

 **Технически университет – София**

**Факултет по електронна техника и технологии**

 **Катедра „Електронна техника”**

**Презентация № 13**

**Избирателни (селективни) усилватели. Част 1**

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



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

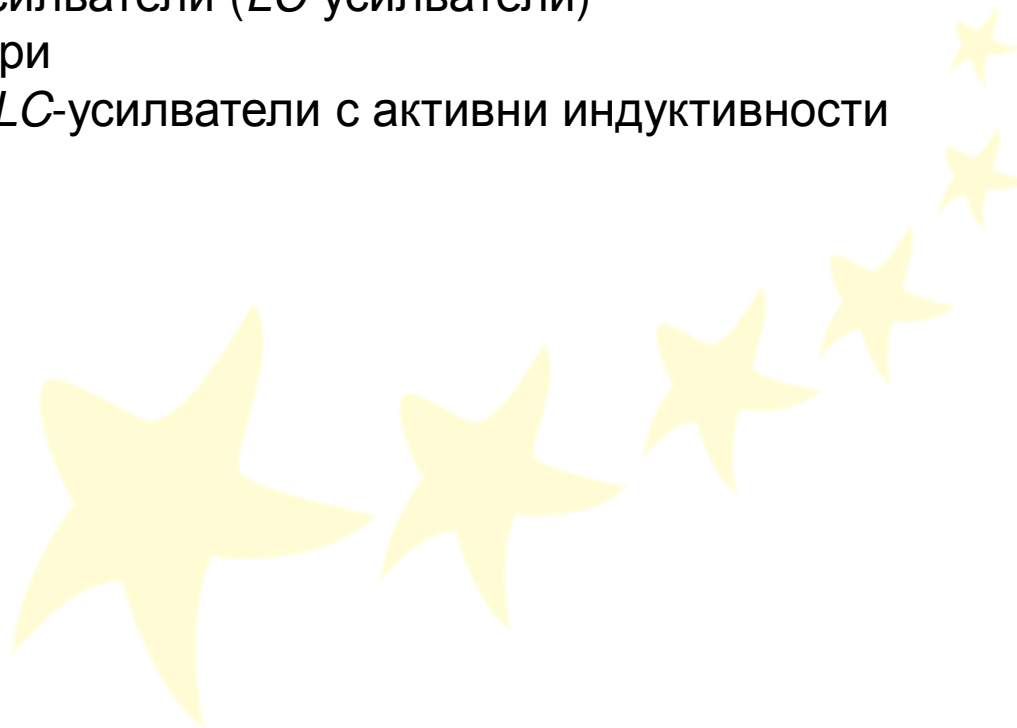
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



Европейски социален фонд

## Съдържание

1. Избирателни усилватели. Определение
2. Резонансни усилватели (*LC*-усилватели)
3. Активни филтри
4. Избирателни *LC*-усилватели с активни индуктивности
5. Заключение
6. Литература



**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 Избирателни усилватели. Определение

Избирателните усилватели са активни аналогови електронни схеми, които усилват входния сигнал само в някаква зададена честотна лента и го подтискат извън тази лента. В зависимост от схемотехничната реализация на честотно задаващата верига, избирателните усилватели се делят на  $RC$ ,  $LC$  и на базата на активни индуктивности (жиратори).

Избирателните усилватели имат много широко приложение в различни електронни устройства като аудио тонкоректори, радиокомуникационни устройства, в измервателната техника 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!*



