

 **Технически университет – София**

**Факултет по електронна техника и технологии**

 **Катедра „Електронна техника”**

**Презентация № 16**

**Линейни операционни схеми. Аналогови суматори.  
Интегратори и диференциатори**

**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. Линейни операционни схеми. Дефиниция
2. Аналогови суматори
  - 2.1 Инвертиращ суматор
  - 2.2 Неинвертиращ суматор
  - 2.3 Суматор с инвертиращи и неинвертиращи входове
3. Интегратори
  - 3.1 Инвертиращ интегратор
  - 3.2 Инвертиращ интегратор с корекция
  - 3.3 Сумиращ интегратор
  - 3.4 Интегратор – усилвател
  - 3.5 Неинвертиращ интегратор
  - 3.6 Интегратор с диферециален вход
4. Диференциатори
  - 4.1 Принципна схема на диференциатор
  - 4.2 Диференциатор с корекция
5. Заключение
6. 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 Линеини операционни схеми. Дефиниция

Линейните операционни схеми са електронни схеми, при които изходният сигнал зависи по линеен закон от входния.

При тези схеми е валиден принципът на суперпозицията, което значително опростява анализа им.

Линейните операционни схеми имат изключително широко приложение в електрониката. Линеини схеми са усилвателите, суматорите, интегратори и диференциатори, генератори и др.



Европейски съюз

**ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042**

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

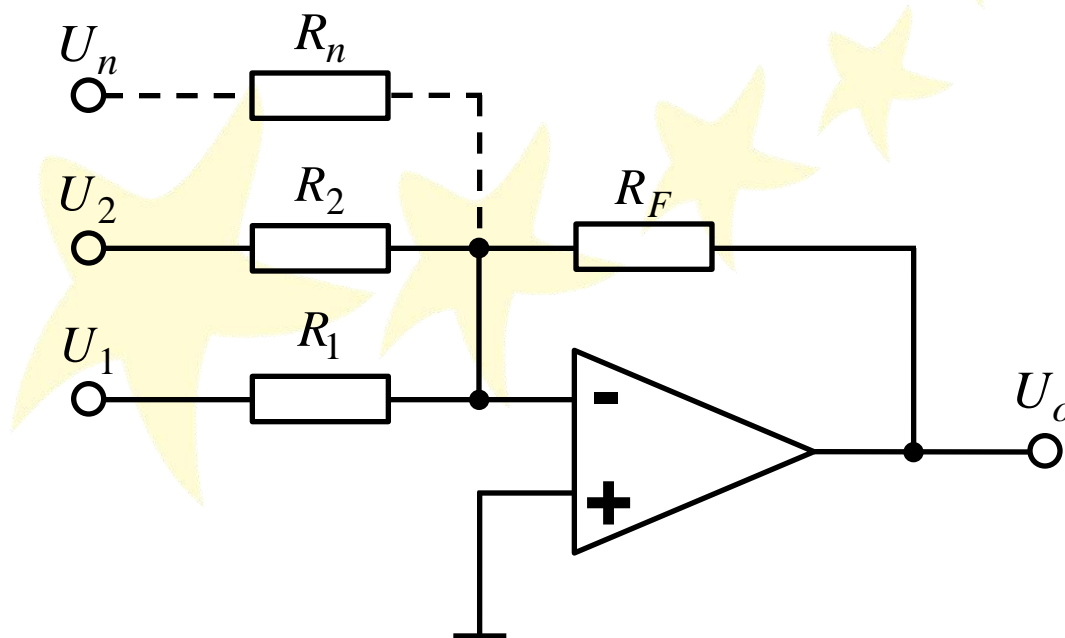
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
***Инвестира във вашето бъдеще!***



## 2 Аналогови суматори

### 2.1 Инвертиращ аналогов суматор

Схемата на инвертиращ аналогов суматор включва ОУ и мащабиращи резистори  $R_1 - R_n$  и  $R'_F$ . Схемата на инвертиращ усилвател и инвертиращ суматор са тясно свързани и първата може да се разглежда като частен случай на втората.



Фиг. 1. Схема на инвертиращ 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!*



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”**

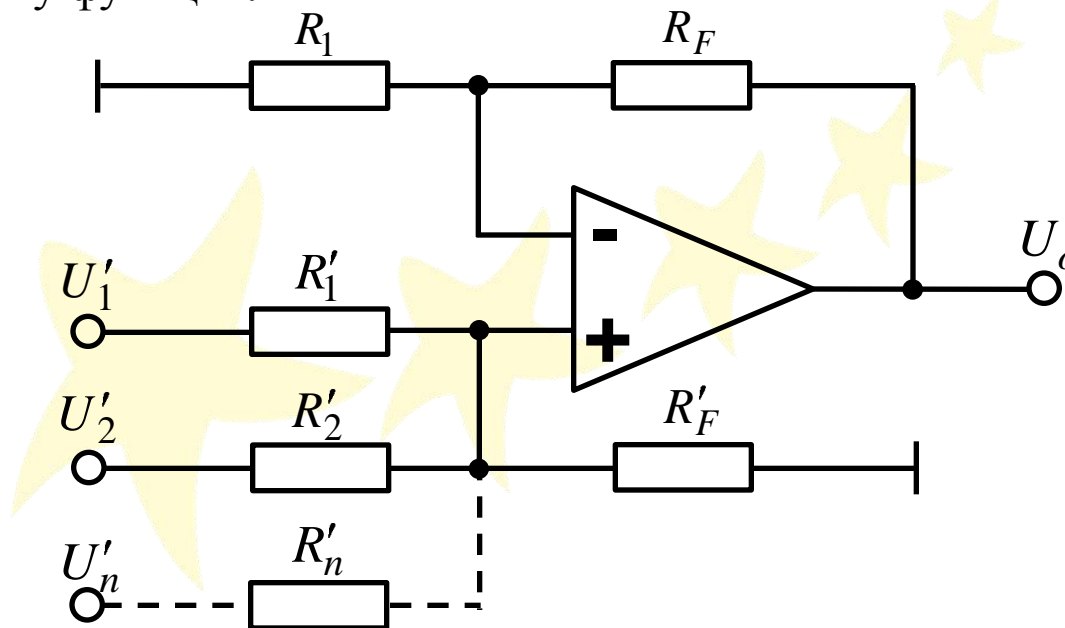
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
**Инвестира във вашето бъдеще!**



