

 **Технически университет – София**

**Факултет по електронна техника и технологии**

 **Катедра „Електронна техника”**

**Презентация № 4**

**Анализ на усилвателните стъпала при ниски и  
високи честоти**

**дисциплина „Аналогова схемотехника” – ВЕ30  
ОКС „Бакалавър” от Учебен план за студентите на специалност  
Електроника, Професионално направление  
5.2. Електротехника, електроника и автоматика**

**доц. д-р инж. Ивайло М. Пандиев**



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

- Обобщена еквивалентна схема на електронен усилвател. Влияние на източника на сигнал и товара
  - Обобщена схема на електронен усилвател
  - Еквивалентна електрическа схема на електронен усилвател
- Анализ на усилвателните стъпала при ниски честоти
  - Обобщена схема на електронен усилвател за ниски честоти
  - Предавателни функции за входната и за изходната верига при ниски честоти
  - Обща комплексна предавателна функция за ниски честоти
- Анализ на усилвателните стъпала при високи честоти
  - Теорема на Милер
    - Обобщена схема на електронен усилвател за високи честоти
  - Предавателни функции за входната и за изходната верига при високи честоти
  - Обща комплексна предавателна функция за високи честоти
- Анализ на усилвателни стъпала при усилване на импулсни сигнали
- Литература



Европейски съюз

**ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042**

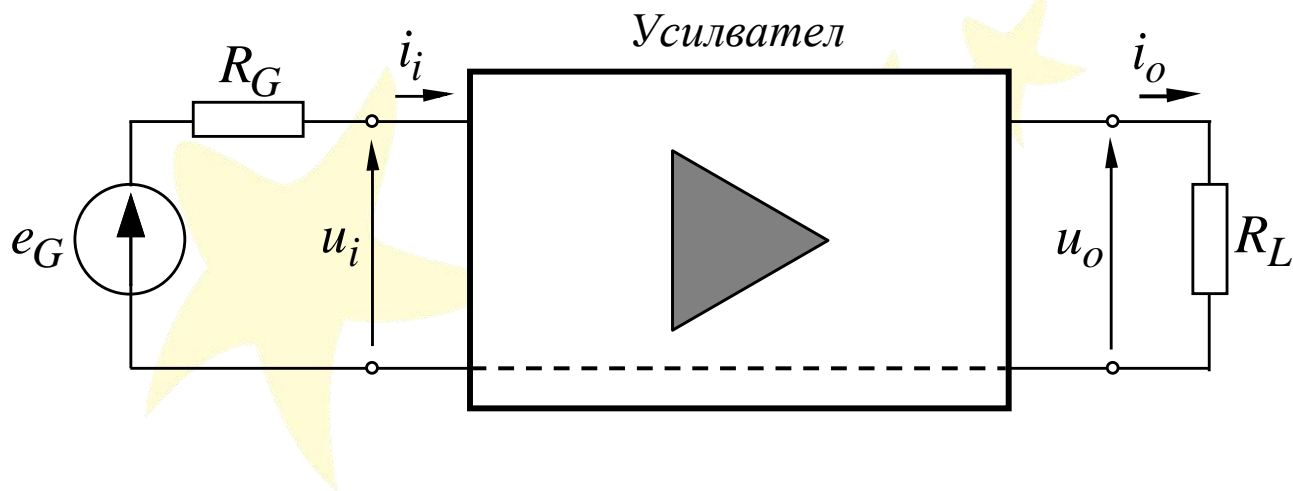
**„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”**

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!***



# 1 Обобщена еквивалентна схема на електронен усилвател. Влияние на източника на сигнал и товара

## 1.1 Обобщена схема на електронен 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!*



# 1 Обобщена еквивалентна схема на електронен усилвател. Влияние на източника на сигнал и товара - продължение

## 1.1 Обобщена схема на електронен усилвател

Електронните усилватели са транзисторни схеми, предназначени да усилват мощността на даден входен сигнал. В обобщената блокова схема на усилвател входният сигнал е представен еквивалентно като идеален източник на напрежение  $e_G$  с вътрешно съпротивление  $R_G$ . Източникът на входен сигнал може да бъде сензор, електронна схема, микрофон или антена. Товарът се присъединява към изхода и може да се представи като съпротивление  $R_L = u_o / i_o$ . Той може да бъде високоговорител, управляваща намотка на реле, електронна схема и др.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

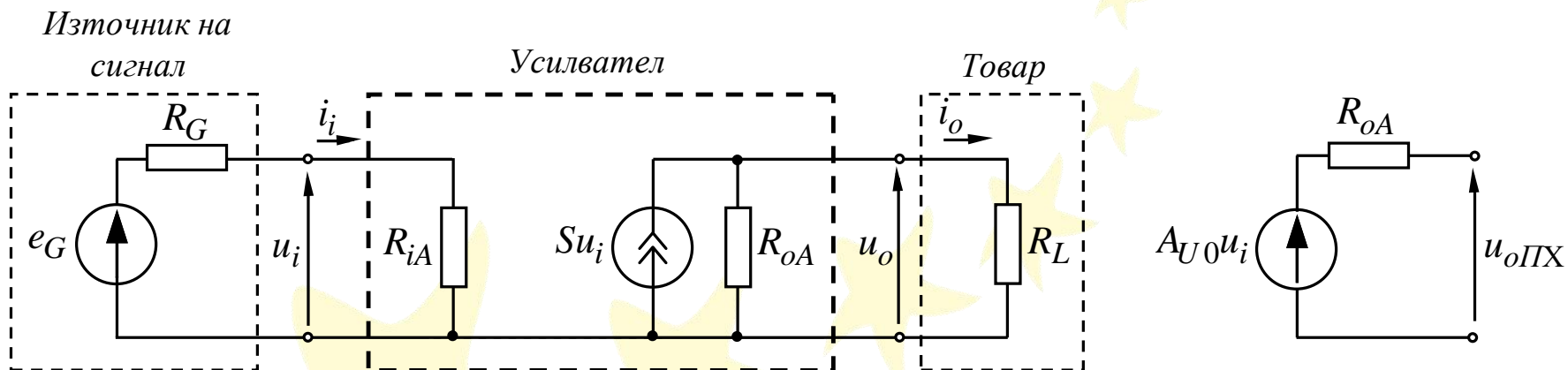
*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”*