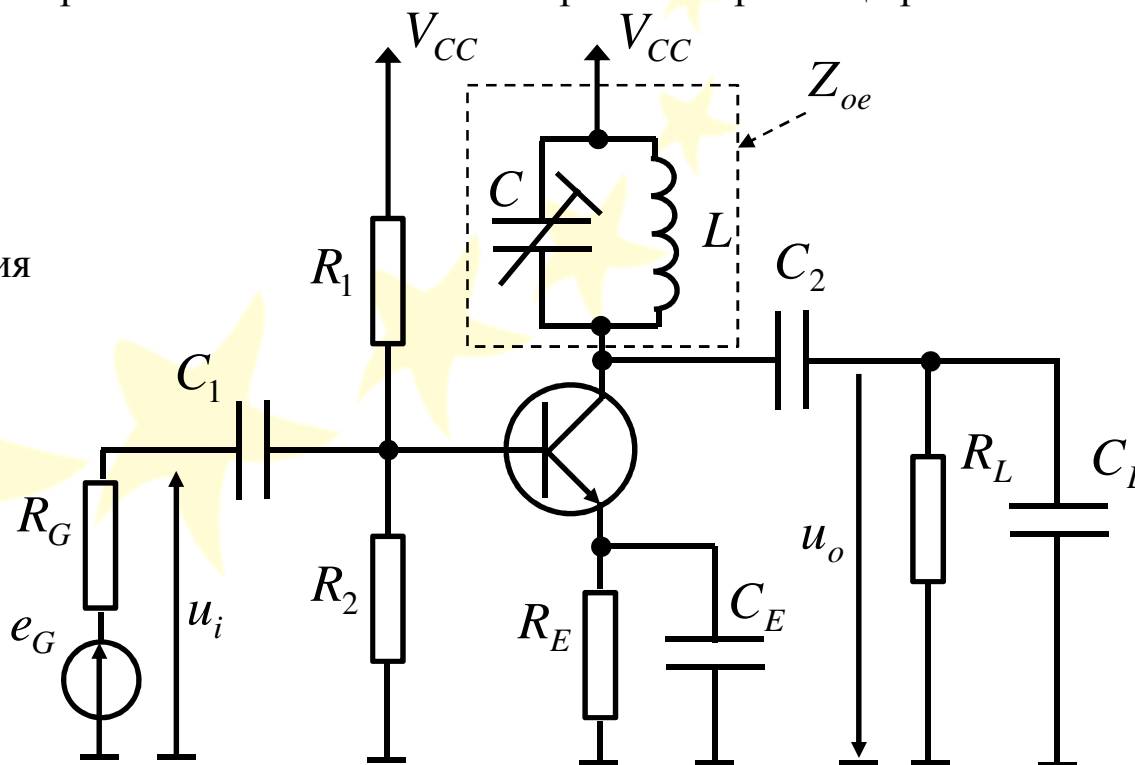
Европейски социален фонд

## 2 Резонансни усилватели (LC-усилватели)

При тези схеми честотно задаващата верига е изградена от LC трептящ кръг свързан в обратната връзка на усилвателно стъпало. Възможно е използването на еднотранзисторна схема общ емитер (ОЕ) чието колекторно съпротивление е заменено с паралелен трептящ кръг.

Ако честота на входния сигнал е равна на резонансната честота, тогава импедансът  $Z_{oe}$  на трептящия кръг е голям и коефициентът на усиливане на схемата нараства.

$$A_U \approx -SZ_{oe}$$



Фиг. 1. Резонансен 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

## Предавателна характеристика на инвертиращ суматор

Изходното напрежение на инвертиращия суматор е пропорционално на сумата от входните напрежения взети със знак минус. С помощта на резисторите  $R_1 - R_n$  е възможно да се зададат различни мащабни коефициенти на входните напрежения  $U_1 - U_n$ .

$$U_O = -\frac{R_F}{R_1}U_1 - \frac{R_F}{R_2}U_2 - \dots - \frac{R_F}{R_n}U_n$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

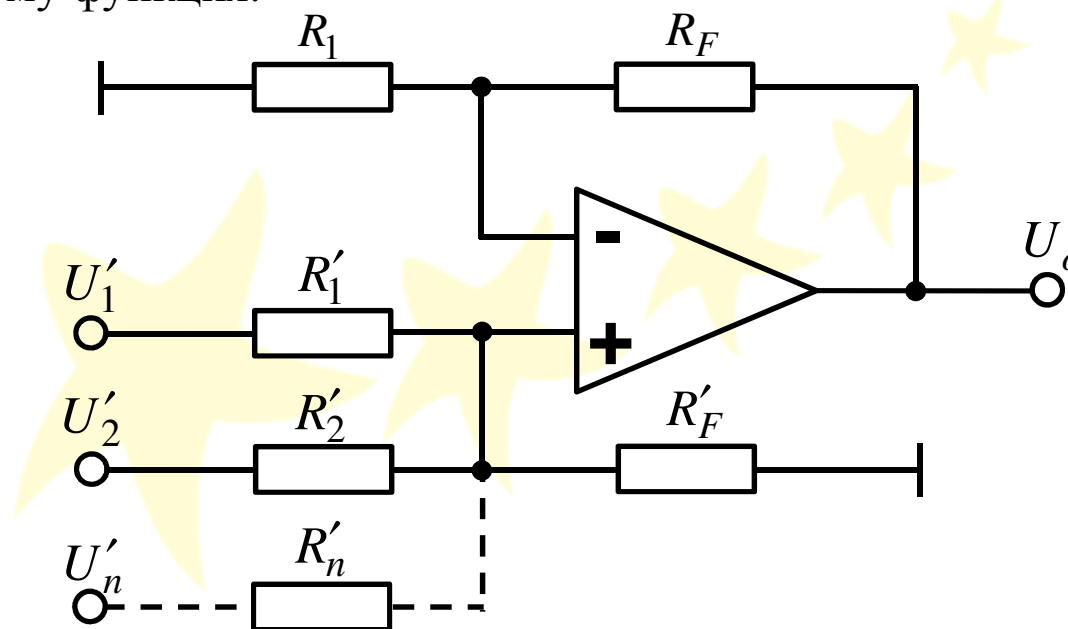
*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”*

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!*



## 2.2 Неинвертиращ аналогов суматор

Схемата на неинвертиращия аналогов суматор включва ОУ и мащабиращи резистори  $R'_1 - R'_n$  и  $R'_F$ . Резисторът  $R'_F$  не е необходим за правилната работа на суматора, но неговото добавяне може да доведе до значително опростяване на предавателната му функция.



Фиг. 2. Схема на неинвертиращ суматор



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!*



## Предавателна характеристика на неинвертиращ суматор

В общия случай предавателната функция на неинвертиращия суматор е доста сложна. Ако обаче е изпълнено условието

$$\frac{R_F}{R_1} = \frac{R'_F}{R'_1} + \frac{R'_F}{R'_2} + \dots + \frac{R'_F}{R'_n},$$

тогава предавателната функция се опростява :

$$U_o = \frac{R'_F}{R'_1} U'_1 + \frac{R'_F}{R'_2} U'_2 + \dots + \frac{R'_F}{R'_n} U'_n.$$



ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

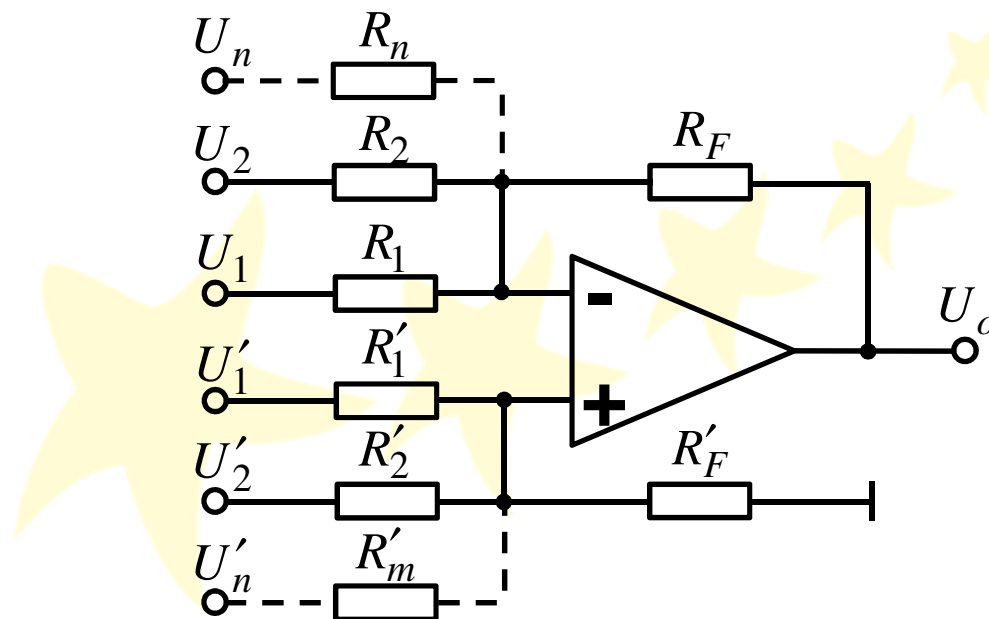
*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”*

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!*



### 2.3 Суматор с инвертиращи и неинвертиращи входове

Този суматор е известен още като *суматор-субтрактор* или *диференциален суматор*. Той притежава  $n$  на брой инвертиращи и  $m$  на брой неинвертиращи входове.



Фиг. 3. Схема на неинвертиращ суматор



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!*





## Предавателна характеристика на суматор с инвертиращи и неинвертиращи входове

Ако е изпълнено условието

$$\frac{R_F}{R_1} + \frac{R_F}{R_2} + \dots + \frac{R_F}{R_n} = \frac{R'_F}{R'_1} + \frac{R'_F}{R'_2} + \dots + \frac{R'_F}{R'_m},$$

тогава за изходното напрежение се получава:

$$U_O = \left( \frac{R'_F}{R'_1} U'_1 + \frac{R'_F}{R'_2} U'_2 + \dots + \frac{R'_F}{R'_m} U'_m \right) - \left( \frac{R_F}{R_1} U_1 + \frac{R_F}{R_2} U_2 + \dots + \frac{R_F}{R_n} U_n \right).$$



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!*

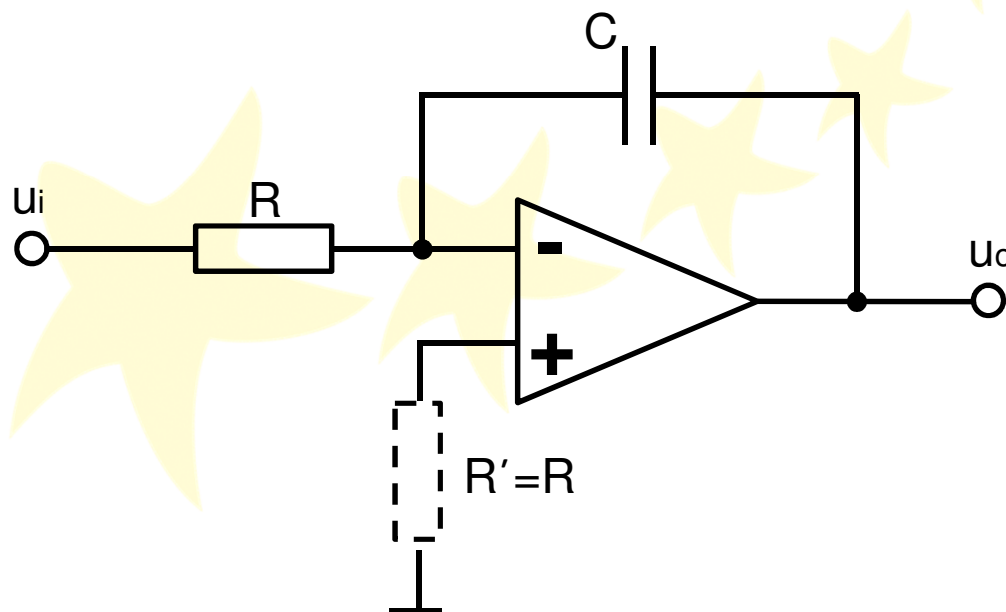


Европейски социален фонд

## 3 Интегратори

### 3.1 Инвертиращ интегратор

Интеграторите са линейни електронни схеми, чието изходно напрежение зависи от интеграла на входното. Интеграторът има кондензатор в обратната връзка, което прави предавателната му характеристика честотно зависима. Това позволява на негова база да се изградят активни филтри, генератори, схеми за следене запомняне и др.



Фиг. 4. Схема на инвертиращ интегратор

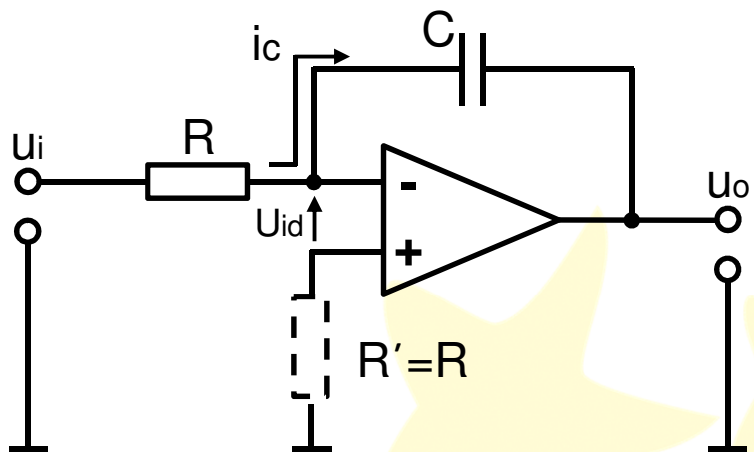


ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042  
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през  
целия живот и развитие на компетенции”  
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския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



Анализът на инвертиращия интегратор може да бъде направен, както във времева, така и в честотна област. Това ни позволява да погледнем изследваната схема от два различни ъгъла и да изучим свойствата ѝ по-добре.

**3.1.1** Анализ на инвертиращ интегратор във времева област



Като имаме предвид, че  $U_{id} = 0V$  получаваме:

$$u_i = Ri_c \Rightarrow i_c = \frac{u_i}{R}.$$

Където  $i_c$  е токът през кондензатора C:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = -C \frac{du_o}{dt}.$$

Тогава за изходното напрежение получаваме:

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_i dt + U_{o(t=0)} = -\frac{1}{\tau} \int_0^t u_i dt + U_{o(t=0)}.$$

Тук  $\tau = RC$  е времеконстантата, а  $U_{o(t=0)}$  началното условие на интегратора.



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!*

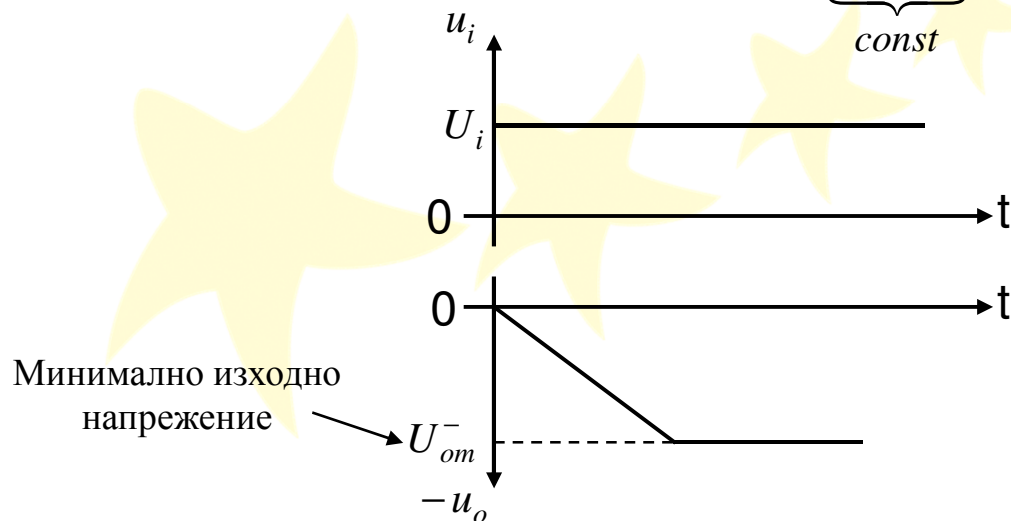


Интересно е да се изследва какво е изходното напрежение на инвертиращия интегратор при подаване на типови входни напрежения – постоянно, правоъгълно и синусоидално.

- Анализ при подаване на постоянно входно напрежение –  $U_i$ .

За изходното напрежение  $u_o$  се получава линейно намаляваща функция от вида  $y = ax$ .

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_i dt + U_{o(t=0)} = -\underbrace{\left(\frac{U_i}{RC}\right)}_{const} t + U_{o(t=0)}.$$



**Фиг. 5.** Изходно напрежение на интегратор при подадено постоянно входно напрежение и нулево начално условие  $U_{o(t=0)} = 0$ .



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!*



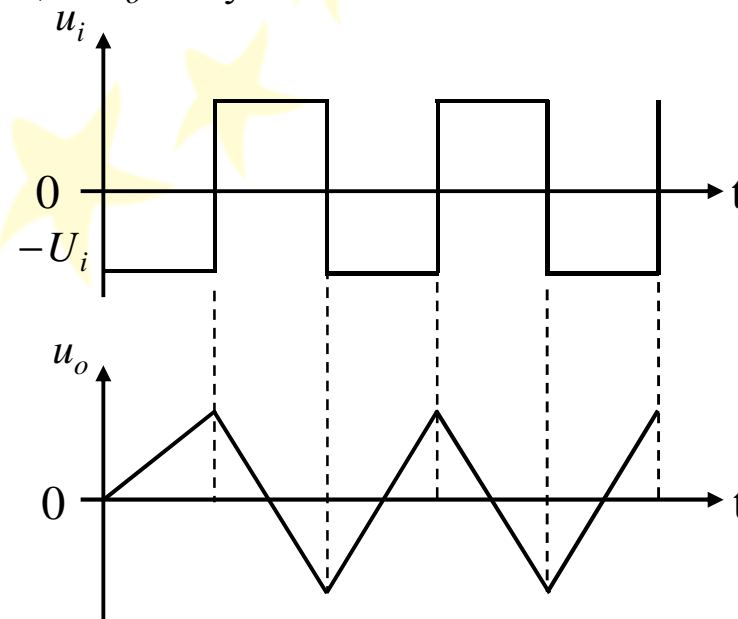
- Форма на изходното напрежение  $u_o$  при подаване на правоъгълно входно напрежение  $u_i$ .

Един период на правоъгълния входен сигнал може да се опише със следното уравнение:

$$u_i = \begin{cases} A, t \leq T/2 \\ -A, T/2 \leq t \leq T \end{cases}$$

$$u_o = \begin{cases} -\left(\frac{A}{RC}\right)t + U_{o(t=0)}, t \leq T/2 \\ \left(\frac{A}{RC}\right)t + U_{o\left(t=\frac{T}{2}\right)}, T/2 \leq t \leq T \end{cases}$$

Където  $A$  е амплитудата на входния сигнал, а  $T$  неговият период. Вземайки предвид полученото за изходния сигнал на интегратор при постоянно входно напрежение, за  $u_o$  получаваме:



Въпреки наглед сложния си математически запис изходното напрежение е обикновен триъгълен сигнал!

**Фиг. 6.** Изходно напрежение на интегратор при подадено правоъгълно входно напрежение



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!*



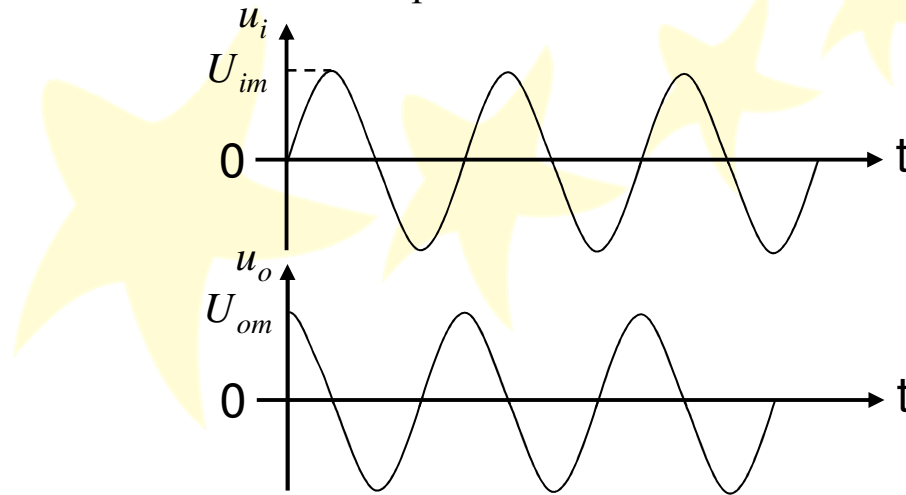
- Форма на изходното напрежение  $u_o$  при подаване на синусоидално входно напрежение

$$u_i = U_{im} \sin \omega t.$$

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{im} \sin \omega t dt = \frac{U_{im}}{\underbrace{RC\omega}_{U_{om}}} \cos \omega t.$$

Изходното напрежение е косинусоида с амплитуда  $U_{om} = \frac{U_{im}}{RC\omega}$ .  $U_{om}$  намалява с покачване на

кръговата честота  $\omega$ , което е важно за приложението на схемата като филтър.



**Фиг. 7.** Изходно напрежение на интегратор при подадено синусоидално входно напрежение



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

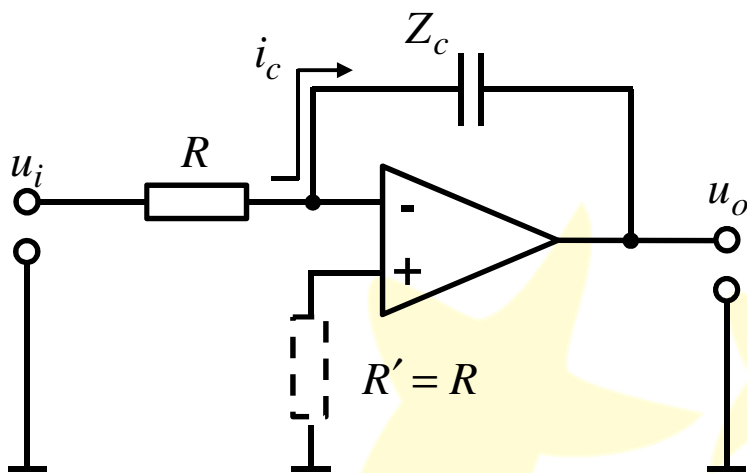
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

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!*



## 3.1.2

## Анализ на инвертиращ интегратор в честотна област. Комплексна предавателна характеристика и амплитудно-честотна характеристика на интегратора.



Комплексната предавателна характеристика е

$$\dot{A}_U = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx -\frac{Z_C}{R} = -\frac{1}{j\omega RC},$$

Където  $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$  е комплексният импеданс на кондензатора  $C$ .

По дефиниция АЧХ е модульът на комплексната предавателна характеристика. От горното уравнение за модула получаваме:

$$|\dot{A}_U| = \frac{1}{\omega RC}.$$



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!*



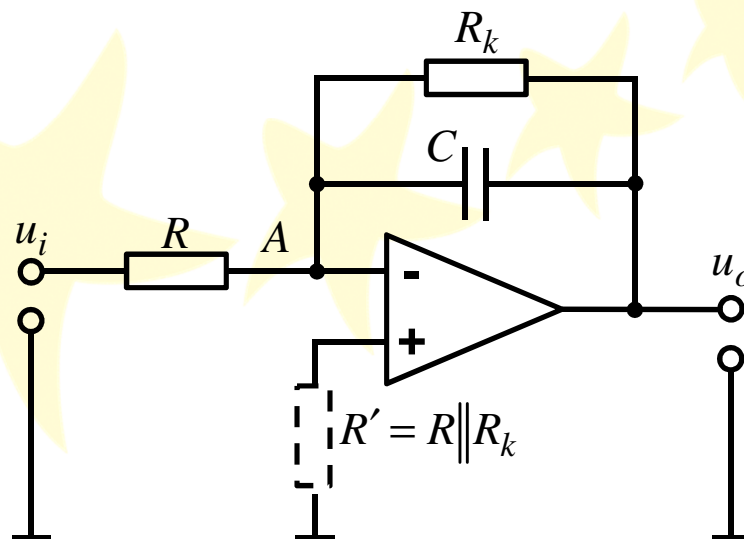
Европейски социален фонд

### 3.2 Инвертиращ интегратор с корекция

Инвертиращият интегратор даден на предишния слайд има следните по-основни недостатъци:

- кондензаторът в обратната връзка се зарежда освен от входния ток  $i_c$  и от токовете на несиметрия на ОУ.
- Това може да доведе до насищане на изхода на интегратора и грешка в изходното напрежение;
- с намаляване на честотата на входния сигнал коефициентът на усилване може да нарастне значително и схемата да стане неустойчива.

За да бъде намалено влиянието на гореизброените недостатъци се използва т.нар. **инвертиращ интегратор с корекция**. При него паралелно на  $C$  се свързва корегиращ резистор  $R_k$ , който разрежда кондензатора и ограничава коефициентът на усилване да една определена стойност.



Фиг. 8. Схема на интегратор с корекция



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!*





### 3.2.1 Анализ на инвертиращ интегратор с корекция във времева област

Анализът във времева област се извършва, когато на входа на схемата се подаде единичен скок на напрежението (фиг. 9 А):

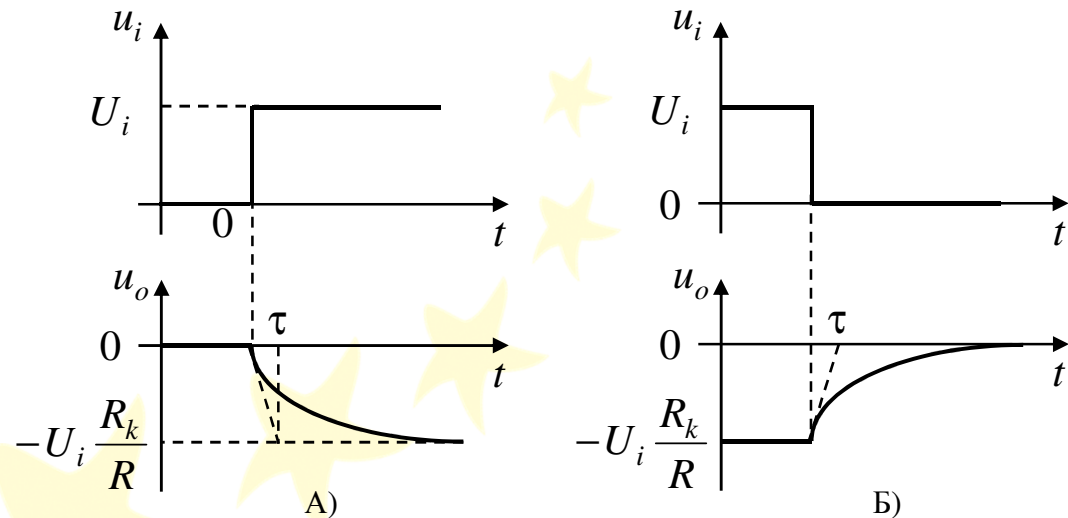
$$u_i = \begin{cases} U_i, t > 0 \\ 0, t < 0 \end{cases}$$

За точка А от схемата на фиг. 8 можем запишем следното диференциално уравнение за изходното напрежение :

$$\frac{u_i}{R} = -\frac{u_o}{R_k} - C \frac{dU_o}{dt} \Rightarrow$$

$$u_o(t) = -U_i \frac{R_k}{R} \left( 1 - e^{-t/R_k C} \right) \text{ за фиг. 9А и}$$

$$u_o(t) = -U_i \frac{R_k}{R} e^{-t/R_k C} \text{ за фиг. 9Б.}$$



**Фиг. 9.** Форма на изходния сигнал при нарастващ А) и спадащ фронт Б) на входния сигнал.

От уравненията се вижда, че  $u_o$  се стреми асимптотично към 0 или  $(R_k / R)U_i$ . Времето за установяване се определя от времеконстантата  $\tau = R_k C$ .  $\tau$  показва времето, за което  $u_o$  достига стойност  $1/e$ .



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

3.2.2

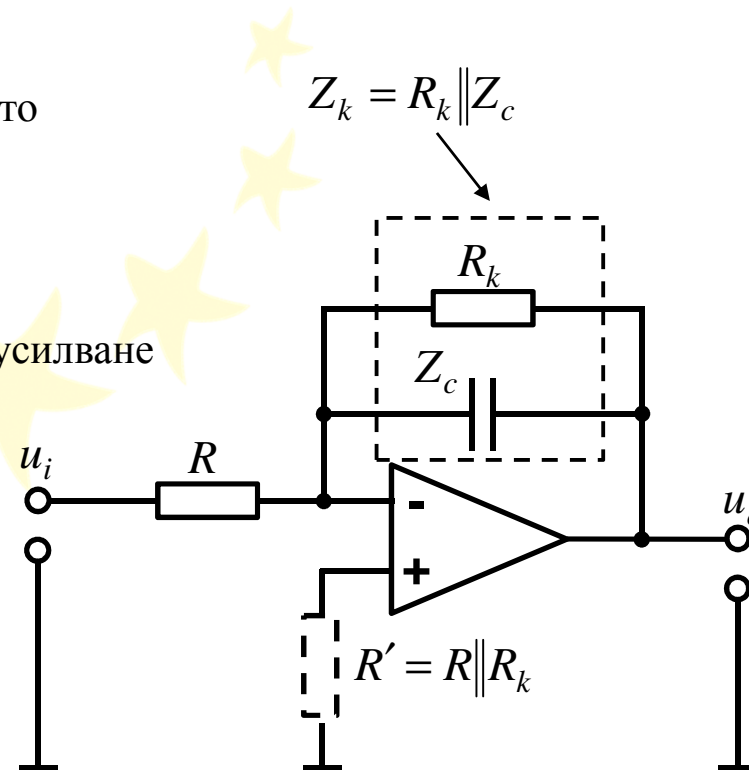
Анализ на инвертиращ интегратор с корекция в честотна област. Комплексна предавателна характеристика и амплитудно-честотна характеристика на интегратора с корекция.

$$\dot{A}_U = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx -\frac{Z_k}{R} = -\frac{R_k/R}{1+j\omega R_k C} = -\frac{A_{U0}}{1+j\frac{f}{f'_p}}, \text{ където}$$

$$Z_k = R_k \parallel Z_c = R_k \parallel \frac{1}{j\omega C}, \quad A_{U0} = \frac{R_k}{R} \text{ е коефициентът на усилване}$$

на схемата за ниски честоти, а  $f'_p = \frac{1}{2\pi R_k C}$  е

границната честота на интегратора.



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!*

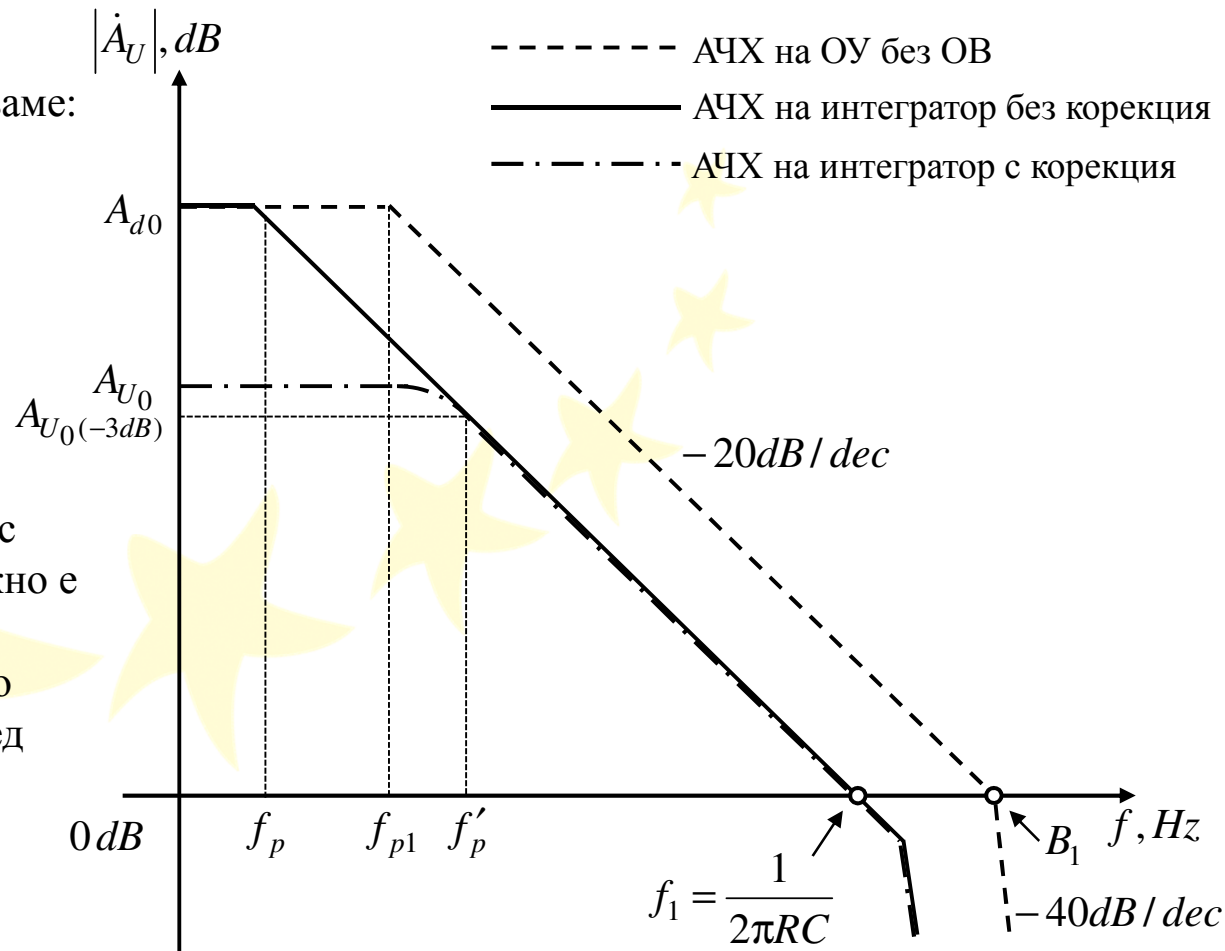


Европейски социален фонд

За модула на комплексната предавателна функция  $\dot{A}_U$  получаваме:

$$|\dot{A}_U| = \frac{A_{U0}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_p'}\right)^2}}$$

Графично представена АЧХ на интегратор с корекция е показана с пунктирна линия на Фиг. 10. Важно е да се отбележи, че интеграторът с корекция работи като усилвател до честота  $f_{p1}$  и като интегратор след тази честота.



**Фиг. 10.** АЧХ на инвертиращ интегратор с и без корекция и на ОУ без обратна връзка.



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!*



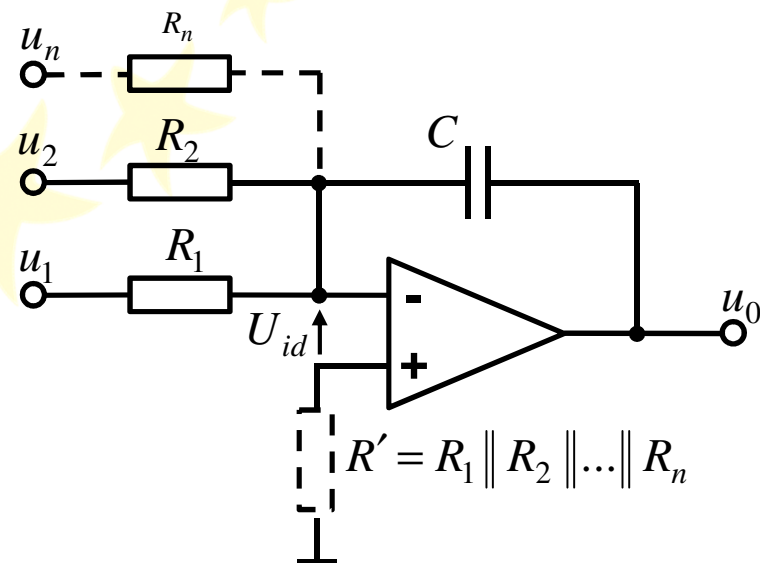
Европейски социален фонд

## 3.3

## Сумиращ интегратор

За сумиране и интегриране на няколко входни напрежения може да се използва сумиращият интегратор даден на фиг. 11. Изходното напрежение е пропорционално на интеграла от сумата на входните напрежения:

$$u_o = -\frac{1}{C} \int_0^t \left( \frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \dots + \frac{u_n}{R_n} \right) dt + U_{o(t=0)}$$



Фиг. 11. Сумиращ интегратор



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