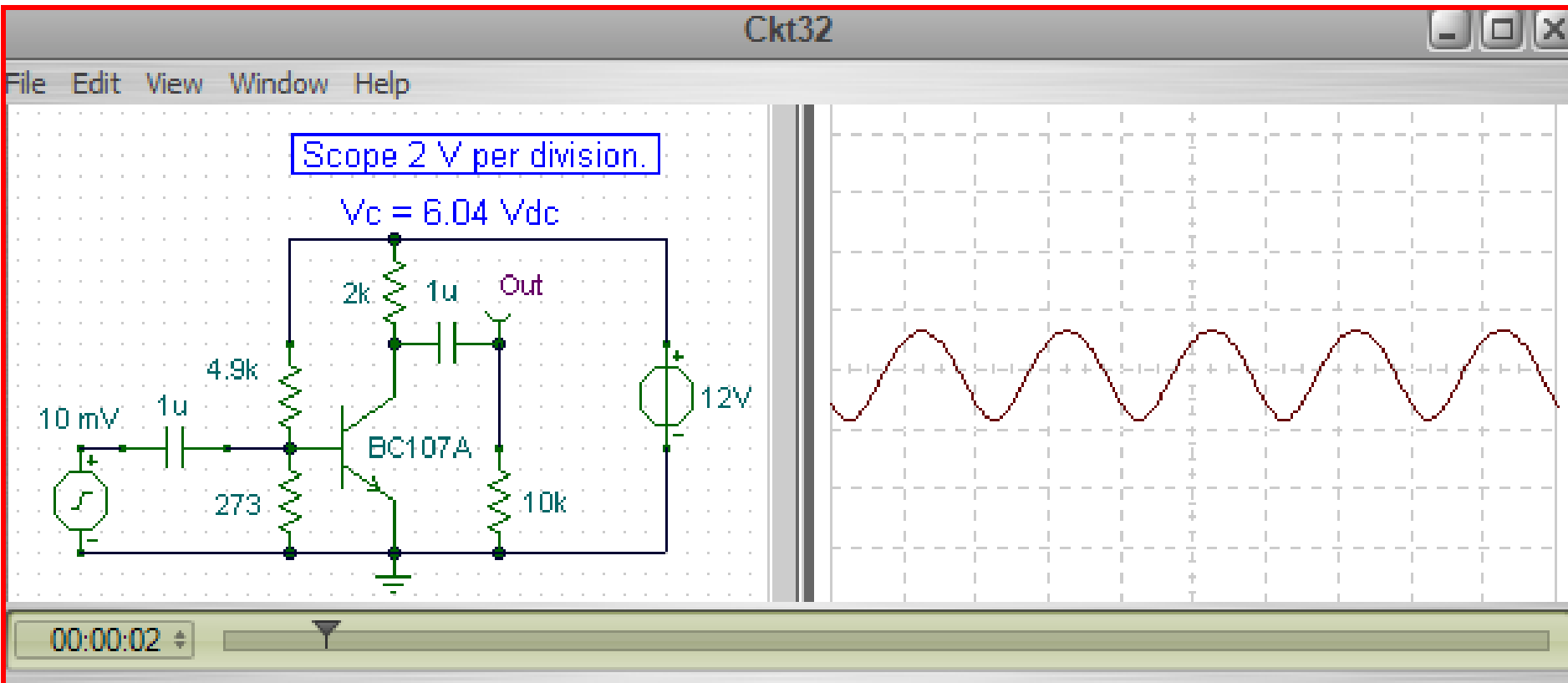
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

PSpice времеви анализи



Входното напрежение е 10mV или 20mV от връх до връх, а на изхода е 3 V от пик до пик (3000 mV от пик до пик). По този начин, усилването по напрежение е $3000/20 = 150$. В изхода синусовата вълна няма да бъде изкривена.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