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

## 1.2 Еквивалентна електрическа схема на електронен 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

## 1.2 Еквивалентна електрическа схема на електронен усилвател

При работа с малки сигнали зависимостите между напреженията и токовете могат да се приемат за линейни, при това усилвателите функционират като линейни електронни схеми. Тогава блоковата схема може да бъде заместена с еквивалентна електрическа схема. В нея входната верига е представена с елемента  $R_{iA}$ , моделиращ входното съпротивление на усилвателя. Изходната верига, съгласно теоремата на Нортон, е представена с идеален източник на ток, управляван от входното напрежение, чийто ток е  $Su_i$ , където коефициентът  $[mA/V]$  отговаря на стръмността на активния елемент. Елементът  $R_{oA}$ , свързан паралелно на източника на ток моделира изходното съпротивление на усилвателя. След представяне на изходната верига съгласно теоремата на Тевенен зависимият източник на ток с еквивалентно вътрешно съпротивление се преобразува в източник на напрежение с коефициент на предаване

$$A_{U0} = \frac{u_{oПХ}}{u_i} = SR_{oA},$$

където  $u_{oПХ}$  е изходното напрежение на празен ход.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

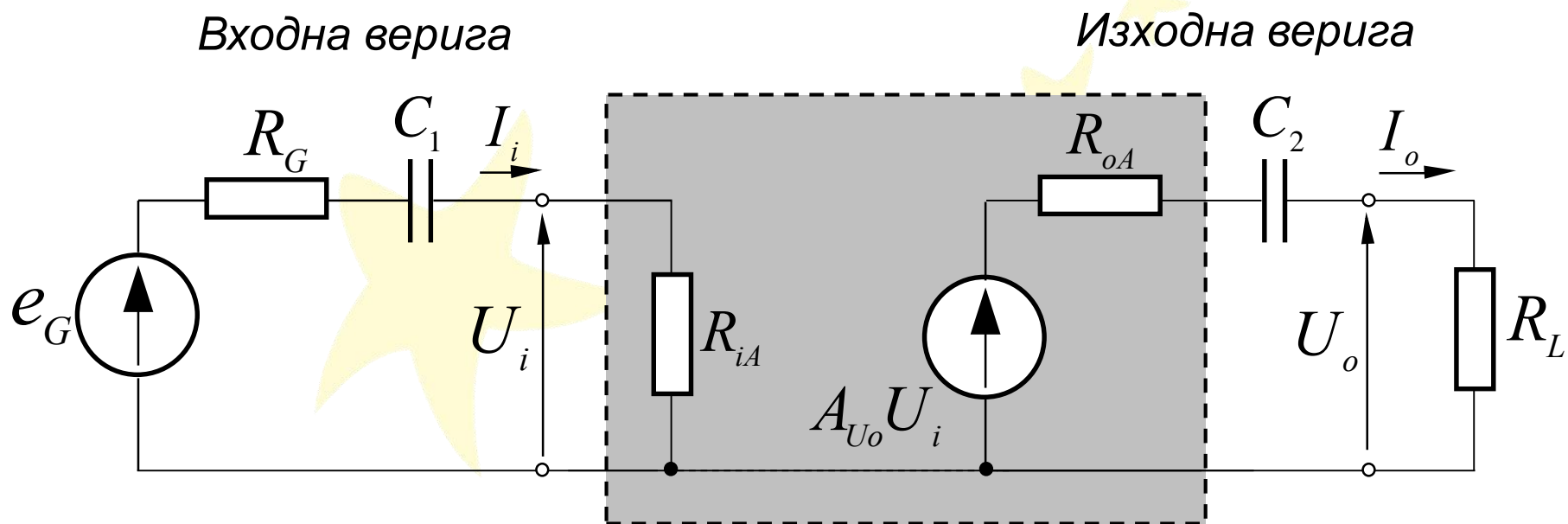
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



Европейски социален фонд

## 2 Анализ на усилвателните стъпала при ниски честоти

### 2.1 Обобщена схема на електронен усилвател за ниски честоти



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

## 2 Анализ на усилвателните стъпала при ниски честоти - продължение

### 2.1 Обобщена схема на усилвател за ниски честоти

За областта на ниските честоти капацитетите  $C_i$ ,  $C_o$  и  $C_L$  имат още по-голямо съпротивление от това за средни честоти и могат да се пренебрегнат. Кондензаторите  $C_1$  и  $C_2$ , така също  $CE(S)$  за стъпала  $OE$  ( $OC$ ), обаче оказват влияние, защото тяхното съпротивление при честоти от  $0 - f_b$  е голямо и е съизмеримо съответно с  $R_{iA}$ ,  $RL$  и  $RE,S$ . За удобство при анализа отделно се разглеждат входната и изходната верига, а за стъпала  $OE$  и  $OC$  и веригата  $RE(S) - CE(S)$ , след което общите АЧХ и ФЧХ се получават след умножение или сумиране.



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!*





## 2 Анализ на усилвателните стъпала при ниски честоти - продължение

### 2.2 Предавателни функции за входната и за изходната верига при ниски честоти

□ Анализ на входната верига

$$\dot{I}_i = \frac{e_G}{R_G + \frac{1}{j\omega C_1} + R_{iA}} \quad - \text{формула за тока във входната верига}$$

$$\dot{U}_i = \dot{I}_i R_{iA} = \frac{R_{iA}}{R_G + \frac{1}{j\omega C_1} + R_{iA}} e_G$$



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

## 2 Анализ на усилвателните стъпала при ниски честоти - продължение

### 2.2 Предавателни функции за входната и за изходната верига при ниски честоти

□ Анализ на входната верига

$$\dot{K}_{in} = \frac{\dot{U}_i}{e_G} = \frac{R_{iA}}{R_G + R_{iA}} \cdot \frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega C_1 (R_{iA} + R_G)}} = \frac{K_{in,o}}{1 - j \frac{f_{bi}}{f}}$$

$$K_{in,o} = \frac{R_{iA}}{R_G + R_{iA}} - \text{Формула за коефициента на предаване при ниски честоти}$$

$$f_{bi} = \frac{1}{2\pi C_1 (R_G + R_{iA})} - \text{Формула за ниската гранична честота на входната верига}$$



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

## 2 Анализ на усилвателните стъпала при ниски честоти - продължение

### 2.2 Предавателни функции за входната и за изходната верига при ниски честоти

– АЧХ на входната верига

$$|K_{in}| = \frac{K_{in,o}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{bi}}{f}\right)^2}} ;$$

– ФЧХ на входната верига

$$\varphi = \arctan\left(\frac{f_{bi}}{f}\right) ;$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

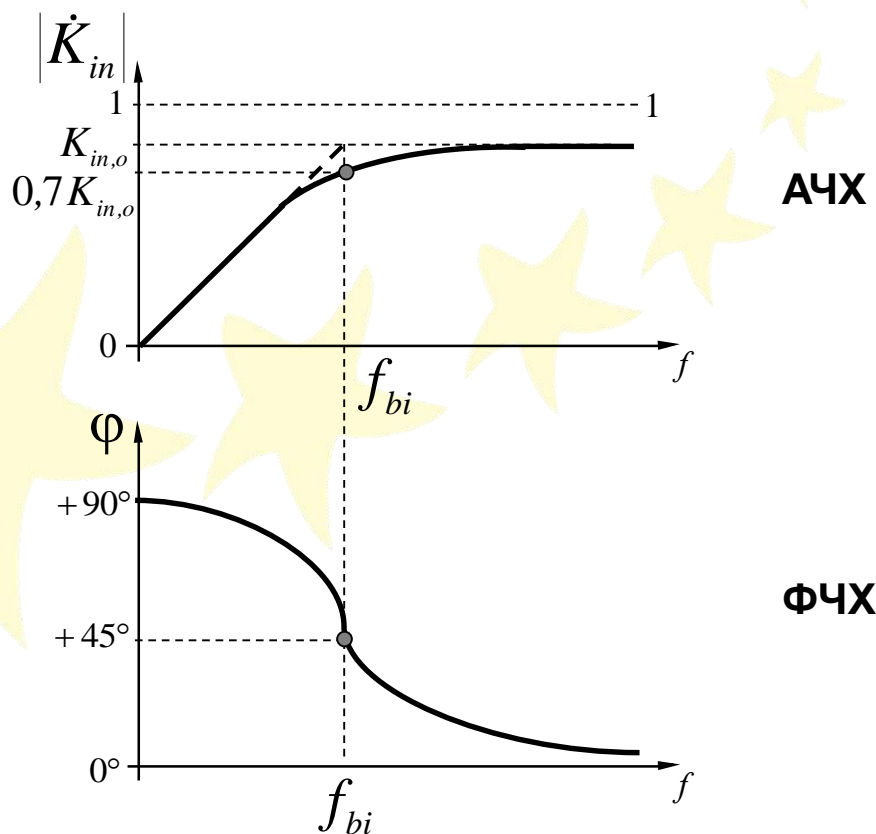
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



Европейски социален фонд

## 2 Анализ на усилвателните стъпала при ниски честоти - продължение

### 2.2 Предавателни функции за входната и изходната верига при ниски честоти



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

## 2 Анализ на усилвателните стъпала при ниски честоти - продължение

### 2.2 Предавателни функции за входната и изходната верига при ниски честоти

□ Анализ на изходната верига

$$\dot{K}_{out} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{R_L A_{Uo}}{R_{oA} + R_L} \frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega C_2 (R_{oA} + R_L)}} = \frac{K_{out,o}}{1 - j \frac{f_{bo}}{f}}$$

$$K_{out,o} = \frac{R_L}{R_{oA} + R_L} A_{Uo} \text{ - Формула за коефициента на предаване при ниски честоти}$$

$$f_{bo} = \frac{1}{2\pi C_2 (R_{oA} + R_L)} \text{ - Формула за ниската гранична честота на изходната верига}$$



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

## 2 Анализ на усилвателните стъпала при ниски честоти - продължение

### 2.3 Обща комплексна предавателна функция за ниски честоти

$$\dot{K}_U = \frac{U_o}{e_G} = \dot{K}_{in} \cdot \dot{K}_{out} \quad \text{или} \quad K_{UdB} = \underbrace{K_{odB}}_{K_{in,o} \cdot K_{out,o}} - M_{C_1 dB} - M_{C_2 dB}$$

където

$$M_{C_1} = \sqrt{1 + \left(\frac{f_{bi}}{f}\right)^2} \quad \text{- коефициент на честотни изкривявания обусловен от входната верига}$$

$$M_{C_2} = \sqrt{1 + \left(\frac{f_{bo}}{f}\right)^2} \quad \text{- коефициент на честотни изкривявания обусловен от изходната верига}$$



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

## 2 Анализ на усилвателните стъпала при ниски честоти - продължение

### 2.3 Обща комплексна предавателна функция за ниски честоти

□ Формули за разделителните кондензатори  $C_1$  и  $C_2$

$$C_1 \geq \frac{1}{2\pi f_b (R_{iA} + R_G) \sqrt{M_{C_1}^2 - 1}} \quad \text{- входен разделителен кондензатор}$$

$$C_2 \geq \frac{1}{2\pi f_b (R_{oA} + R_L) \sqrt{M_{C_2}^2 - 1}} \quad \text{- изходен разделителен кондензатор}$$



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!*

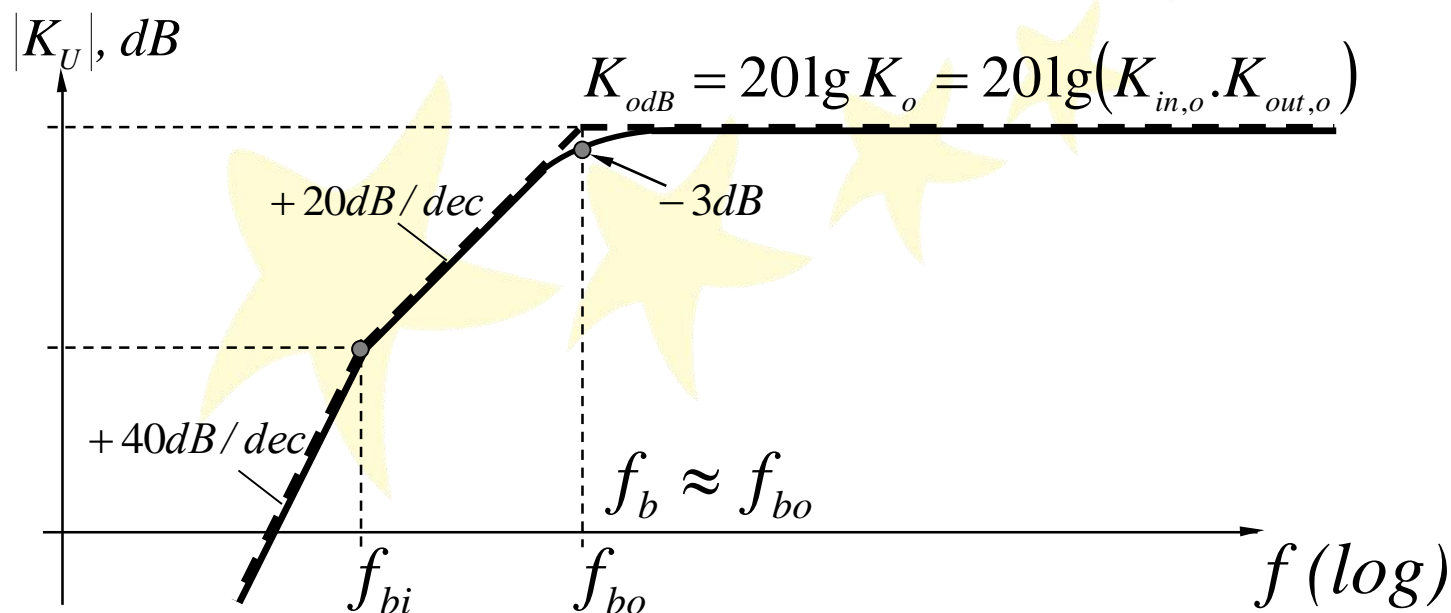


Европейски социален фонд

## 2 Анализ на усилвателните стъпала при ниски честоти - продължение

### 2.3 Обща комплексна предавателна функция за ниски честоти

□ Примерна форма на АЧХ за ниски честоти



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!*





### 3 Анализ на усилвателните стъпала при високи честоти

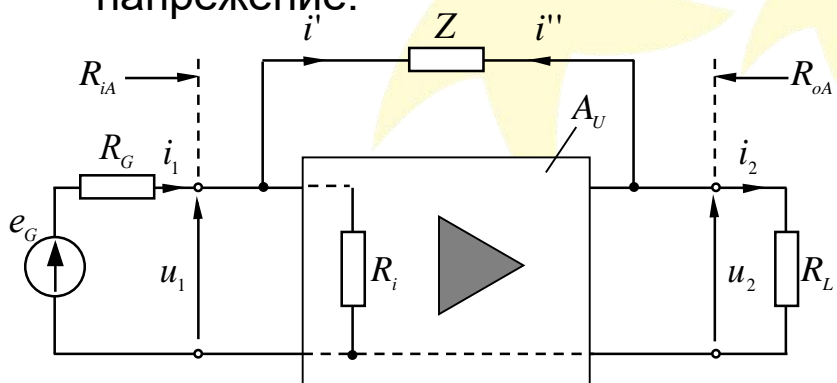
#### 3.1 Теорема на Милер

##### □ Дефиниция на теоремата

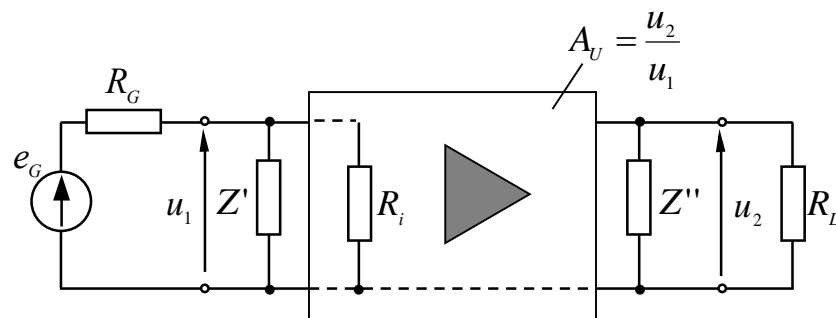
Усилвателят, представен като четириполусник от фиг. 1, може да бъде заменен с усилвателя от фиг. 2 при условие, че  $Z' = \frac{Z}{1 - A_U}$  и

$Z'' = \frac{Z}{1 - \frac{1}{A_U}}$ , където  $A_U = u_2 / u_1$  е коефициентът на усилване по

напрежение.



Фиг. 1



Фиг. 2



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

### 3 Анализ на усилвателните стъпала при високи честоти

#### 3.1 Теорема на Милер - продължение

##### □ Доказателство на теоремата

Двата четириполюсника ще бъдат еквивалентни, ако входните и изходните им токове и напрежения са еднакви.

Токът  $i'$ , отразяващ влиянието на  $Z$  на входа на двете схеми, е

$$i' = \frac{u_1 - u_2}{Z} = \frac{u_1 \cdot (1 - A_U)}{Z} = \frac{u_1}{Z'} \rightarrow Z' = \frac{Z}{1 - A_U}.$$

Токът  $i''$ , отразяващ влиянието на  $Z$  на изхода на двете схеми, е

$$i'' = -i' = \frac{u_2 - u_1}{Z} = \frac{u_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{A_U}\right)}{Z} = \frac{u_2}{Z''} \rightarrow Z'' = \frac{Z}{1 - \frac{1}{A_U}}.$$



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

### 3 Анализ на усилвателните стъпала при високи честоти

#### 3.1 Теорема на Милер - продължение

##### □ Доказателство на теоремата

Тогава, ако  $Z = R$  (съпротивление), за входното съпротивление на усилвателя се получава  $R_{iA} = R' \parallel R_i$ .

В случай, че  $Z = 1/j\omega C$  (капацитивен характер на импеданса), входният и изходният еквивалентен капацитет на усилвателя са:

$$C' = C \cdot (1 - A_U) \quad \text{и} \quad C'' = C \cdot \left(1 - \frac{1}{A_U}\right).$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

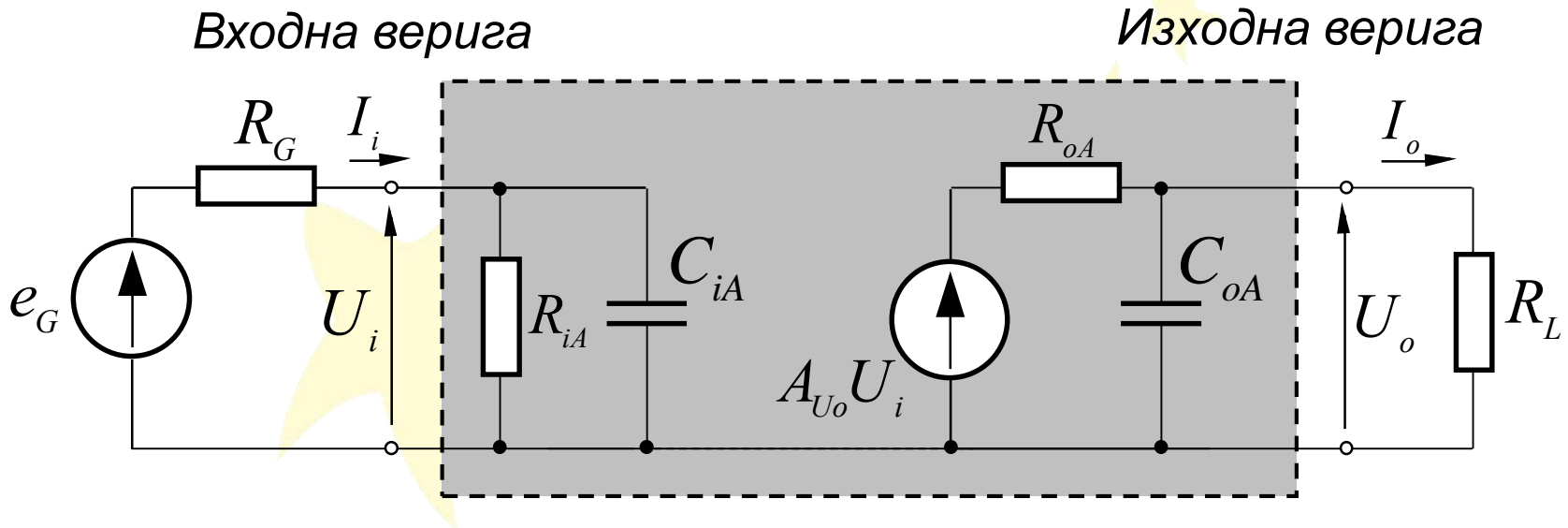
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



Европейски социален фонд

### 3 Анализ на усилвателните стъпала при високи честоти

#### 3.2 Обобщена еквивалентна схема на усилвател за високи честоти



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

### 3 Анализ на усилвателните стъпала при високи честоти

#### 3.2 Обобщена еквивалентна схема на усилвател за високи честоти - продължение

При високи честоти оказват влияние входният капацитет, изходният капацитет и капацитетът на товара. Капацитетите  $C_{iA}$ ,  $C_{oA}$  и  $C_L$ , чието съпротивление намалява с нарастване на честотата са свързани паралелно на входа и съответно на изхода. Това е причина за намаляването на изходното напрежение и на коефициента на усилване, т.е. за тяхната честотна зависимост. Обобщените еквивалентни схеми на входната и изходната верига са нискочестотни филтри (НЧФ).



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!*



### 3 Анализ на усилвателните стъпала при високи честоти - продължение

#### 3.3 Предавателни функции за входната и изходната верига при високи честоти

Комплексна предавателна функция на входната верига

$$\dot{K}_{in} = \frac{\dot{U}_i}{e_G} = \frac{K_{in,o}}{1 + j \frac{f}{f_{hi}}}$$

Комплексна предавателна функция на изходната верига

$$\dot{K}_{out} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{K_{out,o}}{1 + j \frac{f}{f_{ho}}}, \text{ където}$$

Високи гранични честоти, обусловени входната и изходната верига:

$$f_{hi} = \frac{1}{2\pi C_{iA} (R_{iA} // R_G)}$$

и

$$f_{ho} = \frac{1}{2\pi C_{oA} (R_{oA} // R_L)}$$



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!*



Европейски социален фонд

### 3 Анализ на усилвателните стъпала при високи честоти - продължение

#### 3.4 Обща комплексна предавателна функция за високи честоти

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_o}{e_G} = \dot{K}_{in} \cdot \dot{K}_{out} \quad \text{или}$$

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_o}{e_G} = \frac{K_{in,o} K_{out,o}}{\left(1 + j \frac{f}{f_{hi}}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{ho}}\right)}$$



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

## 4 Обща комплексна преподавателна функция за ниски и високи честоти

Като се приложи принципът на суперпозицията се получават общите АЧХ и ФЧХ. Прилагането на принципа на суперпозицията позволява да се “сумират” резултатите от анализа при средни, ниски и високи честоти и да се построят АЧХ и ФЧХ за целия честотен обхват.

Като се използват диаграмите на Бодe за входната и изходната верига, може да се построят АЧХ и ФЧХ на стъпалата.



Европейски съюз

**ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042**

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

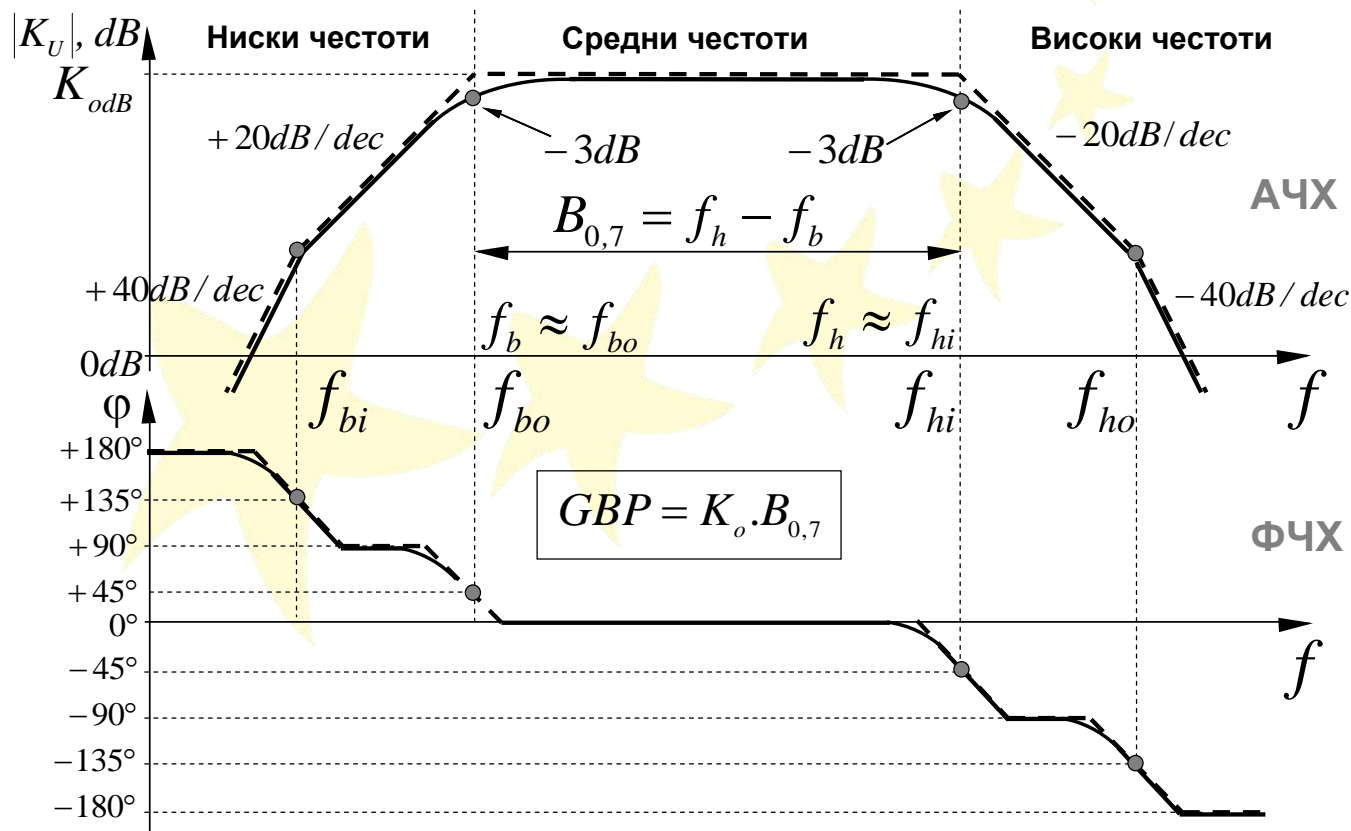
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
***Инвестира във вашето бъдеще!***





# 4 Обща комплексна предавателна функция за ниски и високи честоти - продължение

Примерна АЧХ и ФЧХ на променливотоков усилвател



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!*



## 5 Анализ на усилвателни стъпала при усилване на импулсни сигнали

### 5.1 Основни определения

Електрическите импулси могат да имат различна форма: правоъгълна, трапецовидна, триъгълна и др. Освен това те могат да бъдат еднополярни и двуполярни. Импулсите се характеризират с амплитуда  $U_i$ , дължина на импулса  $t_p$  и честота на повторение  $f = 1/T$ , където  $T$  е период на сигнала. Идеализирания импулс  $u_i$  има безкрайно голяма производна в момента на предния и задния фронт и нулева – в останалата си част. Под действието на такъв сигнал в усилвателя възниква преходен процес. Затова при усилване на импулси свойствата на усилвателя се определят от неговата *преходна характеристика*. Тя представлява зависимостта на изходния сигнал  $u_o(t)$  от времето при въздействието на единичен скок на напрежението на входа –  $u_i(t)$ . Единичен скок на напрежението е функцията, която е тъждествено равна на нула при  $t < 0$ , а при  $t > 0$  е равна на единица.