Европейски социален фонд

## 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!*



Европейски социален фонд

## 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 :

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



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

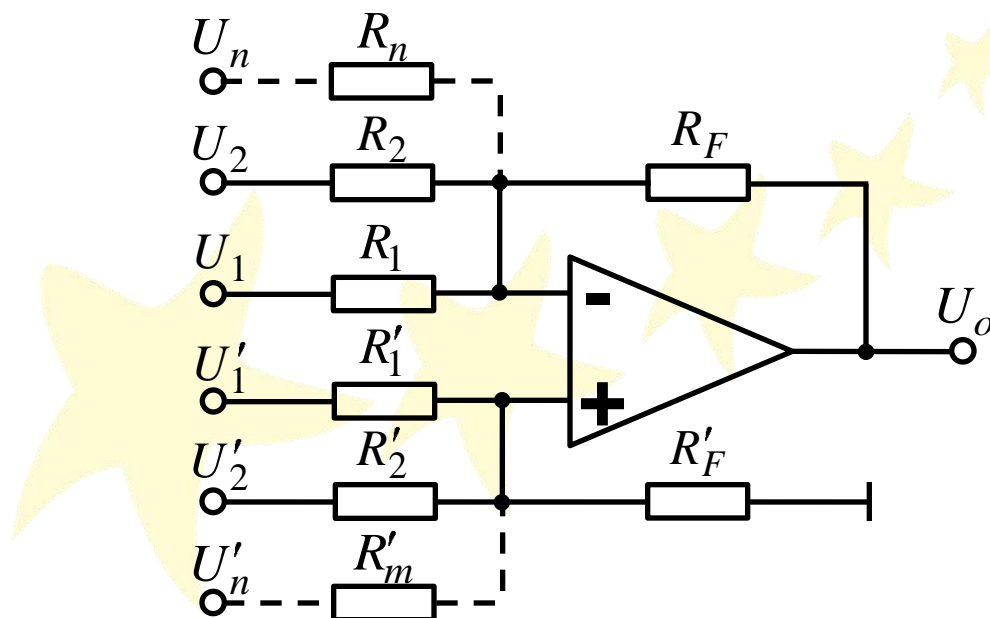
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



Европейски социален фонд

## 2.3 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



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 суматор с инвертираци и неинвертираци 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!*

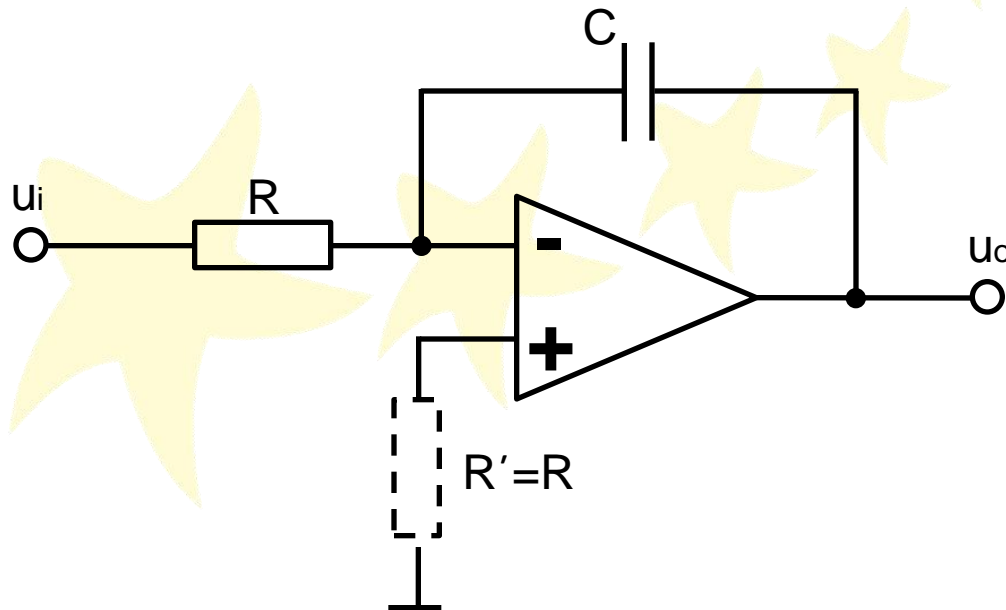


Европейски социален фонд

## 3 Интегратори

### 3.1 Инвертирац 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 инвертирац интегратор



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

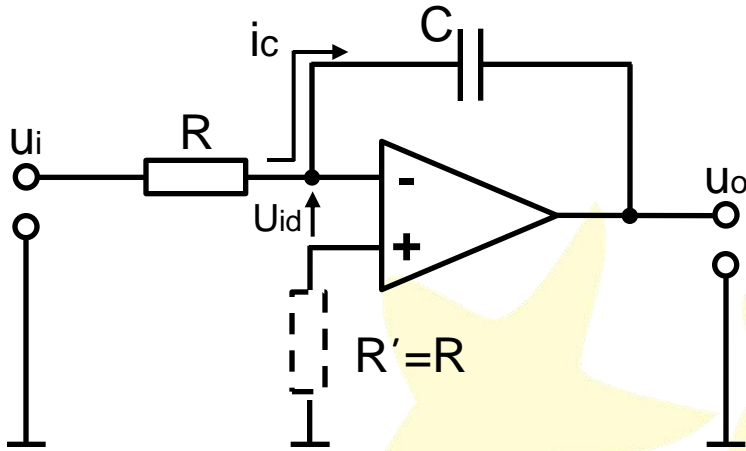
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



Европейски социален фонд

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.



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!*



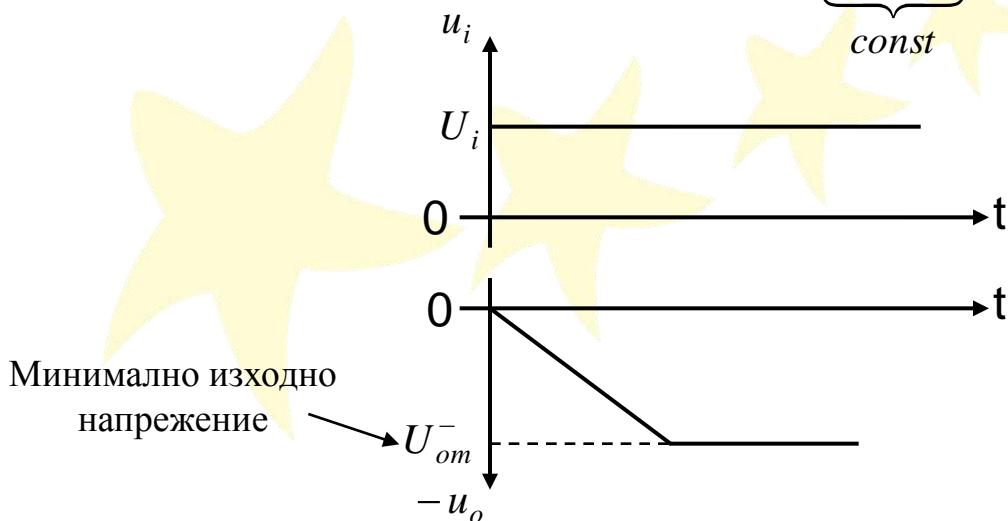
Европейски социален фонд

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  $U_{o(t=0)} = 0$ .



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!*



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

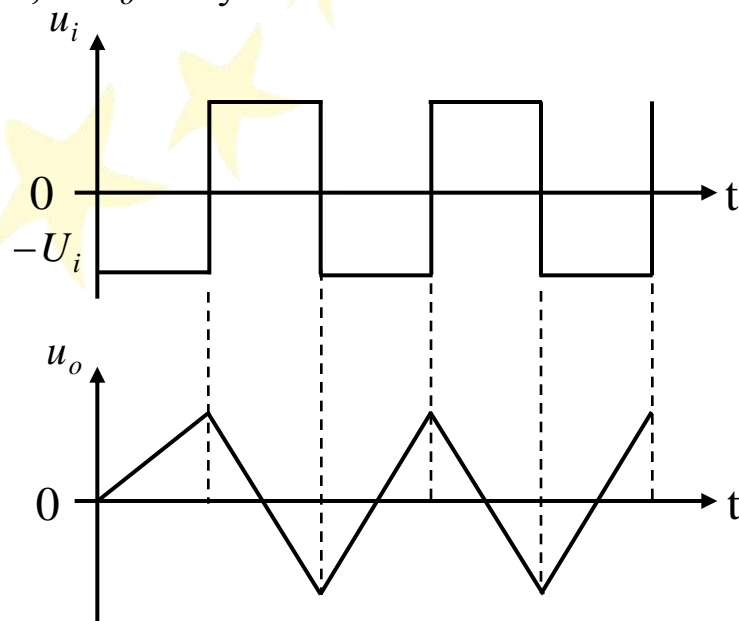
Един период на правоъгълния входен сигнал може да се опише със следното уравнение:

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

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:

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

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



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

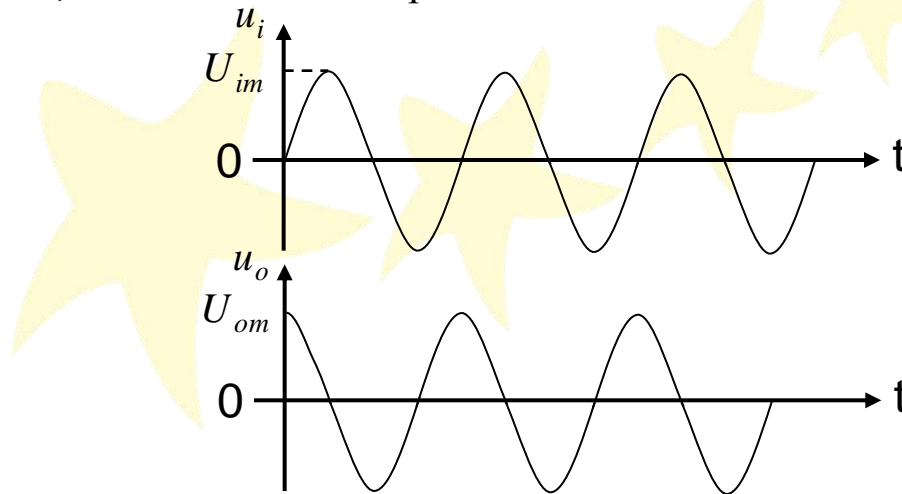


- Форма на изходното напрежение  $u_o$  при подаване на синусоидално входно напрежение

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

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

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

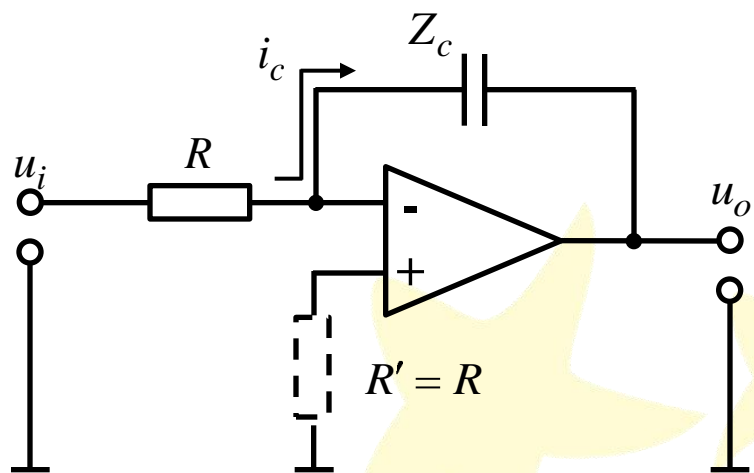
*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”*

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!*



Европейски социален фонд

## 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 модулет 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!*



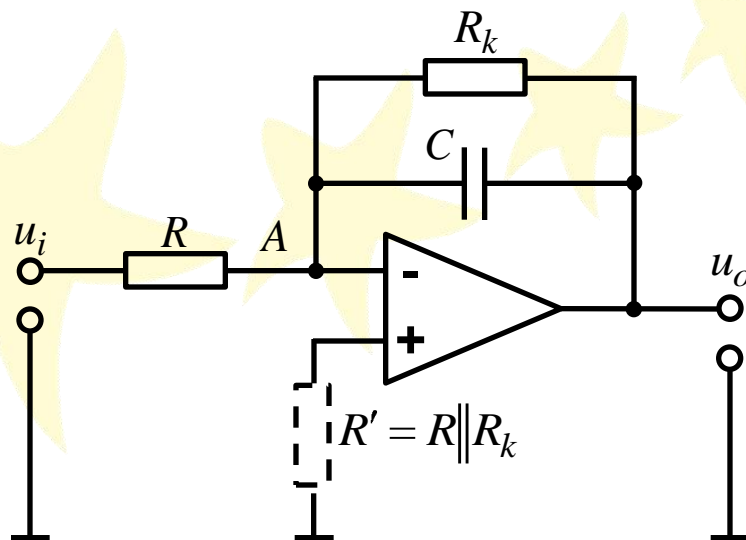
## 3.2

## 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 корегирещ 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):

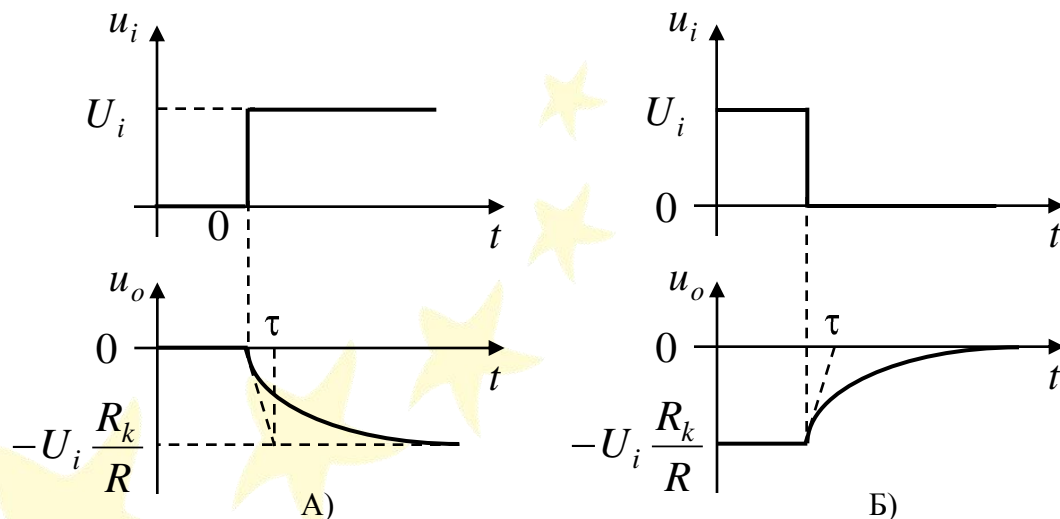
$$u_i = \begin{cases} U_i, t > 0 \\ 0, t < 0 \end{cases}$$

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

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

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

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



**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  $\frac{R_k}{R} U_i$ . 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

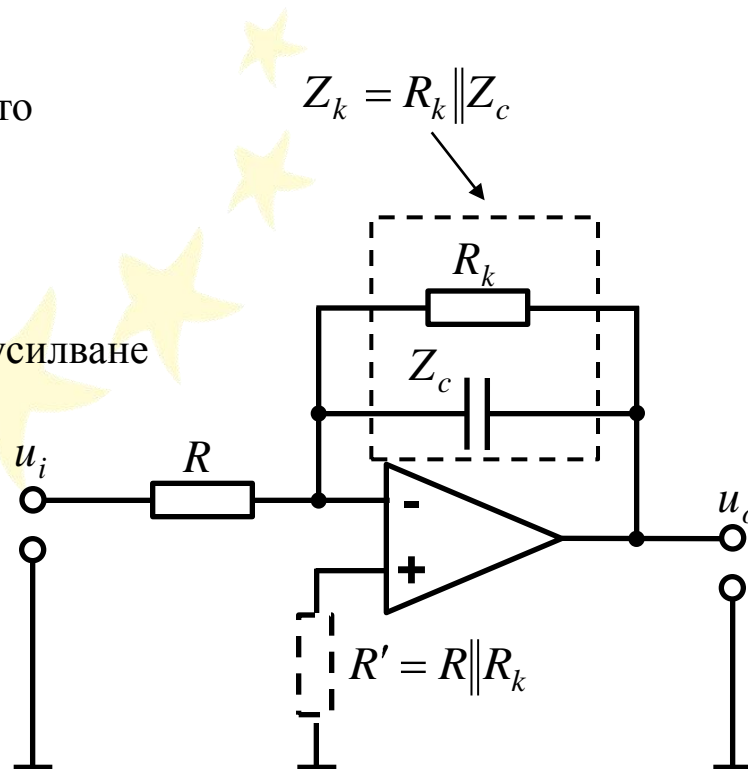
Анализ на инвертиращ интегратор с корекция в честотна област. Комплексна предавателна характеристика и амплитудно-честотна характеристика на интегратора с корекция.

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

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

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

граничната честота на интегратора.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

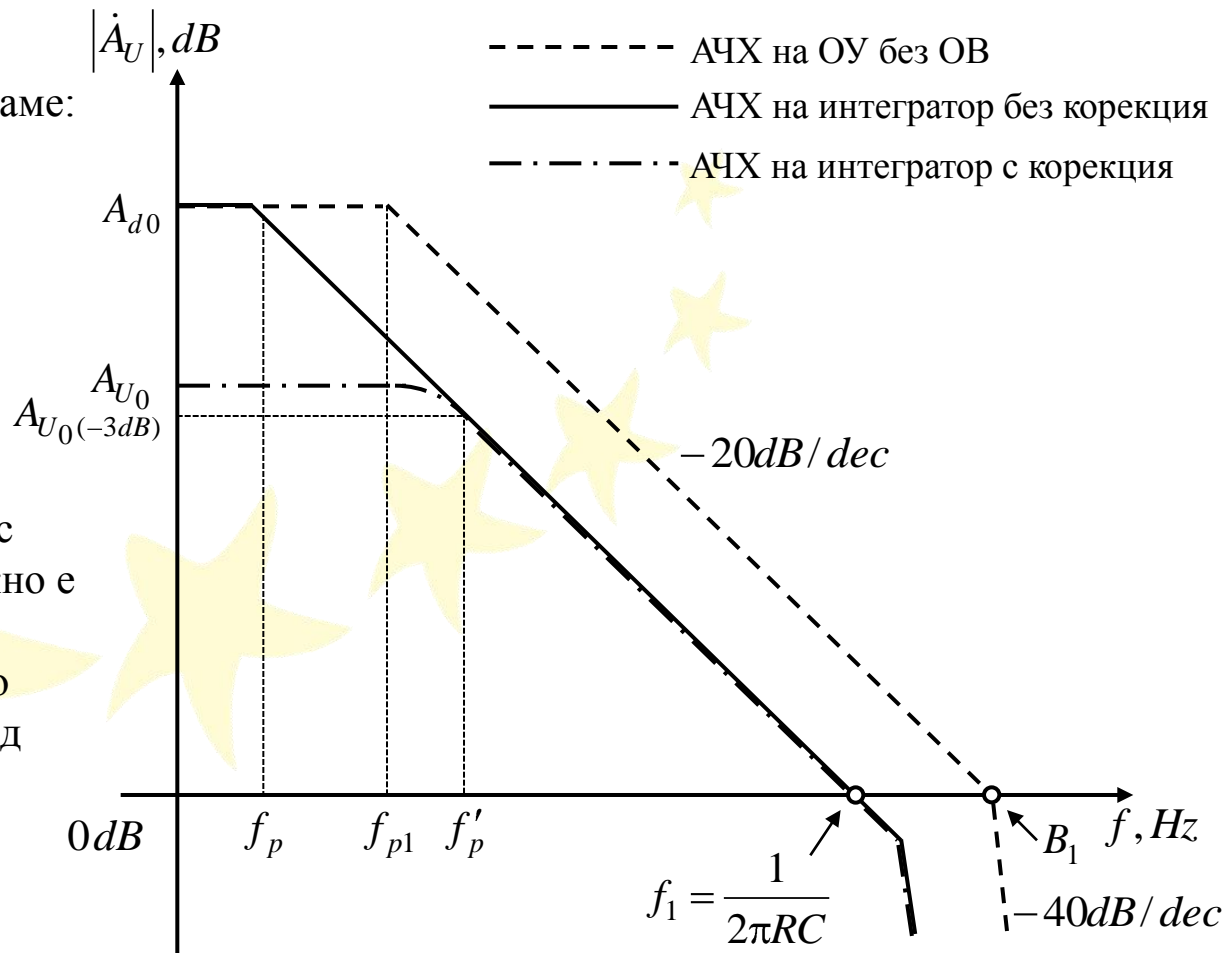
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



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!*

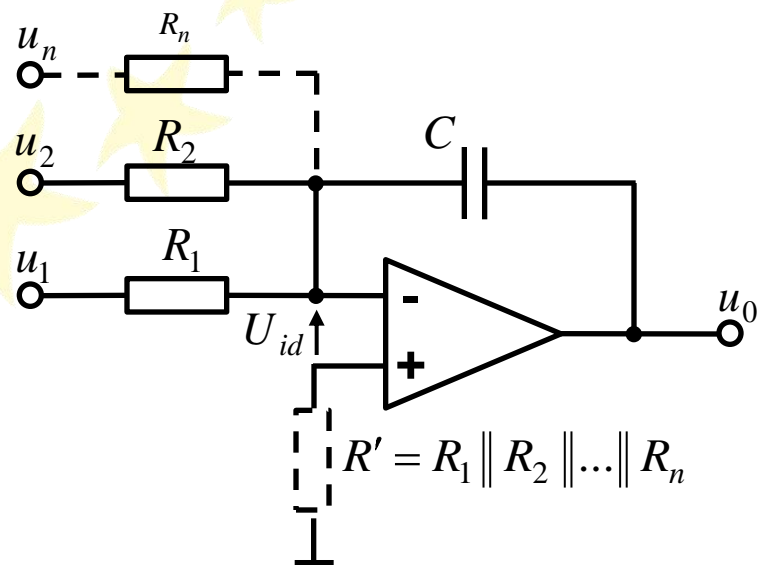


Европейски социален фонд

### 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

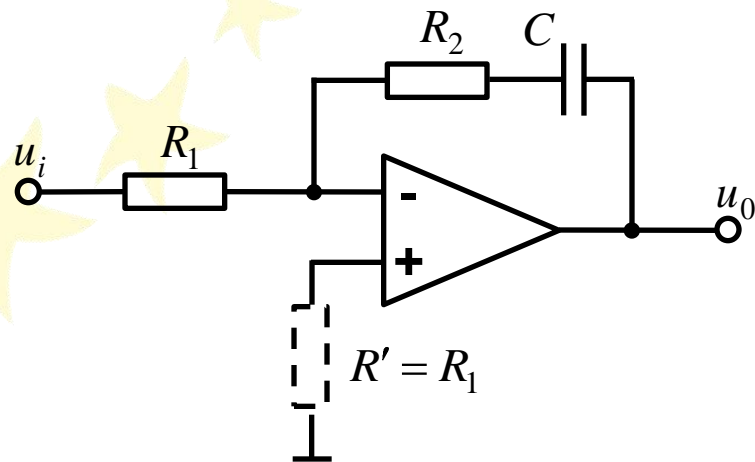
### 3.4 Интегратор - усилвател

Схемата на интегратор-усилвател е дадена на фиг. 12. Характерно за нея е, че при честота на входния сигнал много по-ниска от полюсната  $f_i \ll f'_p$  схемата работи като интегратор, а при  $f_i \gg f'_p$  като инвертиращ усилвател с коефициент на усилване  $A_F = -R_2/R_1$ . Полюсната честота може да се намери чрез израза:

$$f'_p = 1/2\pi R_2 C,$$

а изходното напрежение  $u_o$  е равно на

$$u_o = -\frac{R_2}{R_1} \left( u_i + \frac{1}{R_2 C} \int_0^t u_i dt \right) + U_{o(t=0)}.$$



Фиг. 12. Интегратор-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!*

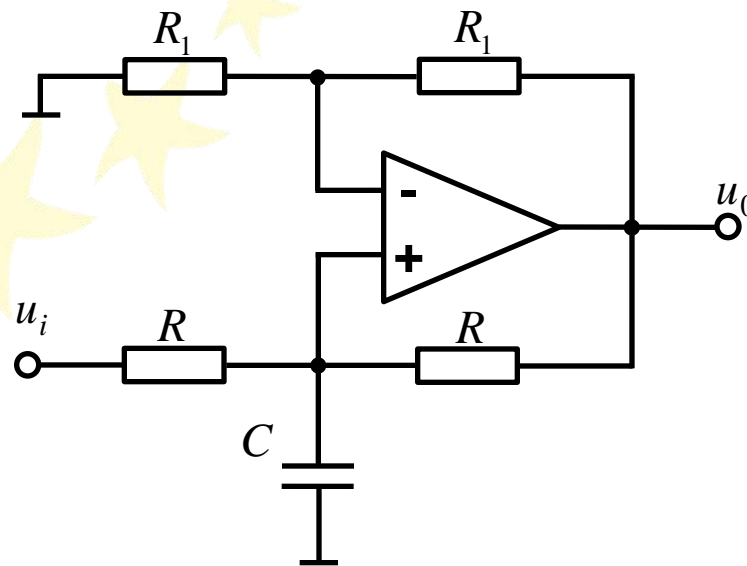


### 3.5 Неинвертиращ интегратор

За интегриране на входни сигнали без изменение на фазата между изходното и входното напрежение може да се използва схемата от фиг. 13. Всъщност схемата е обхваната, както от отрицателна, така и от положителна обратна връзка и представлява ниско-честотен филтър. Изходното напрежение се описва с израза:

$$u_o = \frac{2}{RC} \int_0^t u_i dt + U_{o(t=0)}.$$

За компенсация на тока  $I_{iB}$  е възможно да изберем  $R = R_1$ .



Фиг. 13. Неинвертиращ 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!*



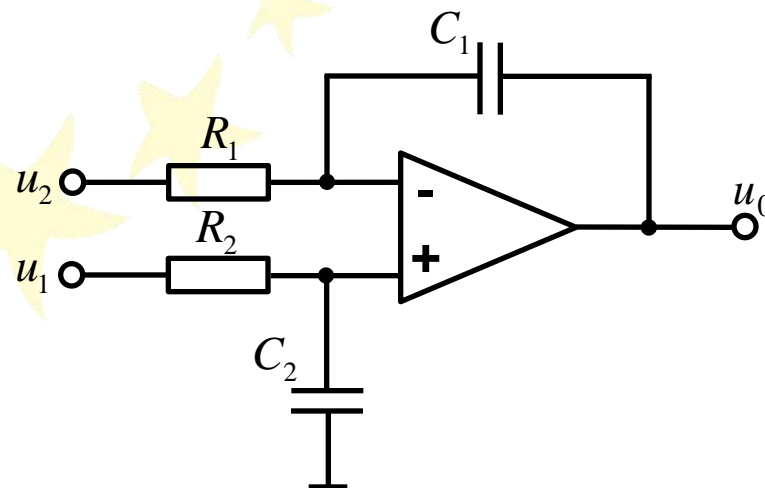
Европейски социален фонд

### 3.6 Интегратор с диференциален вход

На фиг. 14 е показана схема на интегратор с диференциален вход. При него входното напрежение се поличава като разлика между напреженията  $u_1$  и  $u_2$ . Ако изберем  $R_1 C_1 = R_2 C_2$  за изходното напрежение се получава:

$$u_o = \frac{1}{R_1 C_1} \int_0^t (u_1 - u_2) dt + U_{o(t=0)}.$$

За да се ограничи коефициентът на усилване на схемата при ниски честоти е възможно свързването на корегиращ резистор паралелно на кондензатора  $C_1$ .



Фиг. 14. Интегратор с диференциален вход



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

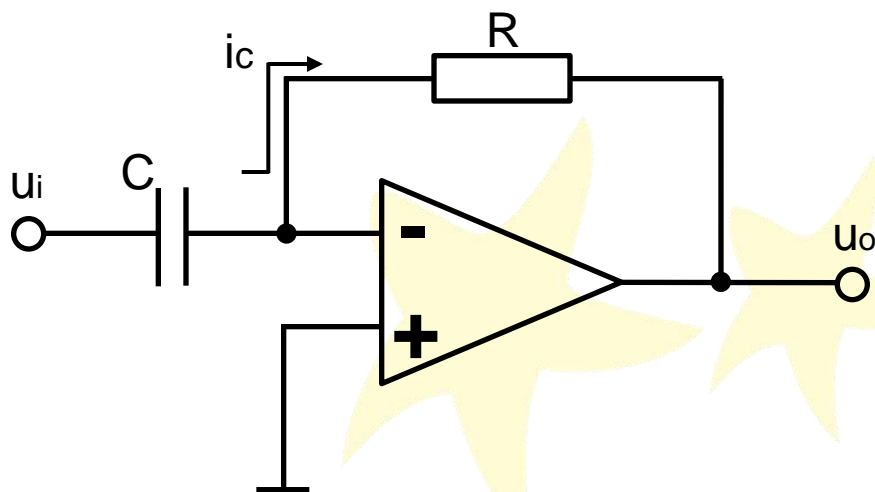
*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”*

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 Диференциатори

Диференциаторите са линейни електронни схеми, за които изходното напрежение е пропорционално на първата производна на входния сигнал. Диференциаторите се използват в схеми на електронни регулатори, за получаване на кратки импулси от сигнали с голяма продължителност, като детектори на фронт на правоъгълни сигнали и др. Принципната схема на диференциатор е дадена на фиг. 15.



Фиг. 15. Схема на диференциатор

Ако приемем, че ОУ е идеален за тока през кондензатора  $i_c$  може да запишем следните две уравнения

$$i_c = C \frac{dU_c}{dt} = C \frac{dU_i}{dt} \quad \text{и}$$

$$Ri_c + u_o = 0 \Rightarrow i_c = -\frac{u_o}{R}.$$

Тогава за изходното напрежение на диференциатора получаваме

$$u_o = -RC \frac{du_i}{dt}.$$



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!*

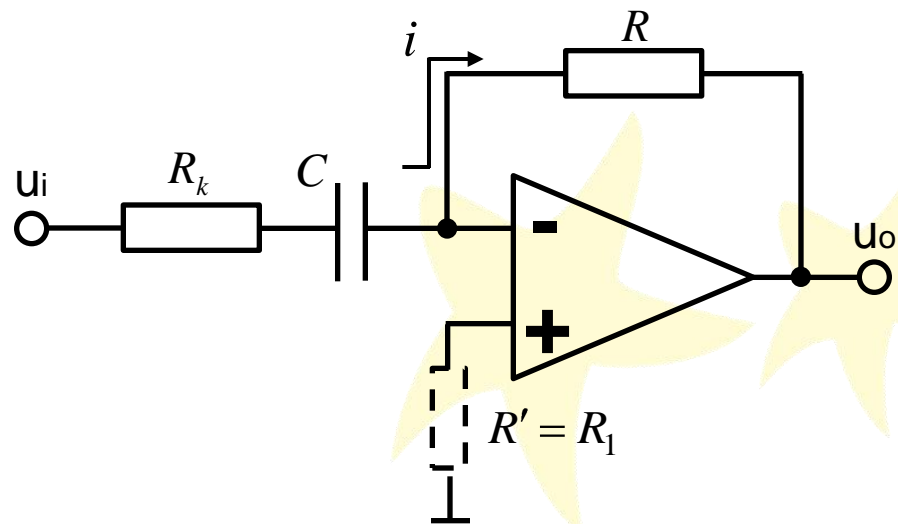


Европейски социален фонд



## 4.1 Диференциатор с корекция

При високи честоти коефициентът на усилване на диференциатора може да нарастне недопустимо много и схемата да стане нестабилна. В тази връзка към схемата е възможно да се добави корегирещ резистор  $R_k$ , който да ограничи коефициентът на усилване.



За комплексния коефициент на усилване на схемата имаме:

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

където  $Z_k = R_k + \frac{1}{j\omega C}$ ,  $A_{U_o} = \frac{R}{R_k}$

е коефициентът на усилване за високи честоти, а  $f'_p = 1/2\pi R_k C$  граничната честота на диференциатора.

Фиг. 16. Схема на диференциатор 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!*



Европейски социален фонд

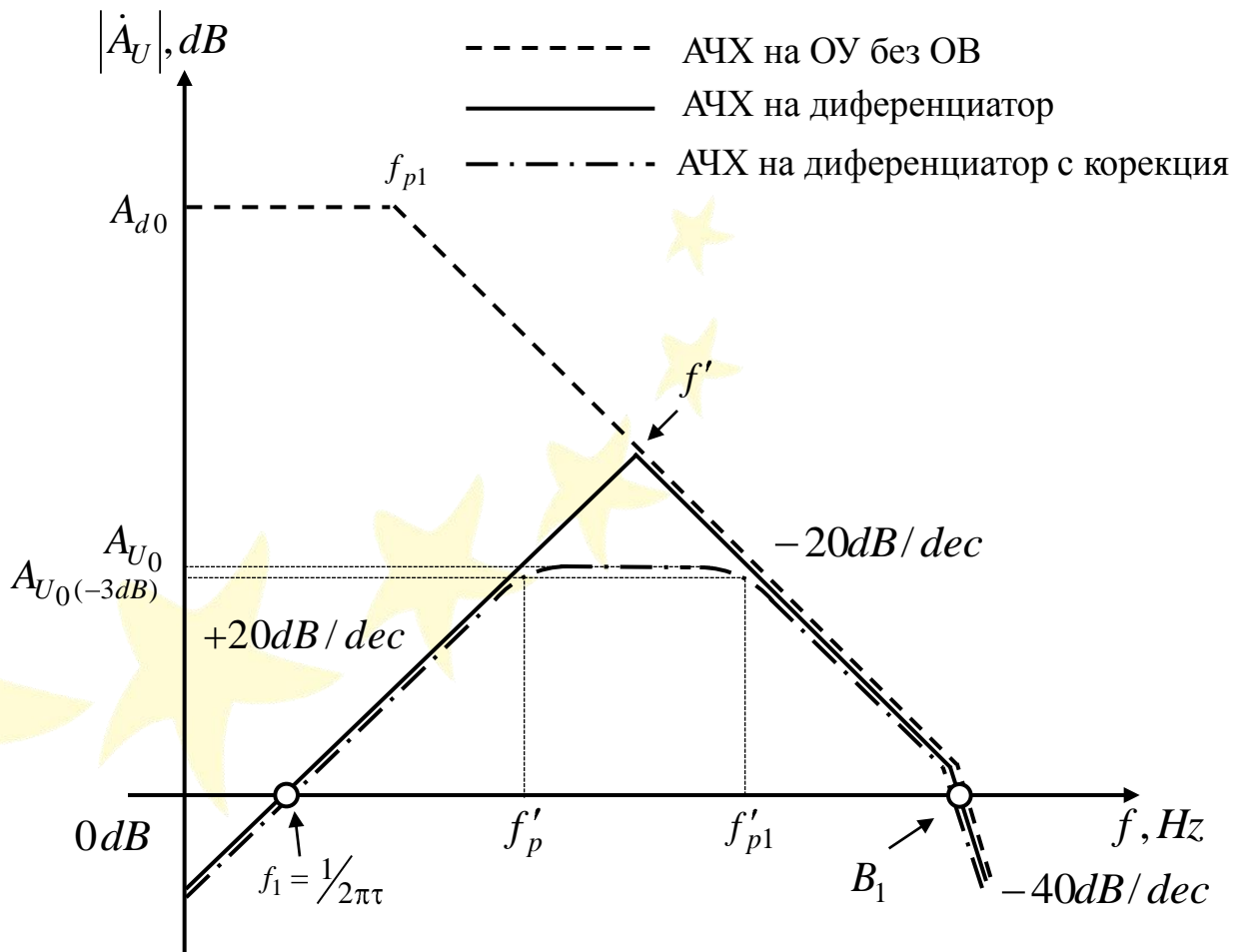
За модула на комплексния коефициент  $\dot{A}_U$  имаме

$$|\dot{A}_U| = \frac{R}{R_k} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f'_p}{f}\right)^2}} = \frac{A_{U_0}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f'_p}{f}\right)^2}}$$

Ако  $\frac{f'_p}{f} \gg 1$  (или  $f \ll f'_p$ ), тогава

$$|\dot{A}_U| \approx A_{U_0} \frac{f}{f'_p} \text{ т.е. коефициентът на}$$

усилване е правопрпорционален на честотата.



**Фиг. 17.** АЧХ на диференциатор 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!*



### 4.1.1 Анализ на диференциатор с корекция във времева област

Анализът във времева област се извършва, когато на входа на схемата се подаде единичен скок на напрежението (фиг. 18). Изходното напрежение може да се намерим чрез следните уравнения:

$$u_i = iR_k + \frac{1}{C} \int u_o dt \quad \text{и}$$

$$i = -u_o / R.$$

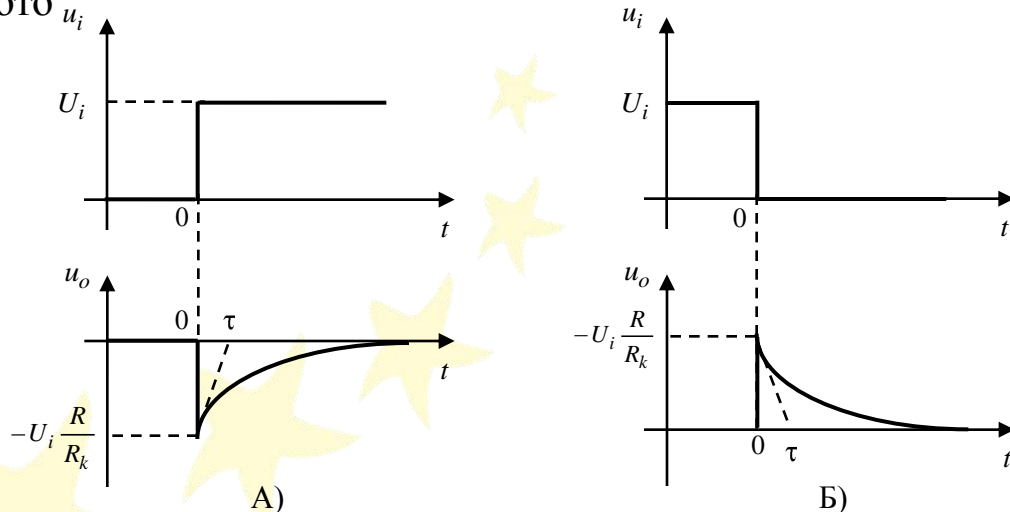
От двете уравнения се намира:

$$u_i = -\frac{R_k}{R} u_o - \frac{1}{RC} \int u_o dt.$$

За  $u_i = 0V$  се получава следното диференциално уравнение

$$R_k C \frac{du_o}{dt} + u_o = 0 \quad \text{чието решение е:}$$

$$u_o(t) = U_{om} e^{-t/R_k C}.$$



**Фиг. 18.** Форма на изходния сигнал на диференциатор при нарастващ А) и спадащ Б) фронт на входния сигнал.

Стойността на  $U_{om}$  може да се определи ако се допусне, че в момента  $t=0$  входното напрежение  $u_i = U_i$ , тогава  $U_{om} = -R/R_k U_i$ . Всъщност първоначално  $u_o = U_{om}$ , след което експоненциално се стреми към 0 (фиг. 9 Б). Времето за установяване се определя от  $\tau = R_k C$ . Времето-константата  $\tau$  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

Линейните операционни схеми намират приложение в електроника като аналогови устройства за извършване на различни математически операции като събирана, изваждана, интегриране, диференциране и др., от където идва и името им. С навлизането на цифровите устройства в областта на математическата обработка тяхното значение намалява . Все пак те намират широко приложение като честотни филтри, логаритмични усилватели 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

## 6 Литература

### Основна:

1. Пандиев, И., Л. Донева, Д. Стаменов. Аналогова схемотехника – II, глава 1, стр. 7-21,. София, Издателство на ТУ-София, 2008.

### Допълнителна:

1. Tietze, V., Ch. Schenk. Electronic circuits. 2nd Edition, chapter 5,

### Интернет адреси:

1. Официален сайт на дисциплината аналогова схемотехника – [http://fett.tu-sofia.bg/analog\\_circuits/](http://fett.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!*