PSpice времеви анализи

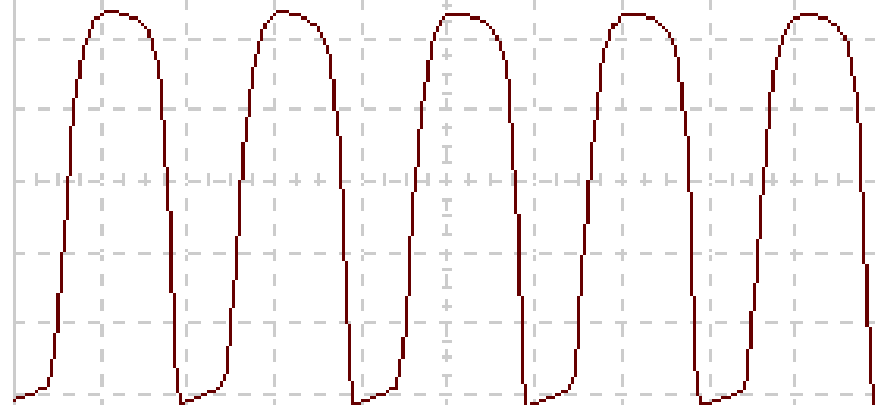
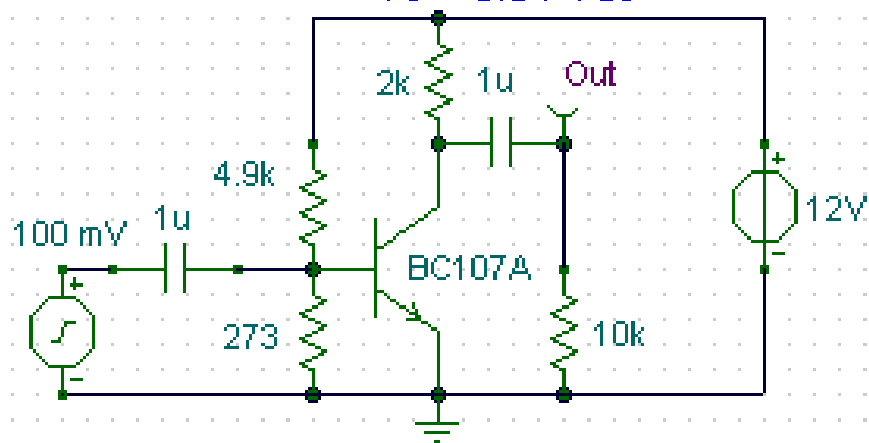
Ckt32



File Edit View Window Help

Scope 2 V per division.

$V_c = 6.04 \text{ Vdc}$



00:00:17

Тъй като амплитудата на входното синусоидално напрежение се увеличава, реакцията в изхода започва да показва признаци на изкривяване. (11V пик до пик е много близо до 12V захранване (V_{cc}); транзисторът се движи в режими на насищане и отсечка.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Линейност и нелинейност

- При анализ на електронни компоненти/схеми при въздействието на **синусиодаден сигнал с малка амплитуда**, който не променя работната точка по постоянен ток, се извършва линеаризиране на компонента/схемата в установения режим и се изследва въздействието на честотата
- Тогава електронният компонент/схема се разглежда като линеен и за целите на анализа се прилага теорията на линейните схеми



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Линейност и нелинейност

- ▶ Линейните схеми се описват със **системи линейни алгебрични или диференциални уравнения с постоянни коефициенти**
- ▶ **Матричните методи** за линеен анализ на електронни схеми са част от алгебричните методи, които използват теорията на матриците (съчетани с някои топологични понятия) за съставяне на схемните уравнения и за тяхното решаване



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Честотен анализ в Pspice: AC

AC sweep (Frequency response)

- ▶ Схемата се линеаризира за установената работна точка и се определя нейната реакция при комбинация от входни въздействия в честотна област. Задава се изменението на един или повече входни източника в определен честотен обхват. Изчислява се променливотоковият релеф на схемата, т.е. изчисляват се токовете и напреженията в схемата с тяхната амплитуда и фаза. Анализът може да бъде използван за получаване на диаграмите на Боде – амплитудно-честотните и фазово-честотните характеристики на схемите.