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!*

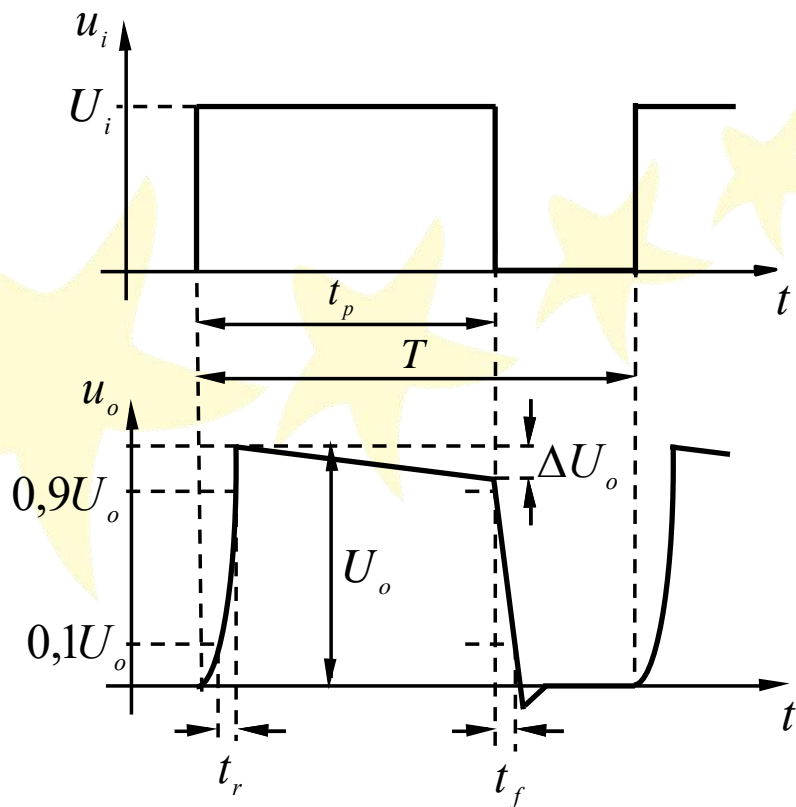


Европейски социален фонд

## 5 Анализ на усилвателни стъпала при усилване на импулсни сигнали

### 5.1 Основни определения - продължение

Примерни времедиаграми на входен и изходен импулсен сигнал



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

## 5 Анализ на усилвателни стъпала при усилване на импулсни сигнали

### 5.2 Анализ при предаване на фронта на импулса

При подаване на правоъгълен импулс към входа на транзистор, свързан по схема общ емитер или общ сорс, изходното напрежение нараства до установената си стойност не моментално, а постепенно. Това се дължи на постепенното зареждане на входния и на изходния капацитет на усилвателното стъпало ( $C_{iA}$  и  $C_{oA}$ ). В същото време напрежението върху разделителните кондензатори почти не се изменя, тъй като техният капацитет е винаги много по-голям от  $C_{iA}$  и  $C_{oA}$ . Тогава при разглеждане на поведението на усилвателните стъпала при предаване на фронта на импулса влиянието на разделителните кондензатори може да не се взема под внимание. Всъщност предаването на фронта на правоъгълен входен импулс може да се опише чрез действието на усилвателя в областта на високите честоти.



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!*

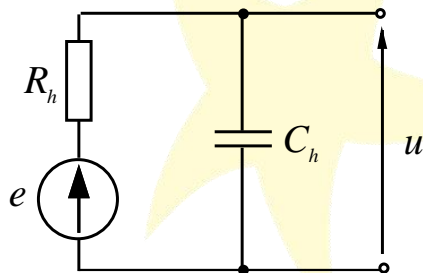


Европейски социален фонд

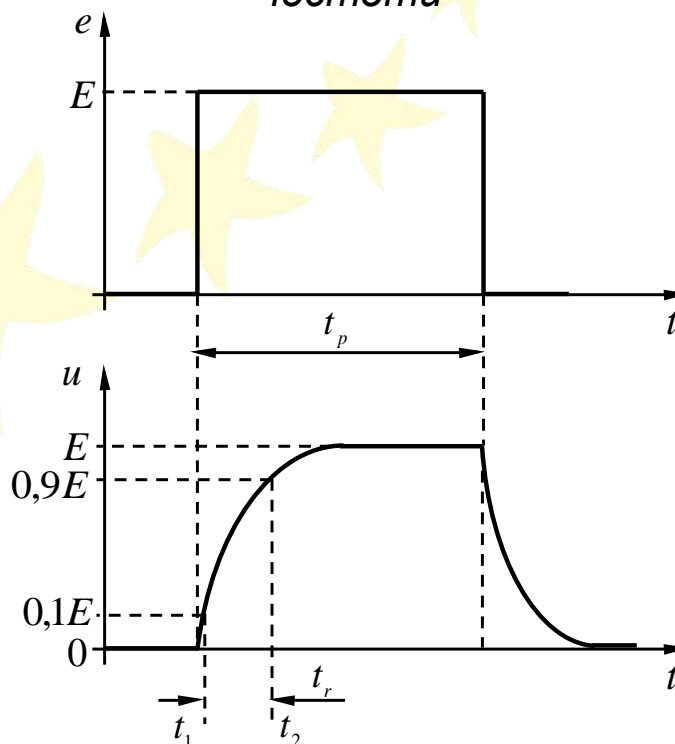
## 5 Анализ на усилвателни стъпала при усилване на импулсни сигнали

### 5.2 Анализ при предаване на фронта на импулса - продължение

Еквивалентна схема на входната/изходната верига при високи честоти



Примерни времедиаграми на входен и изходен при високи честоти



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

## 5 Анализ на усилвателни стъпала при усилване на импулсни сигнали

### 5.2 Анализ при предаване на фронта на импулса - продължение

За преходната характеристика с голяма точност в началната част на преходния процес важи диференциалното уравнение  $R_h C_h \frac{du}{dt} + u = E$ , чието решение е

$$u(t) = E(1 - e^{-t/\tau_h}),$$

където  $\tau_h = R_h C_h$  е времеконстантата на входната (изходната) верига за високи честоти.

За входната верига елементите на  $\tau_h$  са  $R_h = R_G \parallel R_{iA}$  и  $C_h = C_{iA}$ , а за изходната верига  $R_h = R_{oA} \parallel R_L$  и  $C_h = C_{oA} + C_L$ .



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!*



Европейски социален фонд

## 5 Анализ на усилвателни стъпала при усилване на импулсни сигнали

### 5.2 Анализ при предаване на фронта на импулса - продължение

Стойността на времето на нарастване  $t_r$  може да се определи от дефиницията, т.е. като времето, необходимо на изходното напрежение да се промени от 0,1 до 0,9 от максималната си стойност.

Тогава за времето на нарастване се получава

$$t_r = t_2 - t_1 = \tau_h (\ln 10 - \ln 1,1) \text{ или}$$

$$t_r \approx 2,2 \tau_h .$$

Тъй като  $\tau_h = 1/2\pi f_h$ , то формулата за времето на нарастване добива вида

$$t_r \approx \frac{2,2}{2\pi f_h} \text{ или}$$

$$\boxed{f_h t_r \approx 0,35.}$$



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

## 5 Анализ на усилвателни стъпала при усилване на импулсни сигнали

### 5.3 Анализ при предаване на плоската част на импулса (върха на импулса)

При предаването на импулса се наблюдава спадане на неговата плоска част. Причината за това са разделителните кондензатори, включени в схемата на усилвателя. Предполага се, че в първоначалния момент (при включване на захранващото напрежение) за усилвателното стъпало по схема ОЕ (или ОС) разделителните кондензатори  $C_1$  и  $C_2$  са разредени. Следователно фронтът на импулса преминава свободно през тях. След достигане на максималното напрежение на изхода  $U_o$  постепенно тези кондензатори се зареждат и влиянието на  $C_1$  и  $C_2$  се проявява в това, че зарядният им ток намалява, а оттам намалява и изходното напрежение  $u_o$ . В изходния импулс се получава спад  $\delta$  в плоската част. Поведението на стъпалото в този случай съвпада с поведението на усилвателя в областта на ниските честоти.



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!*

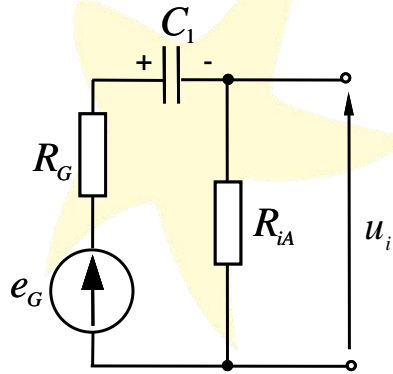




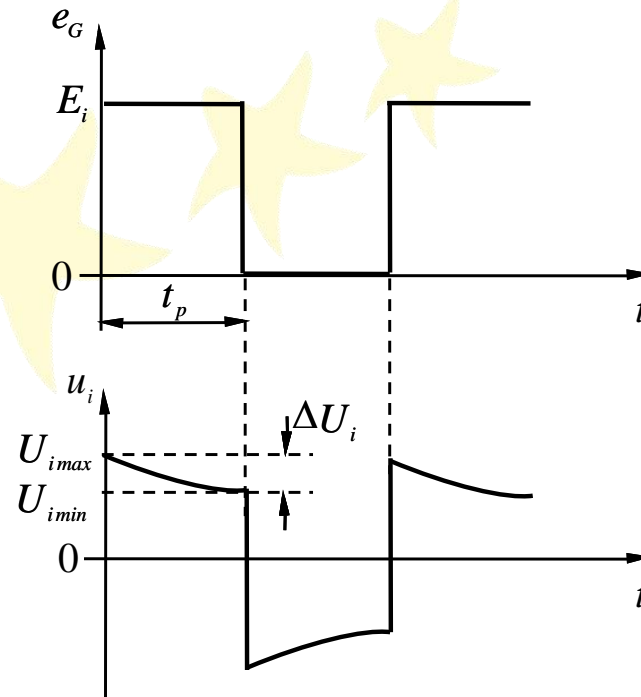
## 5 Анализ на усилвателни стъпала при усилване на импулсни сигнали

### 5.3 Анализ при предаване на плоската част на импулса (върха на импулса) - продължение

Еквивалентна схема на входната верига при ниски честоти



Примерни времедиаграми на входен и изходен при ниски честоти



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

## 5 Анализ на усилвателни стъпала при усилване на импулсни сигнали

### 5.3 Анализ при предаване на плоската част на импулса (върха на импулса) - продължение

Аналитичният израз на съответната преходна характеристика има вида

$$u_i = U_{i \max} e^{-t/\tau_{bi}},$$

където  $\tau_{bi} = C_1(R_{iA} + R_G)$  е времеконстантата на входната верига за ниски честоти.

Спадането на плоската част на импулса  $\Delta U_i$  се намира като разлика между максималната  $U_{i \max}$  и минималната  $U_{i \min}$  стойност на импулса. Тогава

$$\Delta U_i = U_{i \max} - U_{i \min} = U_{i \max} - U_{i \max} e^{-t_p/\tau_{bi}} = U_{i \max} (1 - e^{-t_p/\tau_{bi}}).$$

Опростяването на горния израз може да се извърши, ако функцията  $e^{-t/\tau_{bi}}$  се разложи в ред на Тейлор ( $f(t) = f(0) + \frac{1}{1!} f'(0)t + \frac{1}{2!} f''(0)t^2 + \dots$ ), т.е.

$$e^{-\frac{t}{\tau_{bi}}} = 1 - \frac{t}{\tau_{bi}} + \frac{t^2}{2!\tau_{bi}^2} - \frac{t^3}{3!\tau_{bi}^3} + \dots$$



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

## 5 Анализ на усилвателни стъпала при усилване на импулсни сигнали

### 5.3 Анализ при предаване на плоската част на импулса (върха на импулса) - продължение

Тъй като изменението на изходното напрежение е малко, могат да се вземат само първите два члена, при което формулата за  $\Delta U_i$  добива вида

$$\Delta U_i \approx U_{i \max} \left( 1 - 1 + \frac{t_p}{\tau_{bi}} \right) = U_{i \max} \frac{t_p}{\tau_{bi}}.$$

Понеже времеконстантата  $\tau_{bi} = 1/(2\pi f_{bi})$ , то за относителното спадане  $\delta_i = \Delta U_i / U_{i \max}$  се получава

$$\delta_i = \frac{\Delta U_i}{U_{i \max}} = t_p 2\pi f_{bi} \text{ или}$$

$$t_p f_{bi} = 0,159\delta_i.$$

Обикновено за  $\delta_i$  се задават стойности от 1% до 10%.



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

**Основна:**

1. Пандиев, И., Л. Донеvsка, Д. Стаменов. Аналогова схемотехника – I, глава 2, стр. 47-63. София, Издателство на ТУ-София, 2008.
2. Вълков, Ст. Аналогова електроника, глава 6, стр. 331-344, София, Техника, 2002.
3. Mancini, R. Op Amps for Everyone. Design Reference. Texas I. (slod006b.pdf), chapter 5, pp. 5-1–5-16, USA, 2002.

**Допълнителна:**

4. Tietze, V., Ch. Schenk. Electronic circuits. 2nd Edition, chapter 2, pp. 95–131, New York. Springer-Verlag, 2008.
5. Choosing Between Voltage Feedback (VFB) and Current Feedback (CFB) Op Amps, Analog Dev., MT-060, pp. 1–6, 2008.
6. Schmid, R., Measuring Board Parasitics in High-Speed Analog Design, Texas Instruments Inc., Application Report SBOA094, 2003.
7. Интернет страница на учебно-научно направление „Аналогова схемотехника”: [http://ecad.tu-sofia.bg/analog\\_circuits/](http://ecad.tu-sofia.bg/analog_circuits/).



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!*

