

Теория на електронните схеми

Основни понятия и определения : линейни модели на електронни елементи

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
- Компоненти на понятието модел
- Класификация на моделите
- Линейни модели на биполярен транзистор
- Линейни модели на униполярен транзистор
- Макромодели на ОУ



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!



Образователни цели

След изучаването на този раздел вие ще трябва да можете:

- Да обяснявате линейните модели на електронни елементи и схеми
- Да познавате и практически да прилагате линейните модели на електронни елементи и схеми



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

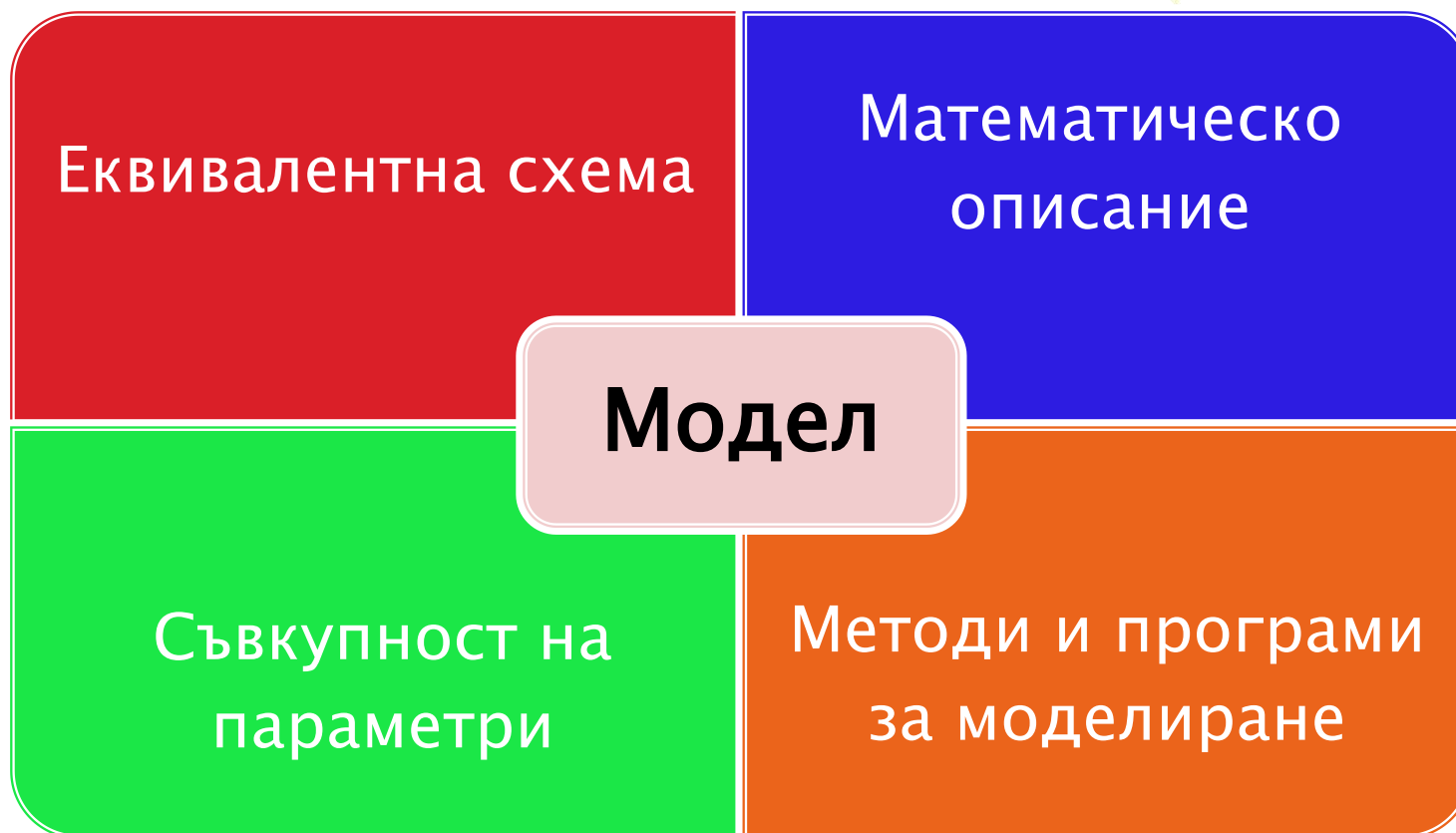
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

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!



Европейски социален фонд

Компоненти на понятието модел



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

Класификация на моделите

Моделиране на отделен елемент или множество свързани елементи

Модели (BJT, JFET, MOST)

Макромодели
(операционен усилвател)

Подход за моделиране

Формални модели

Номинални модели

Физически модели

Статистически модели

Област на приложение: големина и честота на сигнала

Модели за голям сигнал

Линейни модели (малък сигнал)

Постоянно-токови модели

Ниско-честотни линейни модели

Високо-честотни линейни модели

Шумови линейни модели

Критерии



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

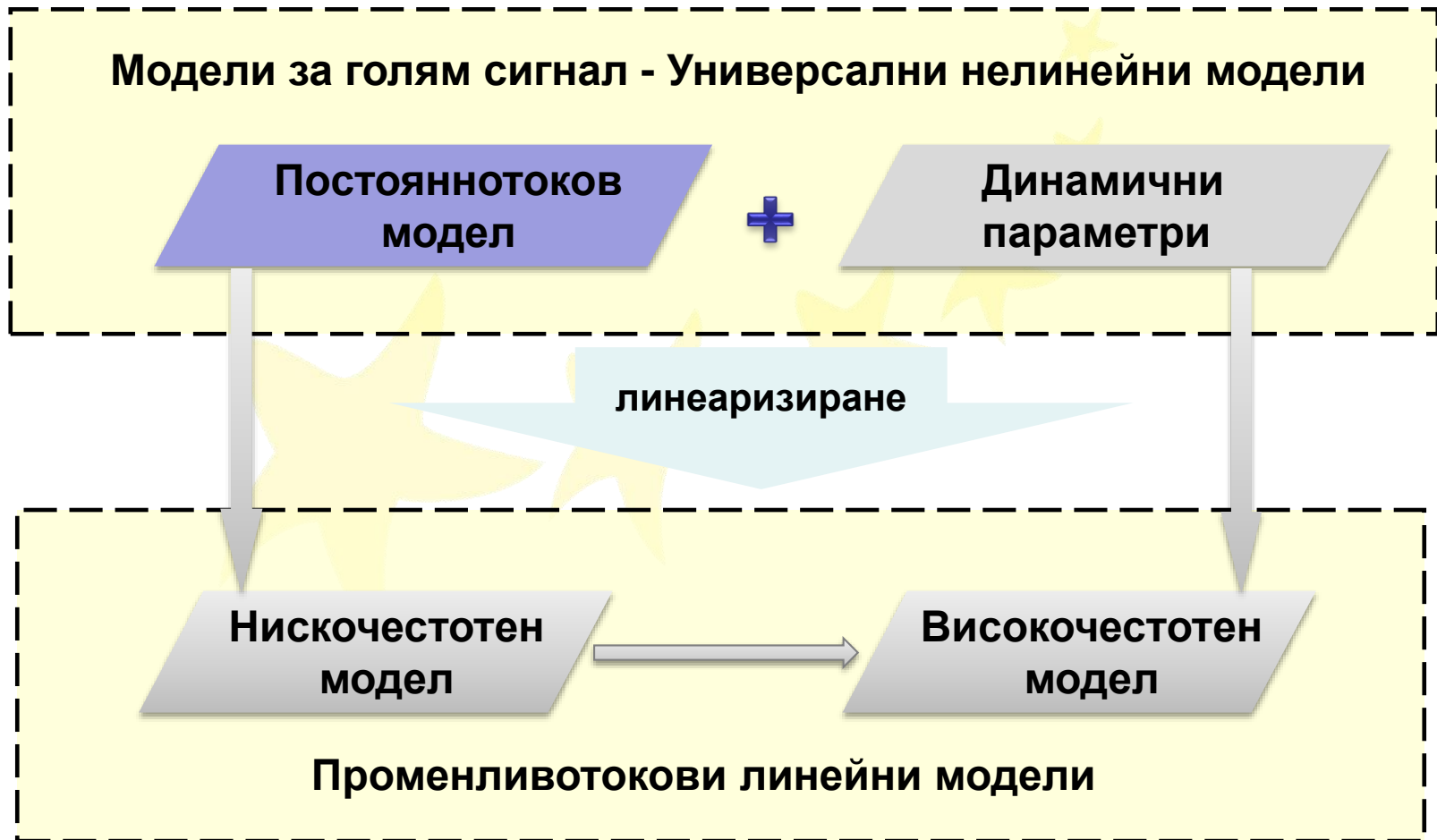
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