Noise analysis (Анализ на шум)

- ▶ Анализът на шума се извършва заедно с честотния анализ, тъй като различните видове шум предизвикани от елементите в схемата зависят от постояннотоковата работна точка и/или от честотата. Шумовият анализ позволява да се измери шумовият принос на резисторите и полупроводниковите елементи в схемата чрез построяване на спектралната плътност на шума. Кондензаторите, дроселите и зависимите източници се третират като безшумни. Pspice анализира шума чрез изчисляване на приноса на всеки елемент и комбиниране на шумовите източници с различните предавателни функции в схемата, т.е. за всяка честота се изчислява разпространеният към изходните възли шум, който се привежда еквивалентно и към входните възли.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

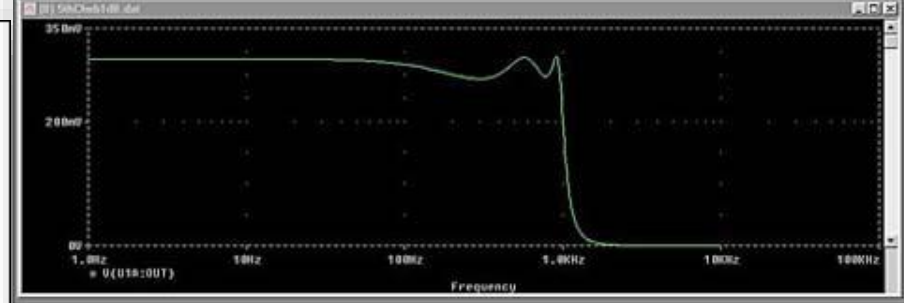
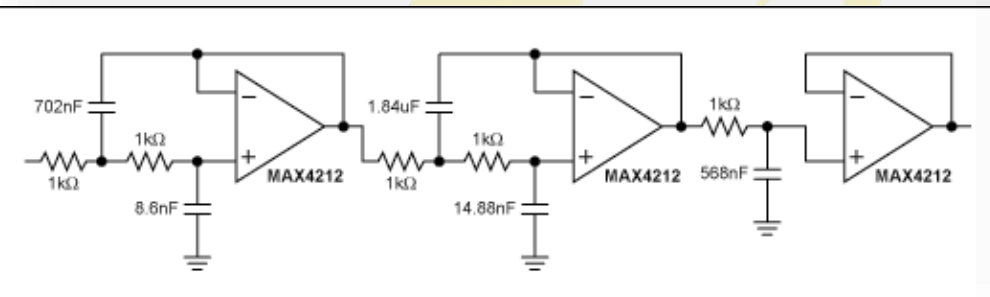
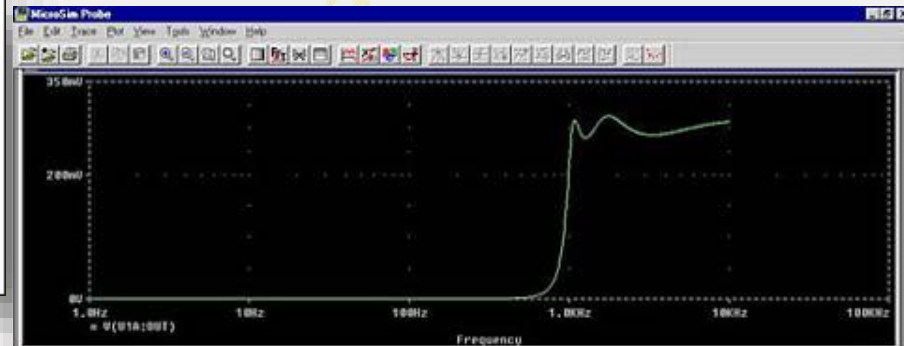
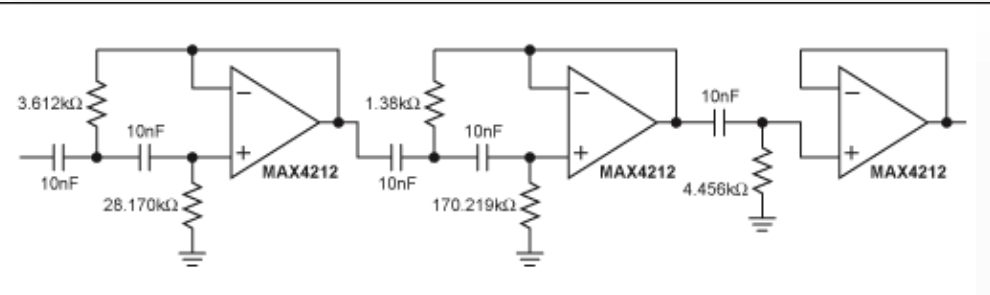
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Честотен анализ в Pspice: AC



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Честотен анализ в Pspice: AC

Tone control circuit

An audio circuit collection,
Part 1, By Bruce Carter

<http://www.scribd.com/doc/19257211/OpAmp-Audio-Circuit-Collection-Bruce-Carter-Texas>

Texas Instruments
Incorporated Amplifiers: Op
Amps
Analog Applications Journal
November 2000 Analog and
Mixed-Signal Products

Figure 8. Tone control circuit

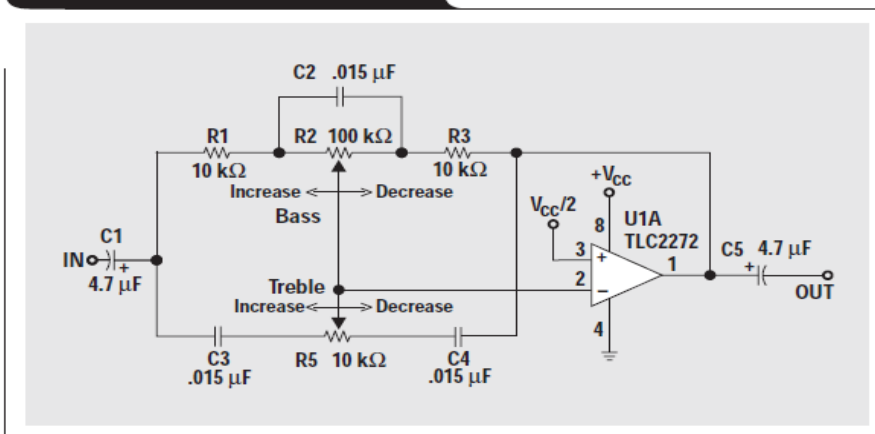
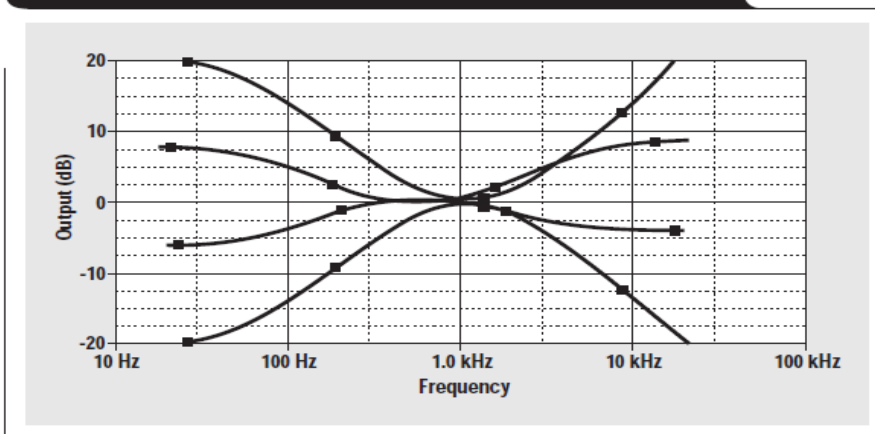