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

Връзка между моделите



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

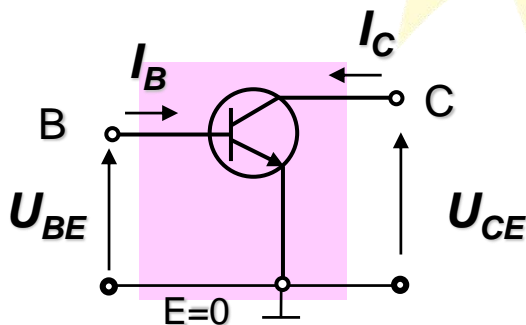
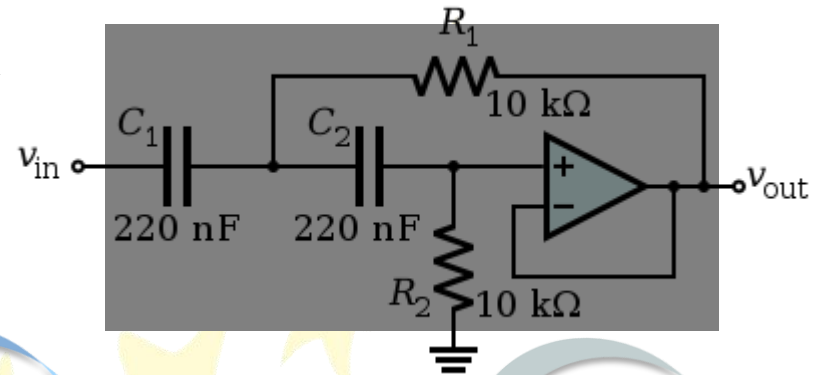
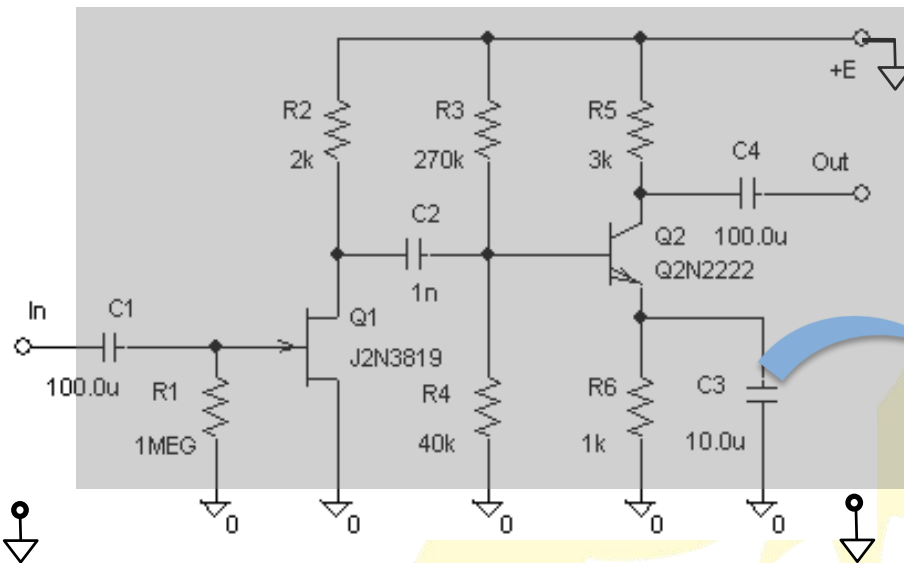
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

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!

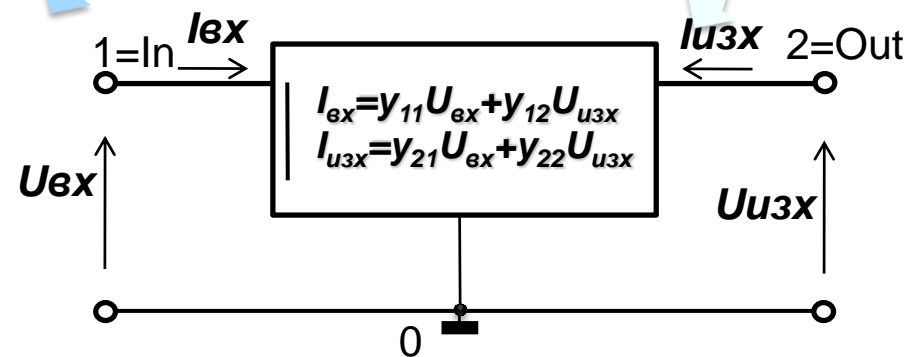


Европейски социален фонд

Линейни модели на електронни елементи и схеми



$$\begin{cases} I_B = y_{11e} U_{BE} + y_{12e} U_{CE} \\ I_C = y_{21e} U_{BE} + y_{22e} U_{CE} \end{cases}$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

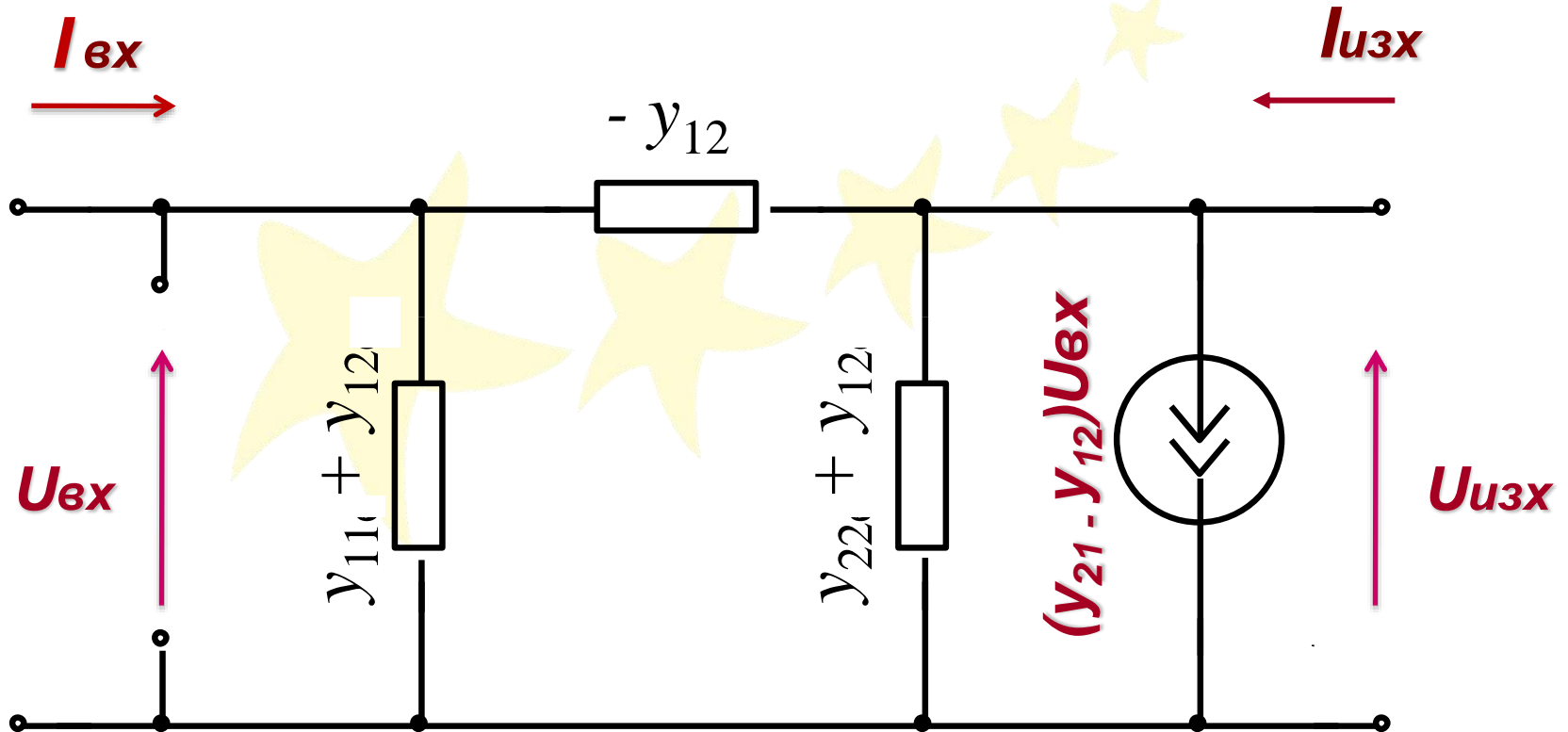
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Линейни модели на електронни елементи и схеми

- П-образен четириполюсен модел



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

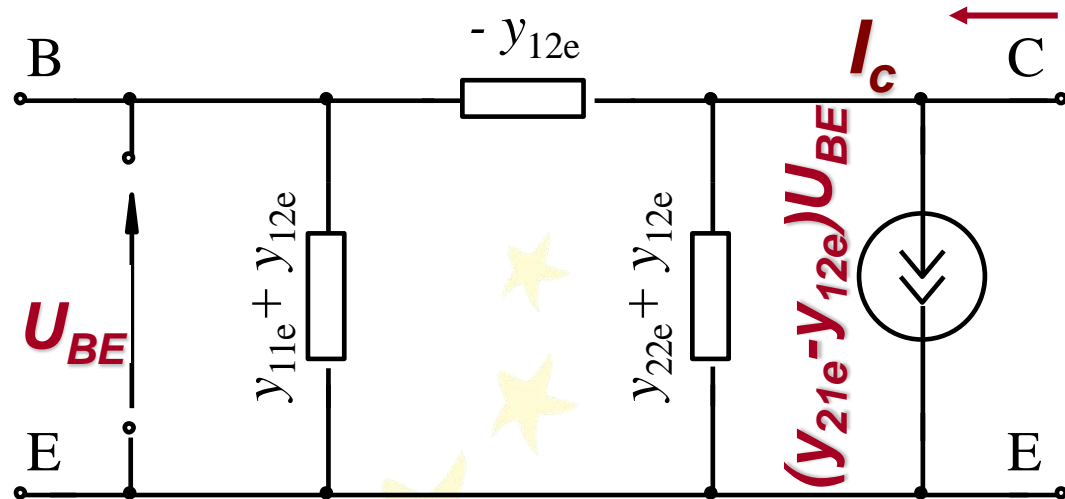
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

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

П-образен четириполюсен модел



Основни характеристики:

- П-образна конфигурация без допълнителен вътрешен възел
- Активността на транзистора се изразява чрез включването на един ЗИТУН, тип yU
- Елементите на модела се изчисляват пряко от четириполюсните y -параметри, които зависят от постояннотоковия режим и честотата (реални или комплексни величини)
- В зависимост от това, как са определени четириполюсните y -параметри, моделът е валиден за даден постояннотоков режим и честота



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

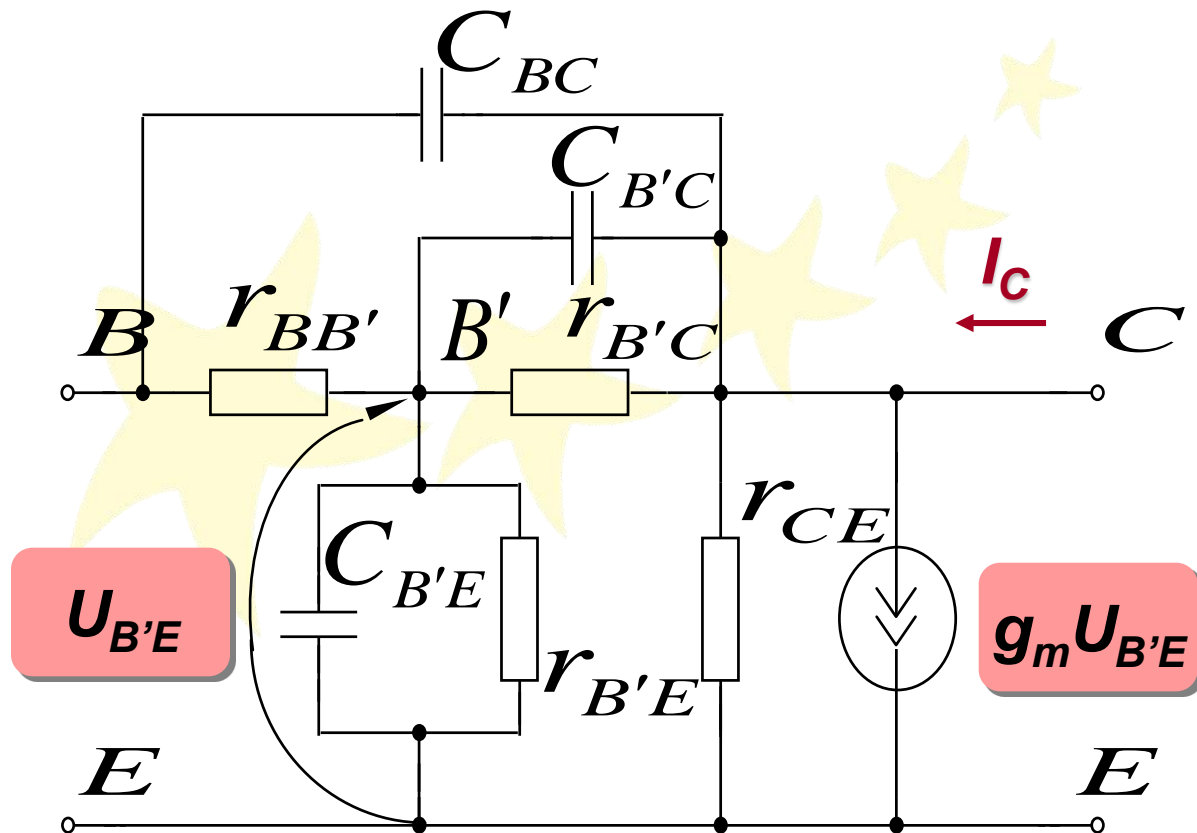
*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през
целия живот и развитие на компетенции”*

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!



Линейни модели на електронни елементи и схеми

- Модел на Джиаколето на биполярен транзистор



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

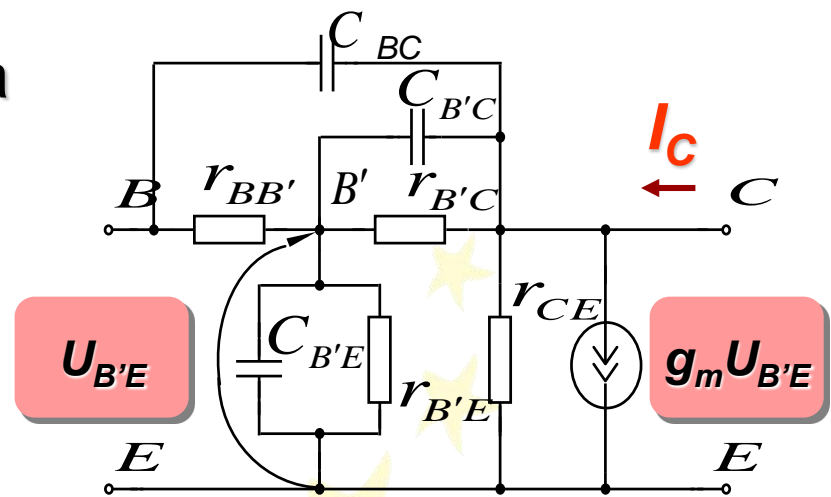
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Модел на Джиаколето на биполярен транзистор

- Параметри:**



$r_{bb'}$ - Обемно базово съпротивление

$r_{b'e}$ - Преобладаваща част на входното променливотоково съпр.

g_m - Стърмност на предавателната х-ка $I_C = f(U_{BE})$ на ЗИТУН

$r_{b'c}$ - Обратно преходно съпротивление

r_{ce} - Изходно променливотоково съпротивление в схема с ОЕ

$C_{b'e}$ - Дифузен капацитет на емитерния преход

$C_{b'c}$ - Бариерен капацитет на прехода колектор-база

C_{bc} - Паразитен монтажнен капацитет между базата и колектора



Европейски съюз

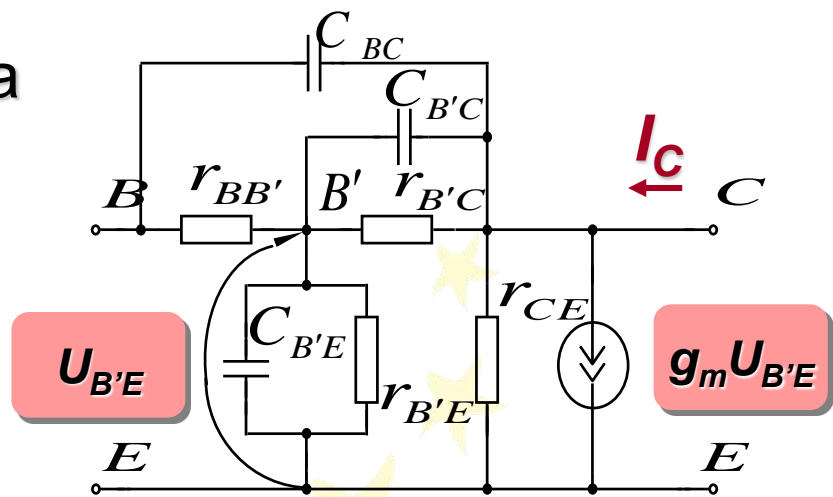
ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„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!



Модел на Джиаколето на биполярен транзистор



Основни характеристики:

- П-образна конфигурация, с един допълнителен вътрешен възел **B'**
- Активността на транзистора се изразява с един зависим източник на ток управляван от напрежение, тип **yU**
- Елементите му се изчисляват от каталожни данни (**h**- параметри, транзитната честота **f_t**)
 - Елементите зависят от постояннотоковия режим
 - Елементите не зависят от честотата
- Основните честотни свойства на транзистора се изразяват чрез зависимостта на колекторния ток от напрежението **U_{B'E}**
- Моделът е валиден в широка честотна област



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

Етапи за линеаризиране на модела на Gummel – Poon в PSpice

1

- Модел на Gummel - Poon за голям сигнал (Универсален модел)

2

- Линеаризиране на постояннотоковия модел (уравненията за I_B и I_C)

3

- Линеаризиране на капацитетите

4

- Синтез на малосигнален модел

5

- Преобразуване на модела в П-образна конфигурация



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

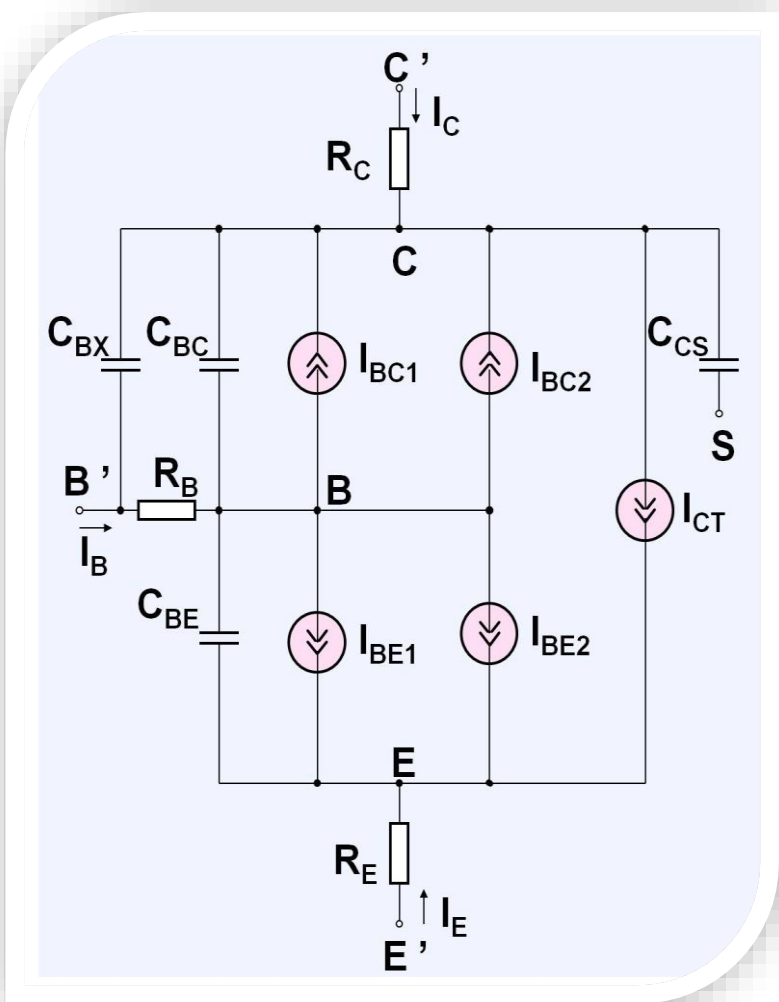
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

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

Модел на Gummel – Poon в PSpice



$$I_{BC1} = C_4 I_{SS} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{n_{CL} kT}} - 1 \right) \quad I_{BE1} = C_2 I_{SS} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{n_{EL} kT}} - 1 \right)$$

$$I_{BC2} = \frac{I_{SS}}{\beta_{Rm} q_B} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{kT}} - 1 \right) \quad I_{BE2} = \frac{I_{SS}}{\beta_{Fm} q_B} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{kT}} - 1 \right)$$

$$I_{CT} = \frac{I_{SS}}{q_B} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{kT}} - e^{\frac{qV_{BC}}{kT}} \right)$$

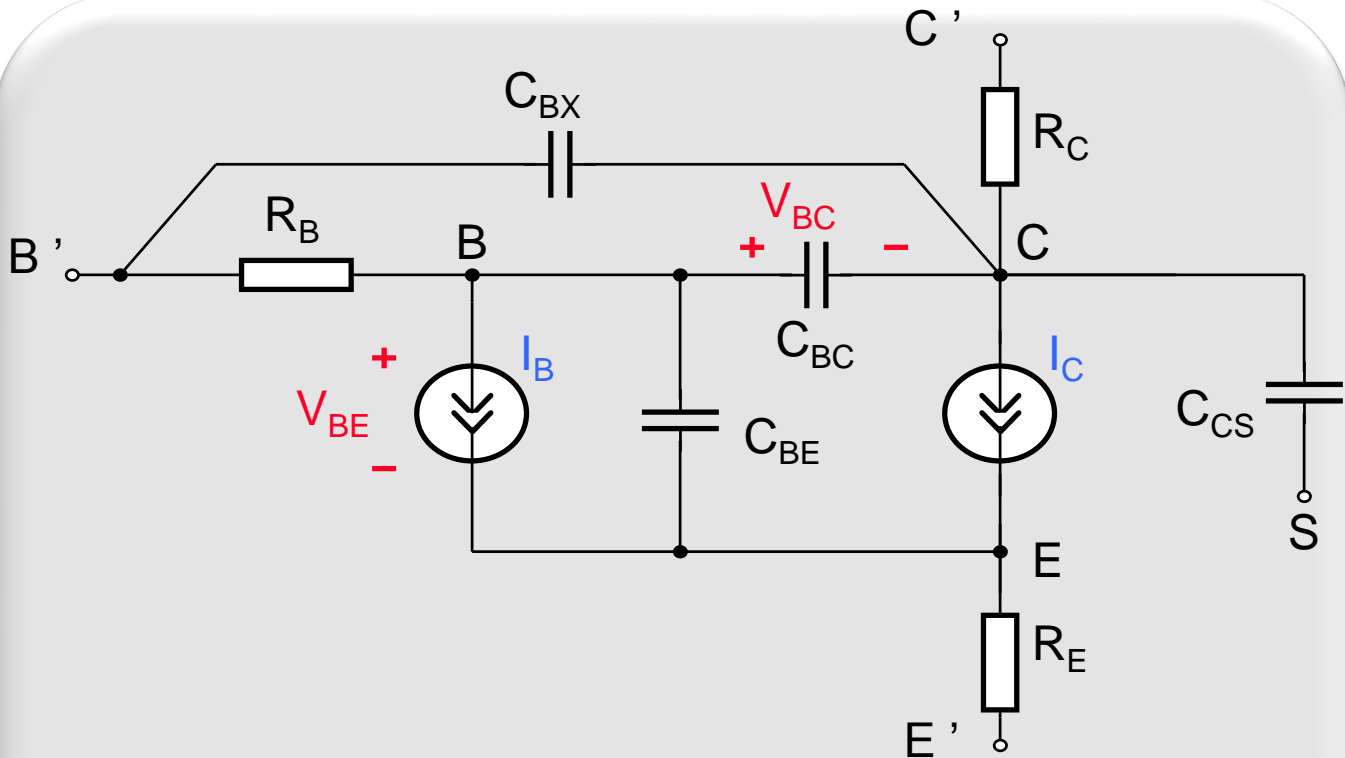
$$C_{BE} = \frac{dQ_{BE}}{dV_{BE}} = \begin{cases} \tau_F \frac{dI_{CC}}{dV_{BE}} + C_{JE}(0) \left(1 - \frac{V_{BE}}{\Phi_E} \right)^{-m^E} & V_{BE} < FC \cdot \Phi_E \\ \tau_F \frac{dI_{CC}}{dV_{BE}} + \frac{C_{JE}(0)}{F_2} \left(F_3 + \frac{m_E V_{BE}}{\Phi_E} \right) & V_{BE} \geq FC \cdot \Phi_E \end{cases}$$



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!



Модел на Gummel – Poon в PSpice



$$I_B = I_{BC1} + I_{BC2} + I_{BE1} + I_{BE2}$$

$$I_C = I_{CT} - I_{BC1} - I_{BC2}$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

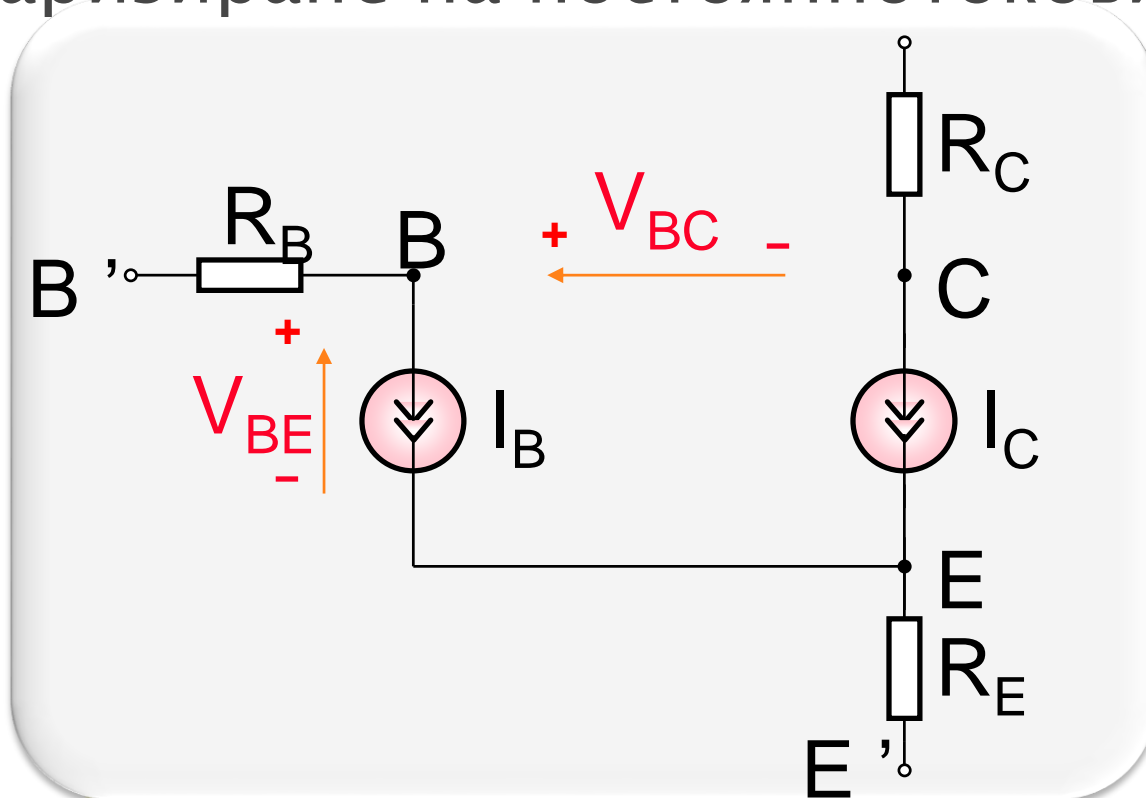
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

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

Линеаризиране на постояннотоковия модел



$$dI_B = \frac{\partial I_B}{\partial V_{BE}} dV_{BE} + \frac{\partial I_B}{\partial V_{BC}} dV_{BC}$$

$$i_B = g'_{BE} u_{BE} + g''_{BE} u_{BC}$$

$$dI_C = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} dV_{BE} + \frac{\partial I_C}{\partial V_{BC}} dV_{BC}$$

$$i_C = g'_{CE} u_{BE} + g''_{CE} u_{BC}$$



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!

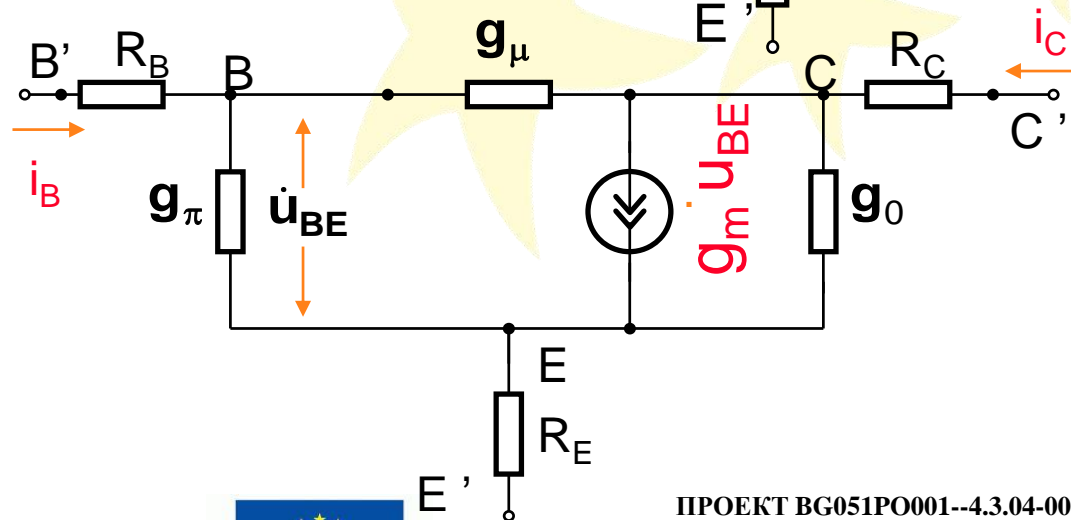
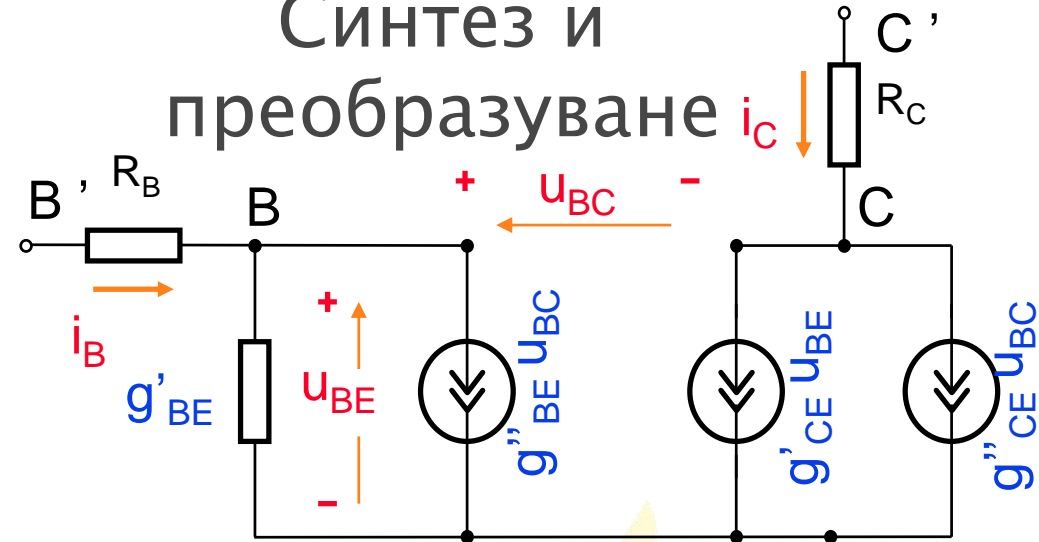


Европейски социален фонд

Синтез и преобразуване

$$i_B = g'_{BE} u_{BE} + g''_{BE} u_{BC}$$

$$i_C = g'_{CE} u_{BE} + g''_{CE} u_{BC}$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

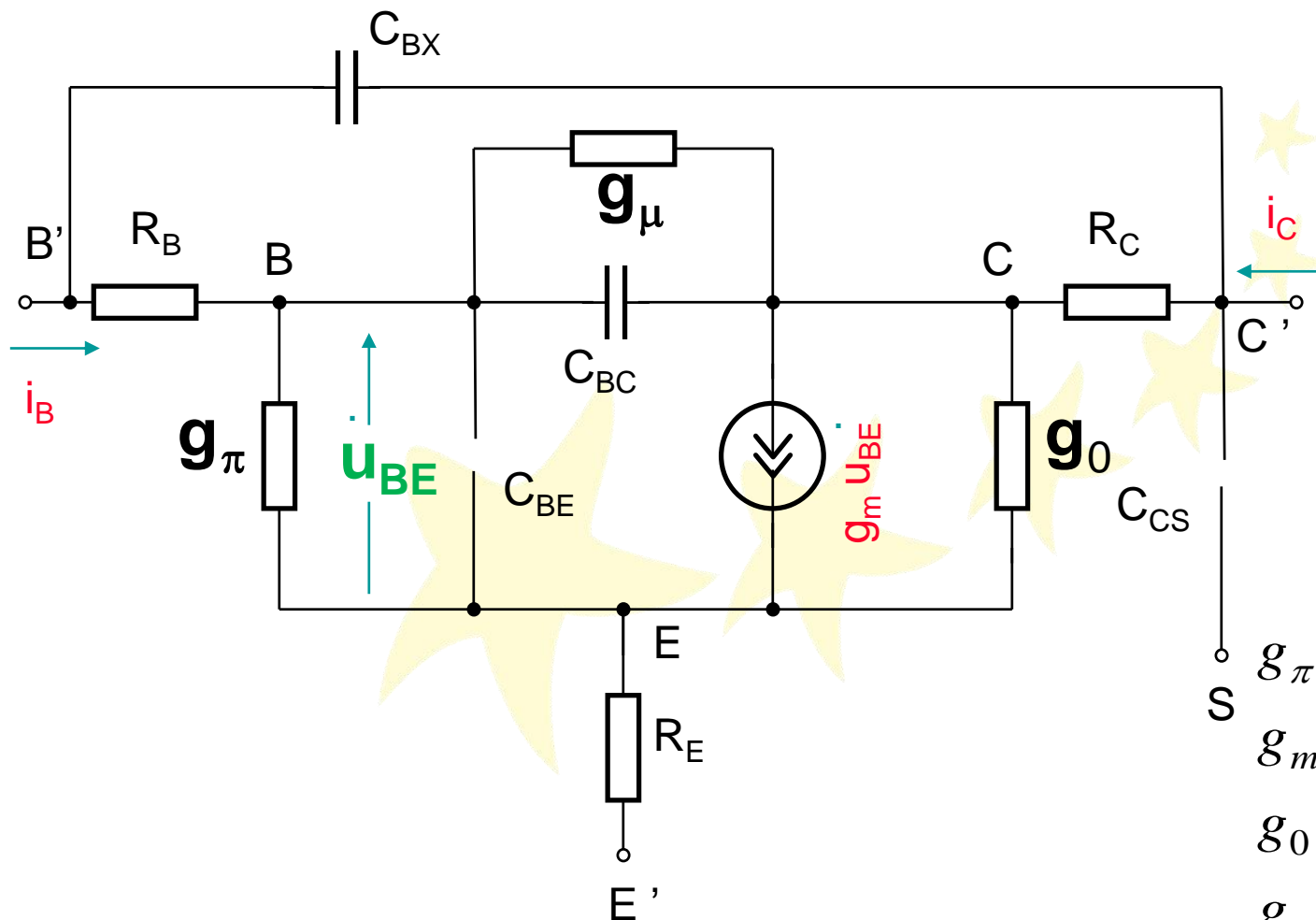
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

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

Синтез и преобразуване



$$g_\pi = g'_{BE}$$

$$g_m = g'_{CE} + g''_{BE} + g''_{CE}$$

$$g_0 = g''_{BE} + g''_{CE}$$

$$g_\mu = g''_{BE}$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

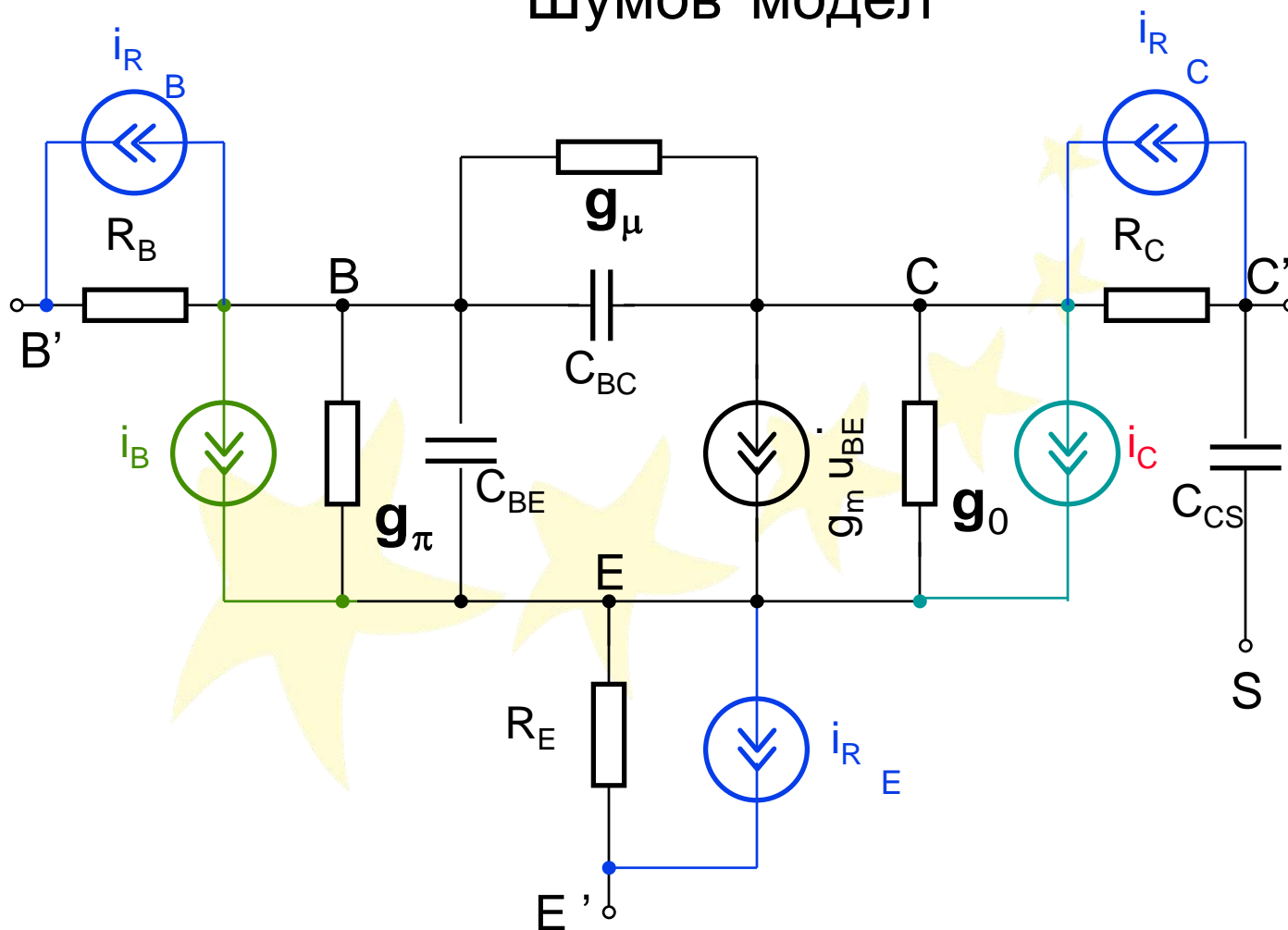
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

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

Шумов модел



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

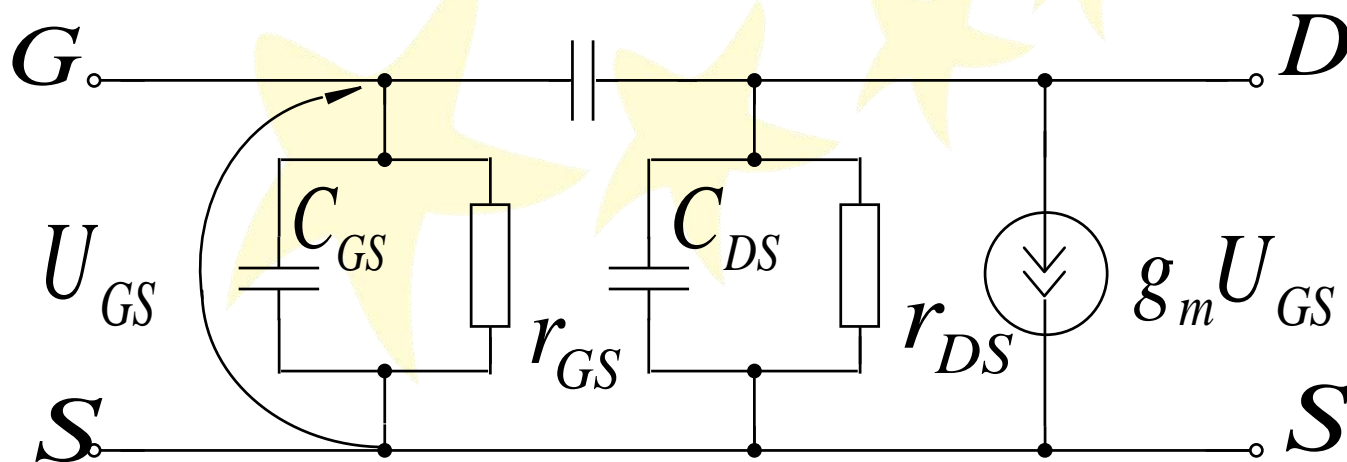
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Линейни модели на електронни елементи и схеми

- ▶ П – образен високочестотен модел на полеви транзистор



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

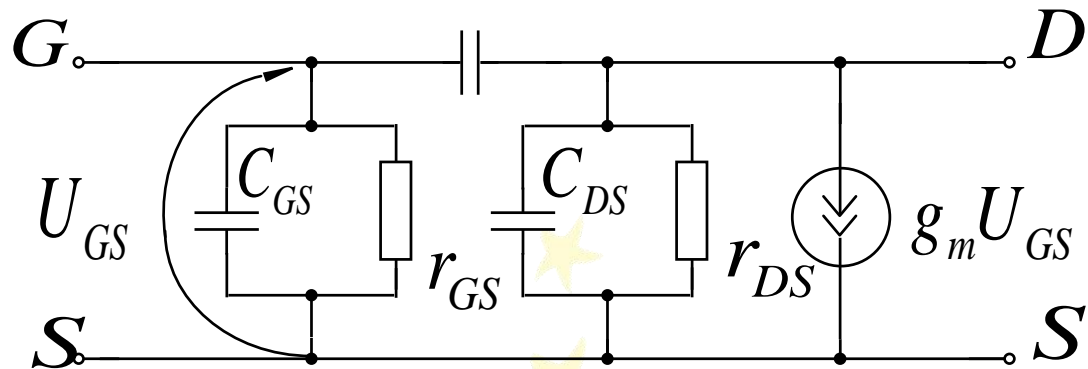
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

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

П – образен
висококачествен модел
на полеви транзистор



• Параметри:

g_m	стръмност на транзистора
r_{DS}	изходно съпротивление за променлив ток
r_{GS}	входно съпротивление за променлив ток
C_{GS}	входен капацитет
C_{GD}	преходен капацитет (капацитет напрехода G-D)
C_{DS}	изходен капацитет

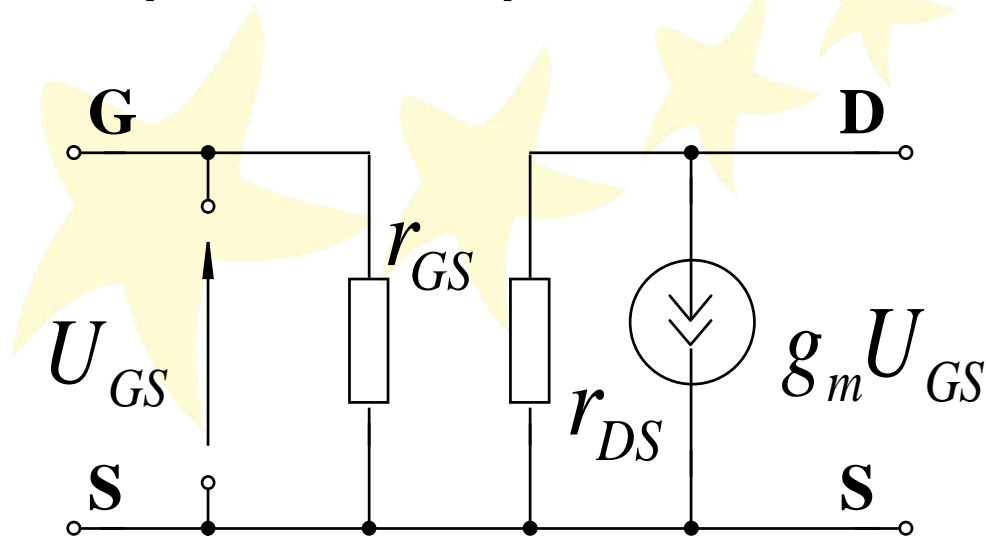


ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042
 „Организационна и технологична инфраструктура за учене през
 целия живот и развитие на компетенции”
 Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
 Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
 съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Линейни модели на електронни елементи и схеми

- П – образен нискочестотен модел на полеви транзистор



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!

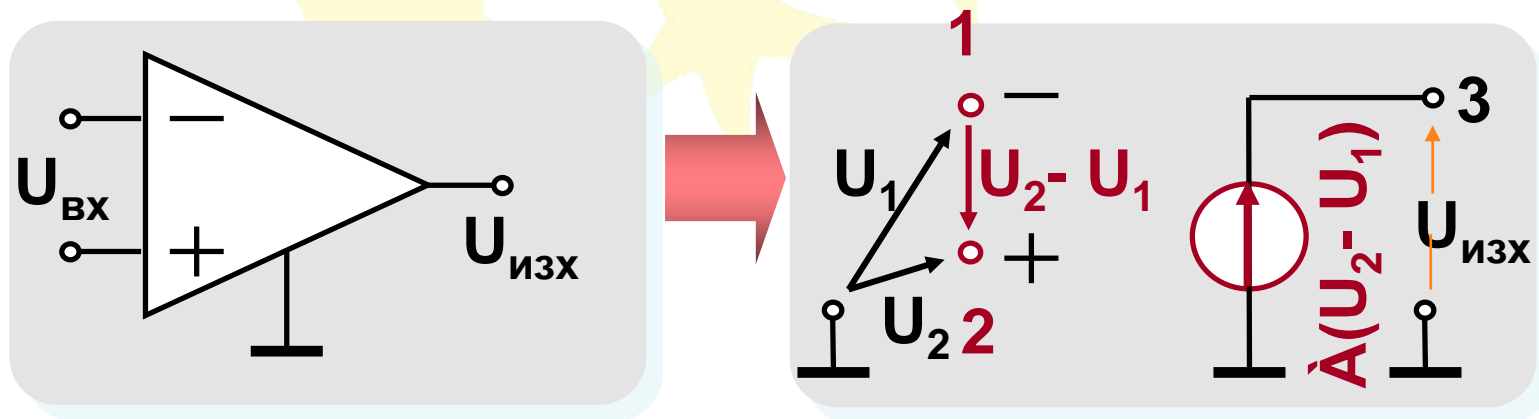


Европейски социален фонд

Идеален модел на ОУ

- ▶ Коефициент на усилване по напрежение без обратна връзка: $A_0 \Rightarrow \infty$
- ▶ Входно съпротивление: $R_i \Rightarrow \infty \Omega$
- ▶ Изходно съпротивление: $R_o \Rightarrow 0 \Omega$

$$A = \frac{A_0}{1 + jf / f_p}$$



$$U_{ИЗХ} = A (U_2 - U_1)$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

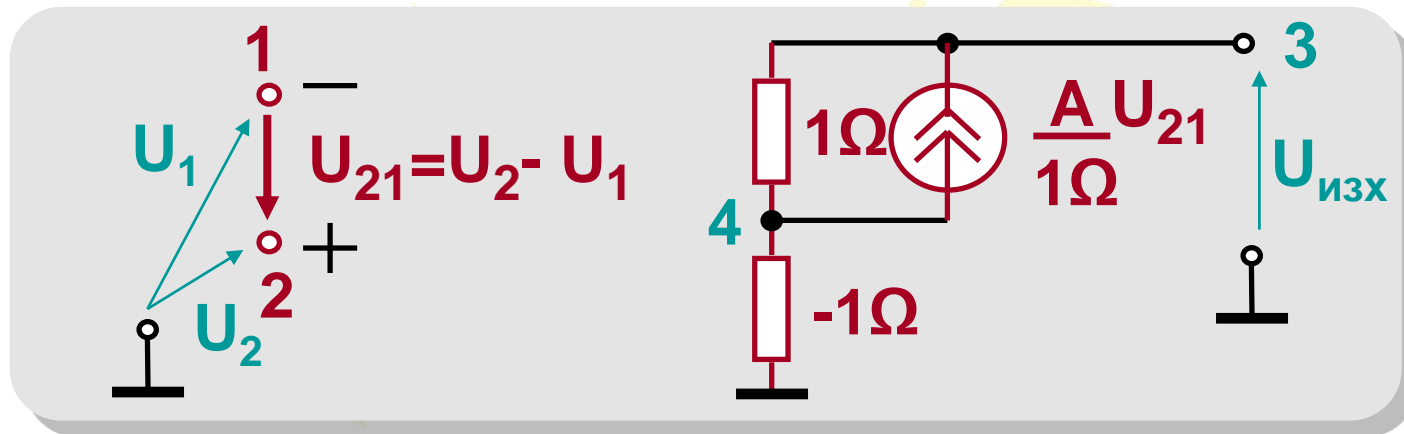
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Линейни модели на електронни елементи и схеми

- Идеален макромодел на операционен усилвател



$$U_{\text{изх}} = \frac{A}{1\Omega} U_{21}$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

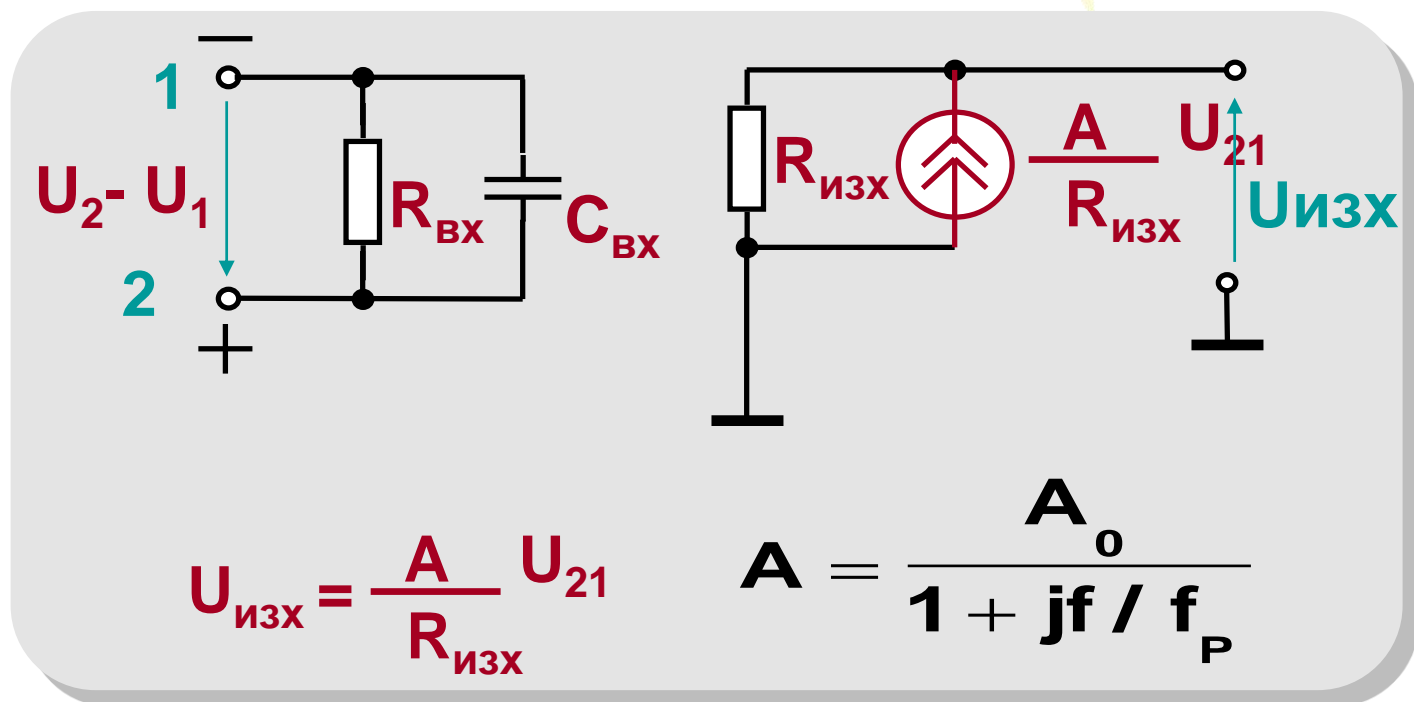
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Линейни модели на електронни елементи и схеми

- Реален макромодел на операционен усилвател



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

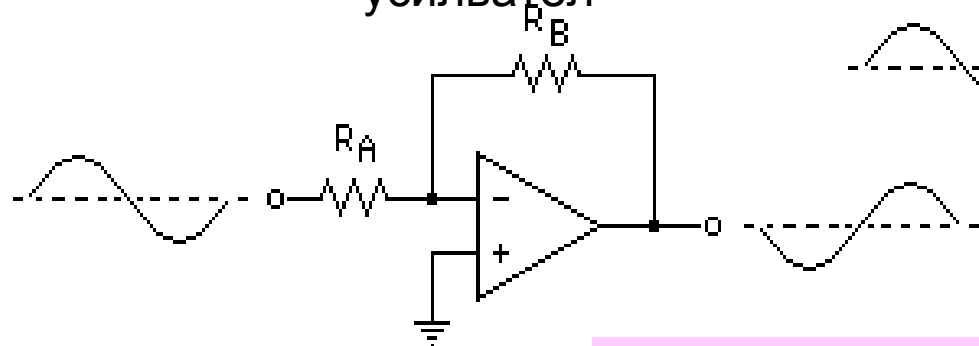
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

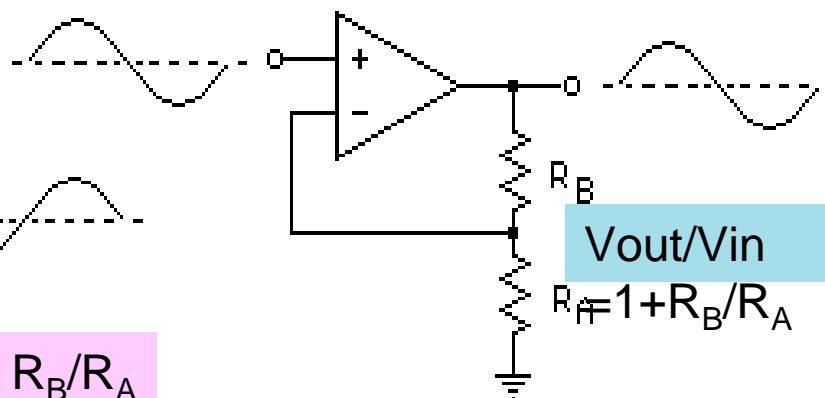
Основни усилвателни схеми с ОУ

Инвертиращ
усилвател



$$V_{out}/V_{in} = R_B/R_A$$

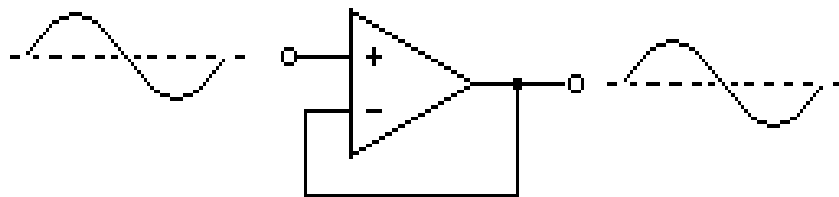
Неинвертиращ усилвател



$$V_{out}/V_{in}$$

$$R_{if} = 1 + R_B/R_A$$

Повторител



$$V_{out}/V_{in} = 1$$



Европейски съюз

„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!



Заключение:

- В основата на съвременната теория на електронните схеми е математическото моделиране на активните елементи
- В повечето практически случаи се оказва, че приложимостта и ефективността на методите и средствата за симулации на електронни схеми в значителна степен зависи от адекватността на използваните модели



Европейски съюз

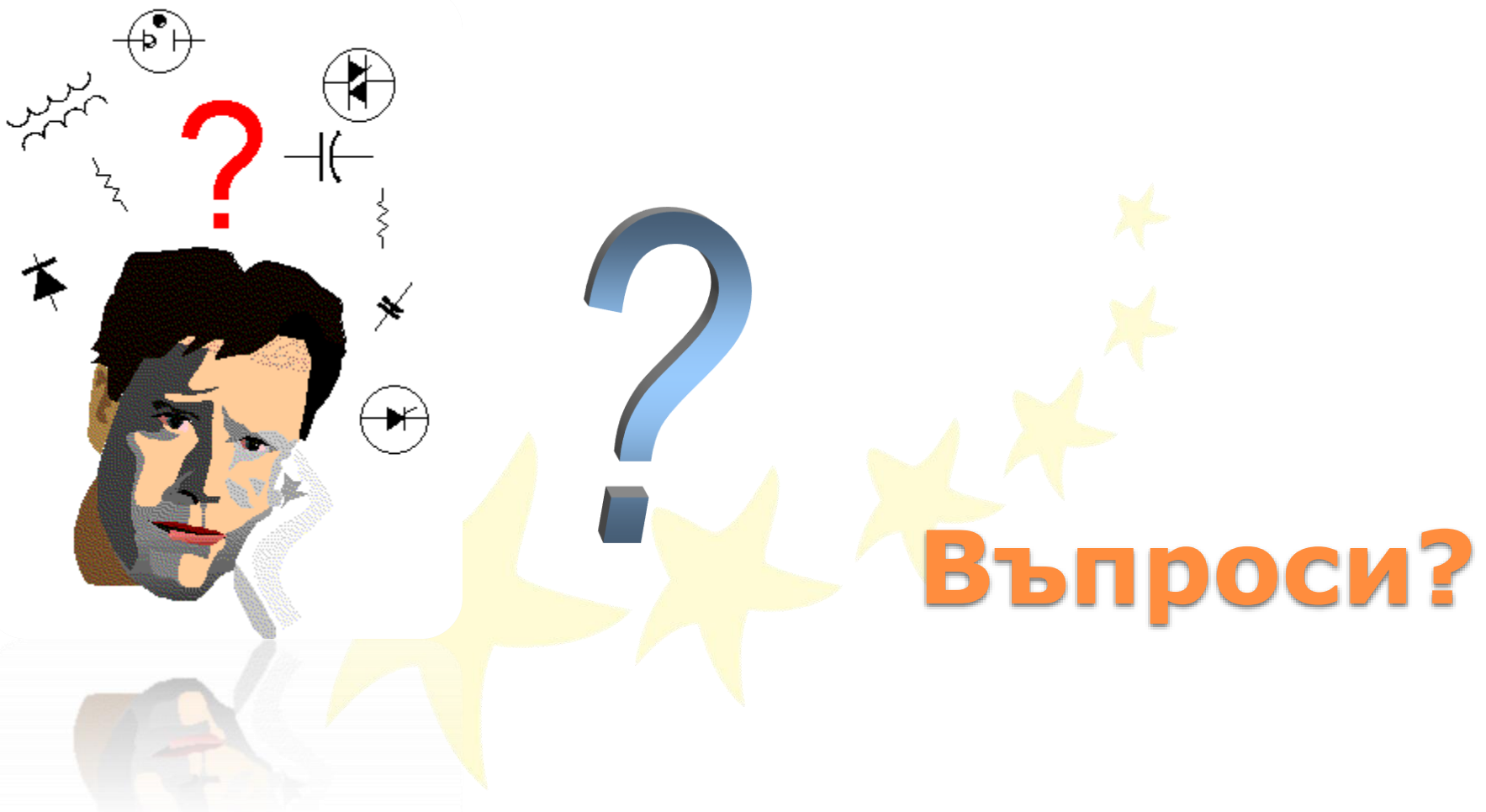
ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„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!