Figure 9. Circuit response with pots at the extremes



Европейски съюз

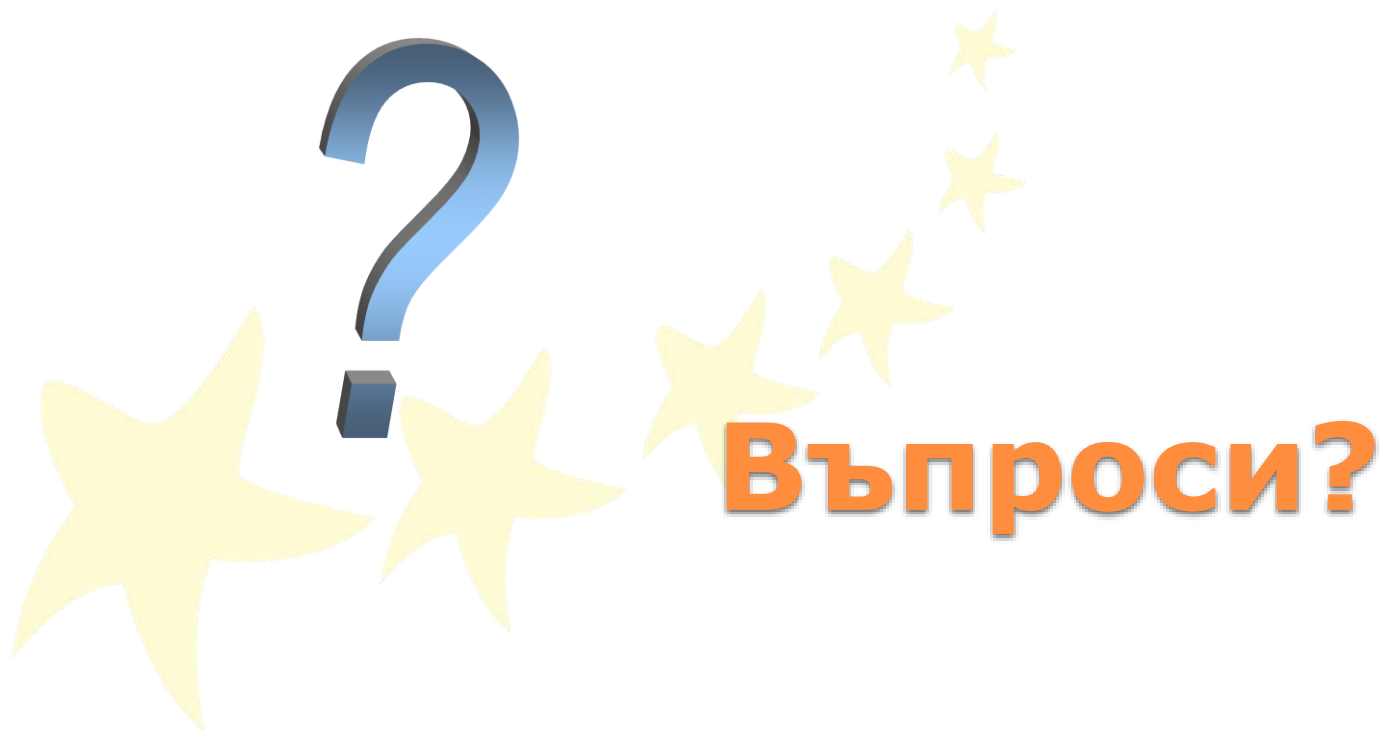
ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през
целия живот и развитие на компетенции”*

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд



ttodorov@tu-sofia.bg



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

***„Организационна и технологична инфраструктура за учене през
целия живот и развитие на компетенции”***

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд