

Теория на електронните схеми

Синтез на активни филтри:

Метод на аналоговото моделиране за реализация на активни филтри

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

- Реализация – подходи
- Метод на аналоговото моделиране
- Функционални възли за реализация на АФ
- Практически 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!



Образователни цели:

След изучаването на този раздел вие ще трябва да можете:

- Да формулирате същността на реализацията
- Да преобразувате преподавателната функция чрез въвеждане на променливи на състоянието
- Да синтезирате схемата на универсален активен филтър, изграден от суматори и интегратори



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!



Реализация

- Вторият етап на синтеза - реализацията, е процес на съпоставяне на апроксимираната преподавателна функция със съвкупността от възможните схемни решения.
- Реализацията на електронни схеми фактически е свързана с определянето на топологични структури наред с решаване на задачата на параметричната реализация.
- Съвременната представа за реализация е свързана с определянето на най - добрите схеми, т. е. с решаването на задачата на оптималната топологична и параметрична оптимизация.



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!



Реализация – подходи

Съществуват два основни подхода за реализация.

- При **първия подход** чрез общите методи за анализ на електронни схеми от зададената преподавателна функция се получават системи от уравнения. Тяхното решаване води до определяне на схемата. Характерно за този подход е това, че броят на операционните усилватели, начинът и мястото на включването не се задават предварително, а се получават в резултат на процедурата
- Към тази група методи спадат реализациите с използване на сигнални графи, на нулатори и норатори, както и методът на променливи на състоянието



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!



Реализация – подходи

- При *метода на сигналните графи* от зададената предавателна функция се съставя сигнален граф. По -нататък той се преобразува и от него се получава търсената схемна реализация.
- При *синтеза с нулатори* от зададената предавателна функция се съставят уравнения за състоянието на схемата, въз основа на които се посочва директно мястото на свързване на нулаторите, т. е. на операционните усилватели.



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!



Реализация – подходи

- При *метода на променливи на състоянието*, който се нарича още метод на аналоговото моделиране, зададената преподавателна функция по напрежение се реализира с помоща на интегратори и суматори по известните от аналоговата схемотехника методи.
- Всеки интегратор и суматор се получава на основата на операционен усилвател. Този подход се отличава сред останалите със своята гъвкавост и универсалност
- Характерно за методите на първия подход е **еднократността** в реализацията на пълната преподавателна функция.



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!



Реализация – подходи

- **Вторият подход** се основава на поетапната реализация на елементарните преподавателни функции, които са съставляващите компоненти на пълната преподавателна функция от висок ред.
- *Каскадният метод* е най - често използваният метод за реализация на активни РС - схеми.
- Характерно за него е каскадното свързване на елементарни звена от първи и втори ред, които не взаимодействат по между си.
- Тези схеми се реализират чрез операционни усилватели, обхванати от вериги на обратни връзки с честотнозависими елементи
- Оптимизирани в практиката решения са включени в *професионалните системи* за автоматизиран синтез на АФ



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!



Метод на аналоговото моделиране (Метод с променливи на състоянието)

- Методът на аналоговото моделиране се основава на въвеждането в описанието на операторната предавателна функция на променливите на състоянието и реализацията им чрез интегрални схеми.
- Понятието променливи на състоянието идва от променливите, разглеждани в теорията на пространство на състоянието - метод, който се използва за анализ на електронни схеми.
- Както е известно от теорията, енергийното състояние на схемите се характеризира чрез токовете и напреженията в реактивните елементи - капацитети и индуктивности.



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

Метод на аналоговото моделиране (Метод с променливи на състоянието)

- Именно тези величини често се използват като зависими от времето параметри (променливи на състоянието) в системата диференциални уравнения, описващи схемата.
- Системата на пространството на състоянието, преобразувана по Лаплас спрямо времето, води до уравнения на предавателните характеристики, които са функции на комплексната променлива p .



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

Метод на аналоговото моделиране (Метод с променливи на състоянието)

- Въвеждането на променливи на състоянието в предавателната функция се извършва чрез умножаване на числителя и знаменателя с $\frac{x}{p^n}$, където n е реда на функцията, а x най-често е равно на 1.
- Методът на променливи на състоянието се илюстрира добре със следващия пример за съставянето на топологична структура по известна от апроксимацията инвертираща лентова функция.



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

Метод на аналоговото моделиране

Пример

Дадена е лентовата предавателна функция от втори ред:

$$T(p) = -H \frac{p}{p^2 + b_1 p + b_0}$$

- Задачата е еквивалентно да преобразуваме тази функция чрез въвеждане на променливи на състоянието и да синтезираме схемата за реализация



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

Метод на аналоговото моделиране

Пример

1. Умножаваме числителя и знаменателя с $\frac{x}{p^2}$

$$T(p) = \frac{U_{изх}}{U_{вх}} = -H \frac{p}{p^2 + b_1 p + b_0}$$

$$\frac{x}{p^2}$$

$$\frac{x}{p^2}$$

$$T(p) = \frac{U_{изх}}{U_{вх}} = -H \frac{\frac{x}{p}}{x + b_1 \frac{x}{p} + b_0 \frac{x}{p^2}}$$



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!



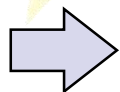
Европейски социален фонд

Метод на аналоговото моделиране

Пример

$$T(p) = \frac{U_{изх}}{U_{вх}} = -H \frac{\frac{x}{p}}{x + b_1 \frac{x}{p} + b_0 \frac{x}{p^2}}$$

2. Представяме функцията с две уравнения, които съответстват на числителя и знаменателя:



**В
комплексна
област:**

$$U_{изх} = -H \frac{x}{p}$$

$$x = U_{вх} - b_1 \frac{x}{p} - b_0 \frac{x}{p^2}$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

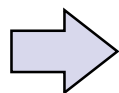
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Метод на аналоговото моделиране

Пример



**Във
времева
област:**

$$\begin{array}{l} x \rightarrow x(t) \\ \frac{x}{p} \rightarrow \int x dt \\ \frac{x}{p^2} \rightarrow \int \left[\int x dt \right] dt \end{array}$$



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!

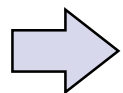


Европейски социален фонд

Метод на аналоговото моделиране

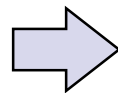
Пример

Във времева област:



$$\left| \begin{array}{l} x \rightarrow x(t) \\ \frac{x}{p} \rightarrow \int x dt \\ \frac{x}{p^2} \rightarrow \int \left[\int x dt \right] dt \\ u_{\text{ИЗХ}}(t) = -H \int x(t) dt \end{array} \right.$$

В комплексна област:



$$\left| \begin{array}{l} U_{\text{ИЗХ}} = -H \frac{x}{p} \\ x = U_{\text{ВХ}} - b_1 \frac{x}{p} - b_0 \frac{x}{p^2} \end{array} \right.$$

$$x(t) = u_{\text{ВХ}}(t) - b_1 \int x(t) dt - b_0 \int \int x(t) dt dt$$



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

Метод на аналоговото моделиране

Пример

$$U_{изх} = -H \frac{x}{p}$$

$$x = U_{вх} - b_1 \frac{x}{p} - b_0 \frac{x}{p^2}$$

3. Анализът на уравненията в контекста на реализацията на активен филтър води до следните разсъждения:

- Разделянето с комплексната променлива ***p*** означава ***интегриране*** във времева област или включване на ***интегратор*** в схемната реализация
- ***Алгебричното сумиране*** на участващите във второто уравнение величини може да бъде изпълнено от ***аналогов суматор***



Европейски съюз

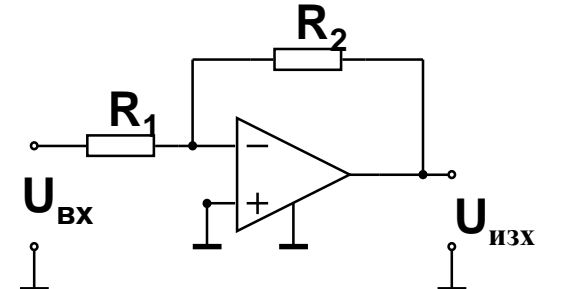
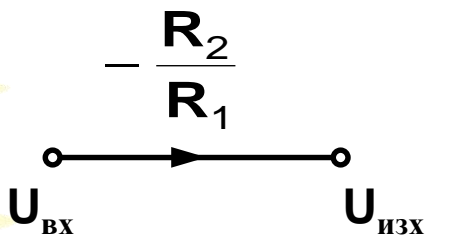
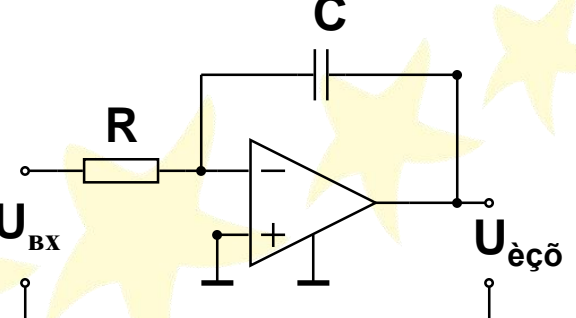
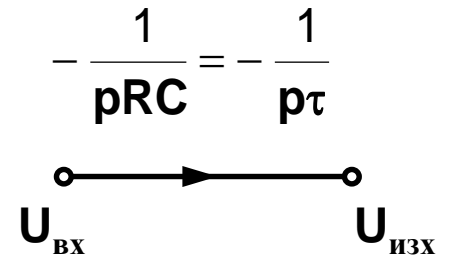
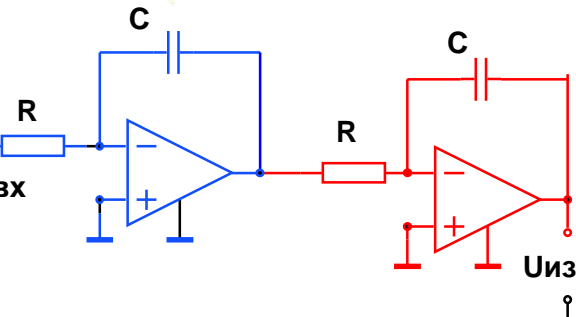
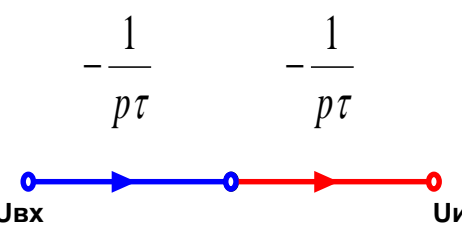
ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„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

Пространство на състоянията	Времева област	Схема	Предавателна функция
x	$x(t)$		
$\frac{x}{p}$	$\int x dt$		
$\frac{x}{p^n}$	$\int(\int x dt) dt$		

ПРОЕКТ BG051PO001 4.3.04 0042



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!



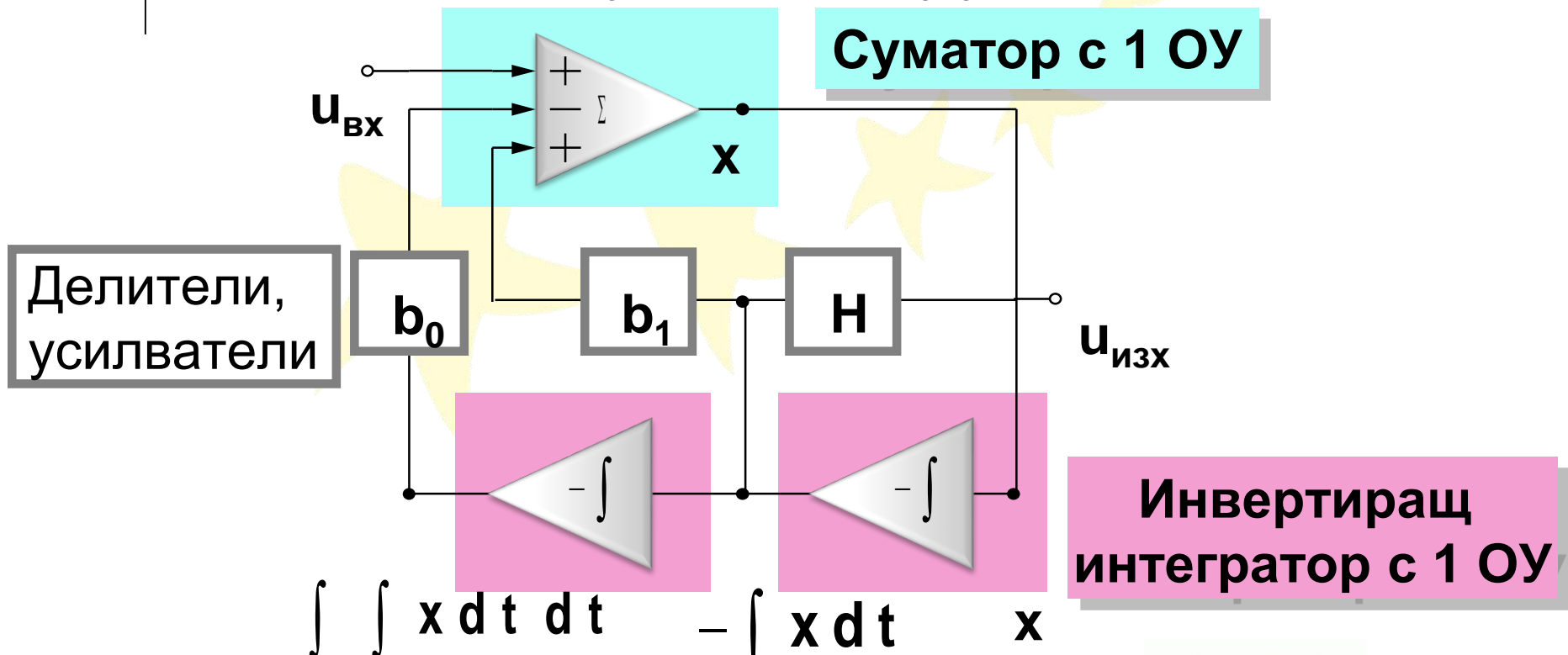
Европейски социален фонд

Метод на аналоговото моделиране: Пример

4. Синтез на топологичната структура:

$$u_{\text{ИЗХ}}(t) = -H \int x(t) dt$$

$$x(t) = u_{\text{ВХ}}(t) - b_1 \int x(t) dt - b_0 \iint x(t) dt dt$$



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

Метод на аналоговото моделиране: Пример

- Следователно, известната от етапа апроксимация предавателна функция - K_U , може да бъде реализирана чрез:

Функционалните възли

Суматор

Интегратор

Усилвател/
делител



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

Метод на аналоговото моделиране: Пример

Въвеждаме на променливи на състоянието

$$T(p) = K_U = \frac{U_{изх}}{U_{вх}} = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_1 p + b_0}$$

$$\frac{x}{p^n}$$

$$\frac{x}{p^n}$$

и предавателната функция има вида:

$$T(p) = \frac{U_{изх}}{U_{вх}} = \frac{a_n x + a_{n-1} \frac{x}{p} + \dots + a_1 \frac{x}{p^{n-1}} + a_0 \frac{x}{p^n}}{b_n x + b_{n-1} \frac{x}{p} + \dots + b_1 \frac{x}{p^{n-1}} + b_0 \frac{x}{p^n}}$$



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!



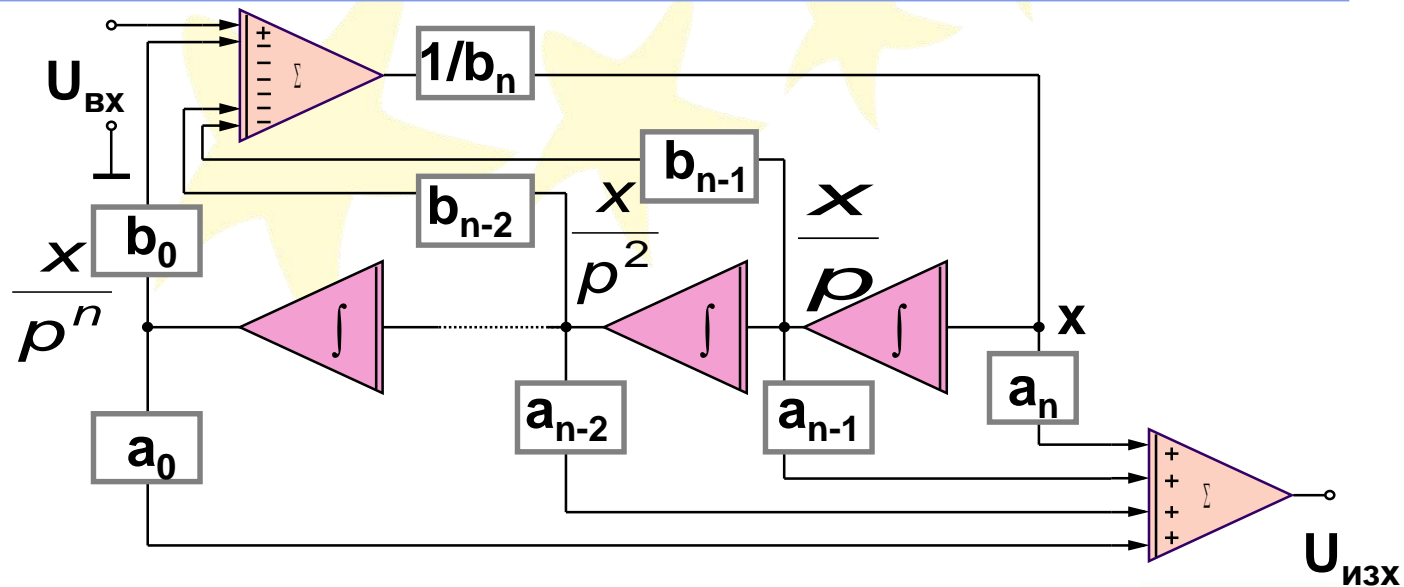
Европейски социален фонд

Метод на аналоговото моделиране: Пример

Решение на системата по метода на аналоговото моделиране:

$$b_n x = U_{вх} - b_{n-1} \frac{x}{p} - \dots - b_1 \frac{x}{p^{n-1}} - b_0 \frac{x}{p^n}$$

$$U_{изх} = a_n x + a_{n-1} \frac{x}{p} + \dots + a_1 \frac{x}{p^{n-1}} + a_0 \frac{x}{p^n}$$



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!

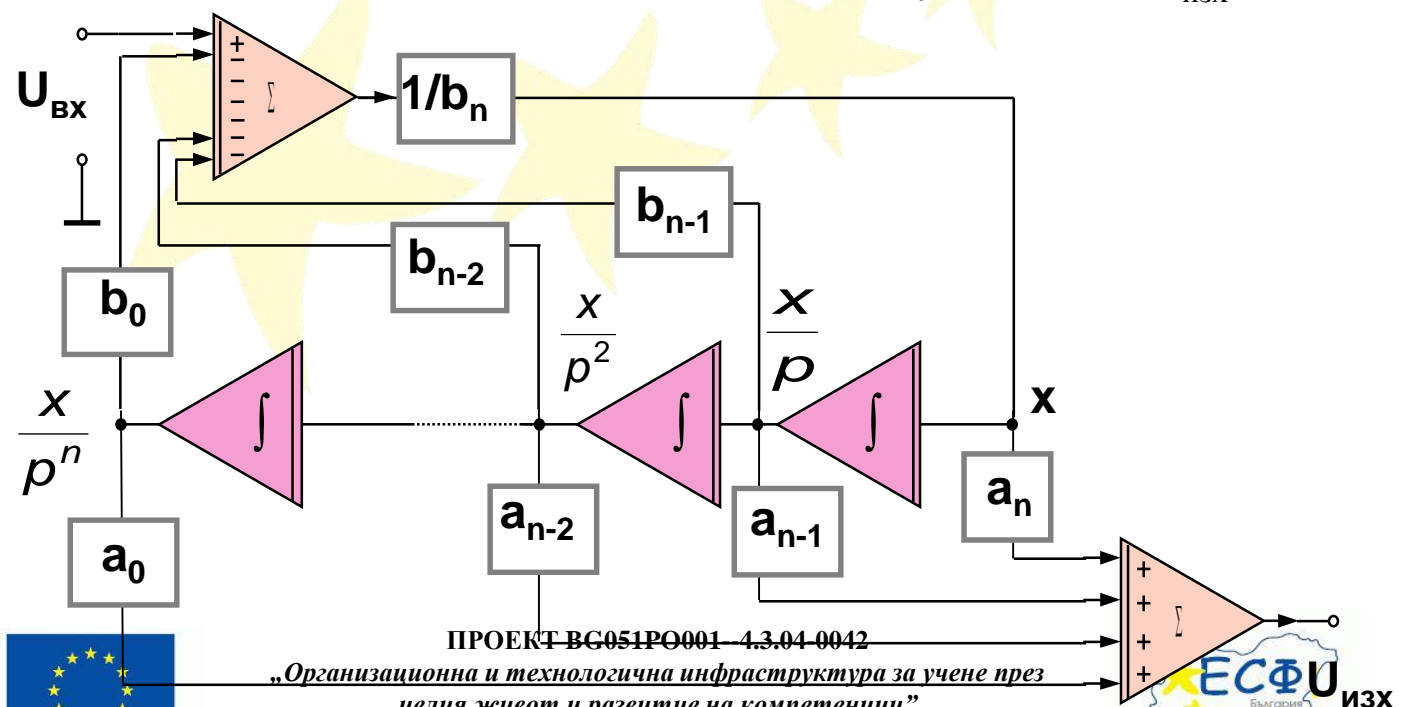


Европейски социален фонд

$$b_n x = U_{\text{вх}} - b_{n-1} \frac{x}{p} - \dots - b_1 \frac{x}{p^{n-1}} - b_0 \frac{x}{p^n}$$

$$U_{\text{изх}} = a_n x + a_{n-1} \frac{x}{p} + \dots + a_1 \frac{x}{p^{n-1}} + a_0 \frac{x}{p^n}$$

Анализът на двете уравнения, води до извода, че за реализацията на функцията $T(p)$ са необходими n интегратора (за членовете $\frac{x}{p}$, $\frac{x}{p^n}$). Дясната част на първото уравнение се реализира с аналогов суматор, на чиито не инвертиращ вход се подава $U_{\text{вх}}$, а всички останали сигнали с отрицателни знаци се подават на инвертиращите входове. Аналогично, чрез втори суматор, на който се използват само не инвертиращите входове за да се реализира дясната част на второто уравнение за получаване на $U_{\text{изх}}$.



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!



Метод на аналоговото моделиране: Пример

$$b_n x = U_{вх} - b_{n-1} \frac{x}{p} - \dots - b_1 \frac{x}{p^{n-1}} - b_0 \frac{x}{p^n}$$

$$U_{изх} = a_n x + a_{n-1} \frac{x}{p} + \dots + a_1 \frac{x}{p^{n-1}} + a_0 \frac{x}{p^n}$$

- Членовете x/p_n се реализират чрез последователно интегриране, при което за реализация на функцията $T(p)$ са необходими n интегратора.
- Дясната част на първото уравнение се реализира с един суматор, на който за $U_{вх}$ се използва единия неинвертиращ вход, а всички останали входове са инвертиращи, за да се получат отрицателните членове
- По аналогичен начин чрез втори суматор с неинвертиращи входове се реализира зависимостта за $U_{изх}$ във второто уравнение



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

Метод на аналоговото моделиране: Пример

- Следователно за реализиране на преподавателната функция от n - ред са необходими общо **$n+2$ операционни усилвателя**
- Реализацията на схеми по метода с променливи на състоянието води до появата на голям брой ОУ
- От гледна точка на съвременните технологии за производство на интегрални схеми, често се оказва, че няма смисъл да се минимизира броят на ОУ при синтез на АФ.
- Затова ако реализацията на схеми с няколко ОУ се окаже, че може да осигури по - добри характеристики, тя ще бъде предпочетена в сравнение с реализациите с един операционен усилвател
- Общо реализациите по метода с променливи на състоянието, се характеризират с изключителна гъвкавост, имат добри характеристики и ниска чувствителност.



Европейски съюз

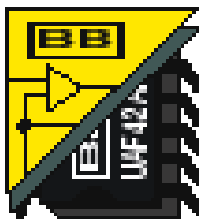
ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

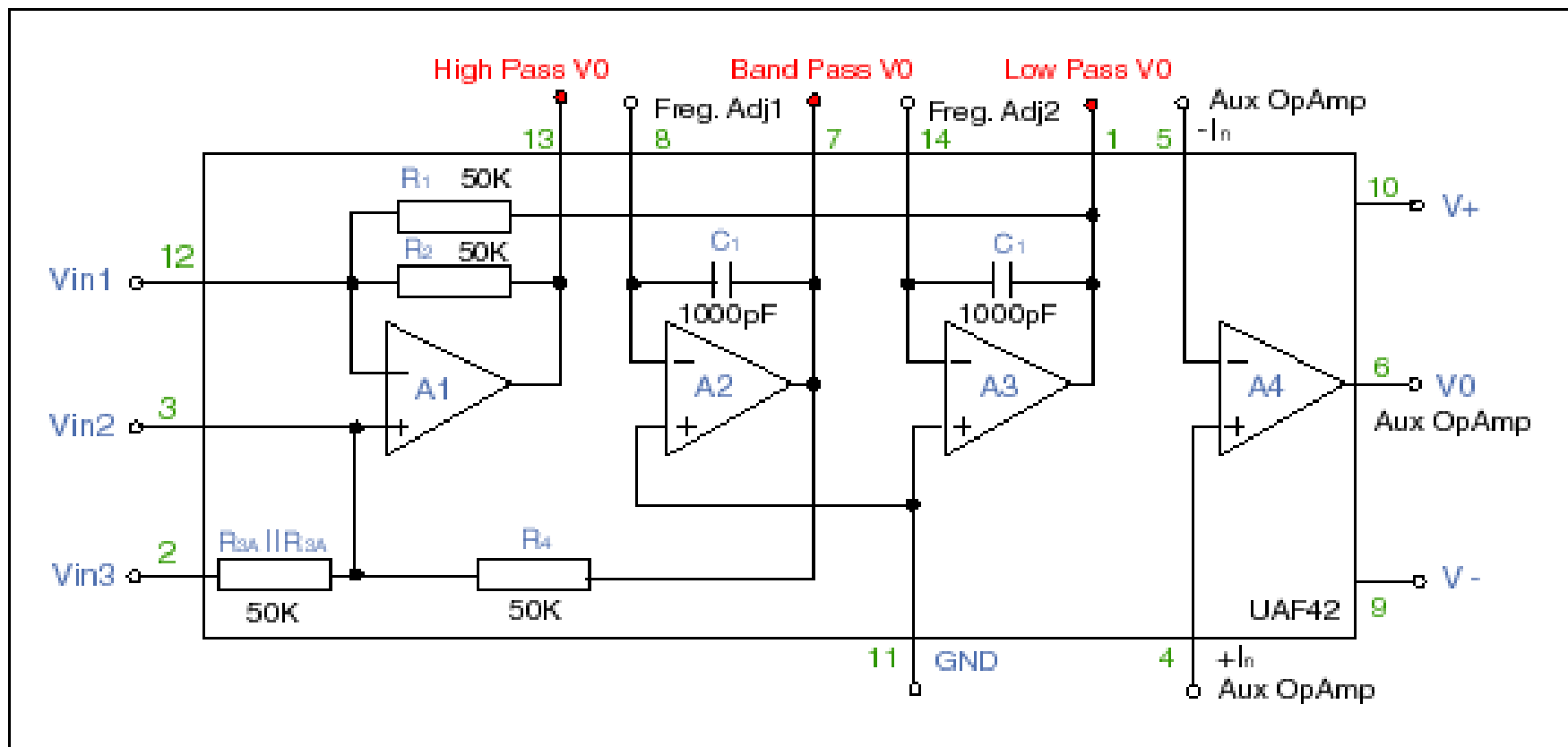
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд



Практическа реализация: Универсален активен филтър интегриран върху чип (интегрална схема UAF42 Burr-Brown)



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!



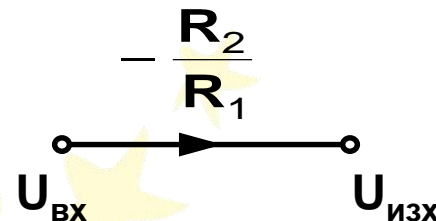
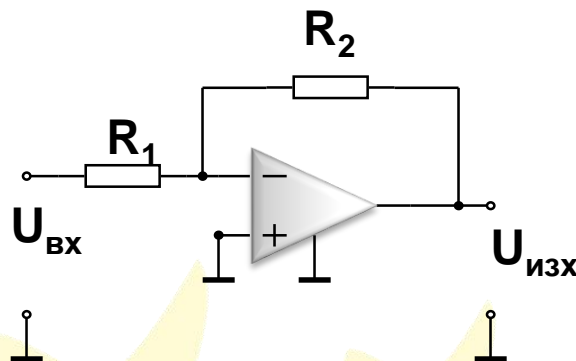
Европейски съюз



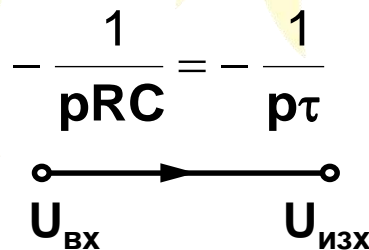
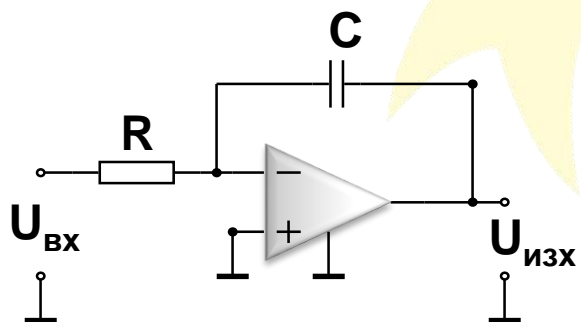
Европейски социален фонд

Основни функционални възли

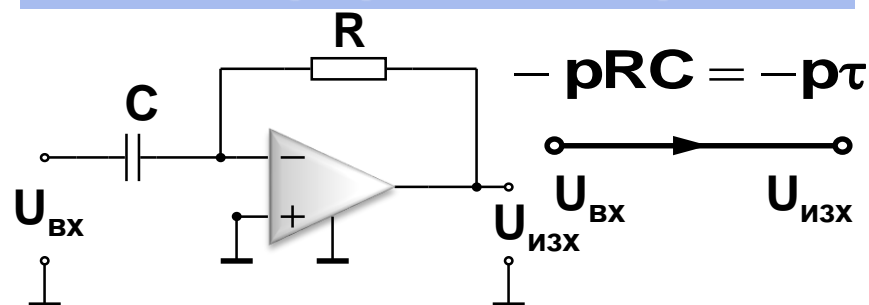
Инвертиращ усилвател



Инвертиращ интегратор



Инвертиращ дифференциатор



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

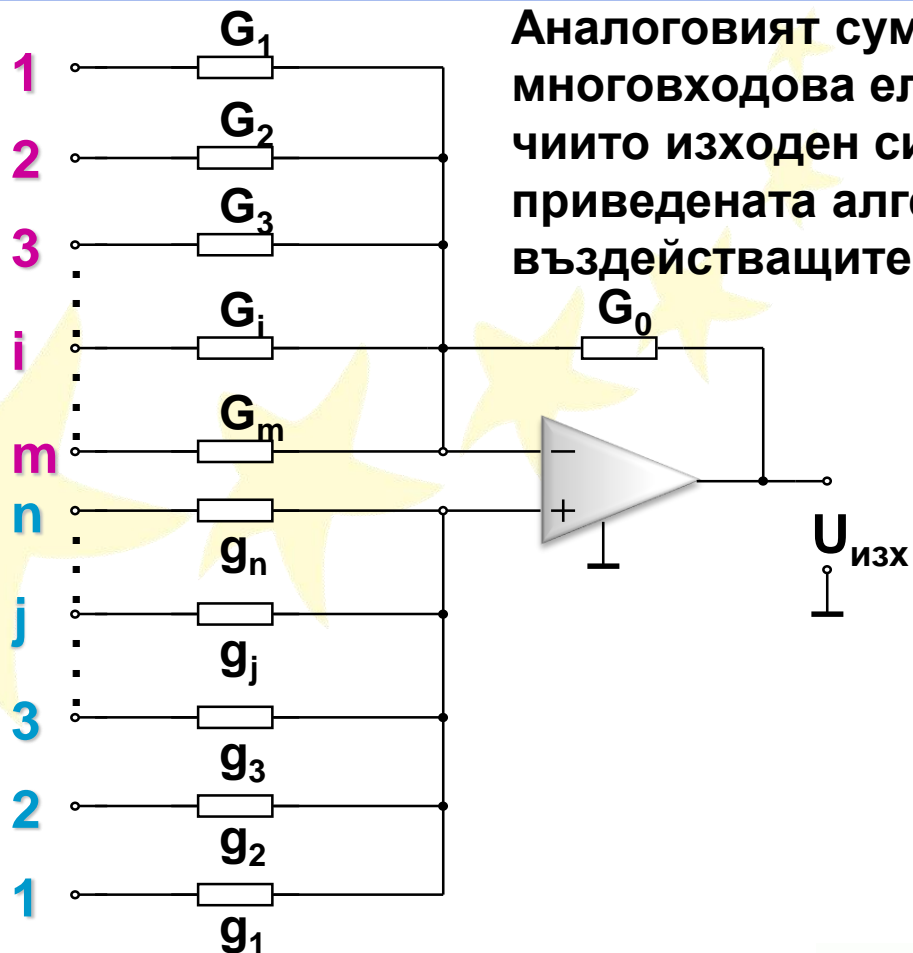
Основни функционални възли

Суматор

Многовходова
схема:

m - инвертиращи
входове

n -неинвертиращи
входове



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

Суматор

- Многовходовият суматор се анализира по метода на възловите напрежения в съчетание с метода на суперпозицията
- Тъй като суматорът има два вида входове - инвертиращи и неинвертиращи, се определят и два типа предавателни функции по напрежение
- Реакцията в изхода при въздействие на един от входовете на суматора, се определя при условие, че всички останали входове са свързани към маса
- При въздействие на всички входни сигнали, реакцията в изхода на суматора се определя като алгебрична сума от произведенията на въздействащия входен сигнал и съответната предавателна функция по напрежение



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

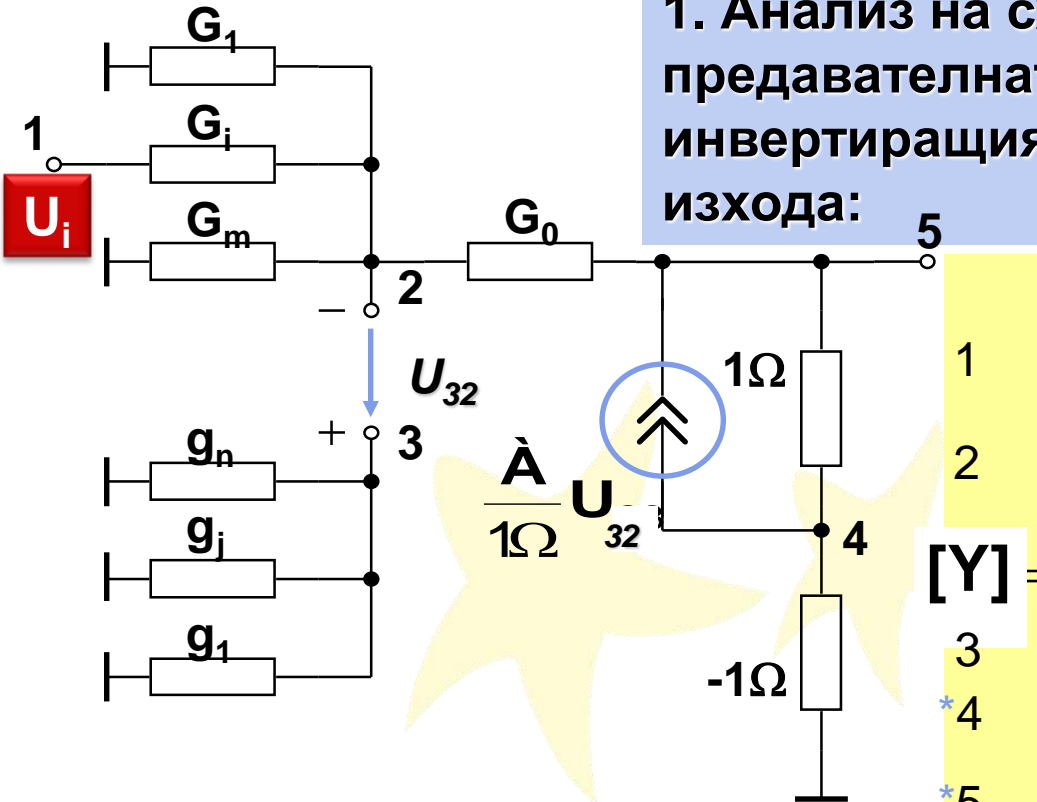
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Суматор

1. Анализ на схемата и определяне на предавателната функция по напрежение от инвертиращия вход с напрежение U_i до изхода:



	1	*2	*3	4	5
1	G_i	$-G_i$			
2	$-G_i$	$\sum_1^m G_i + G_0$			$-G_0$
3			$\sum_1^n g_j$		
*4		$-A$	A		-1
*5		$-G_0 + A$	$-A$	-1	$1 + G_0$

$[Y] =$

$$K_{U_i} = \frac{U_{изх_i}}{U_{вх_i}} = \frac{\Delta_{15}}{\Delta_{11}} = -\frac{G_i}{G_0} \quad (i=1, 2, .. m)$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

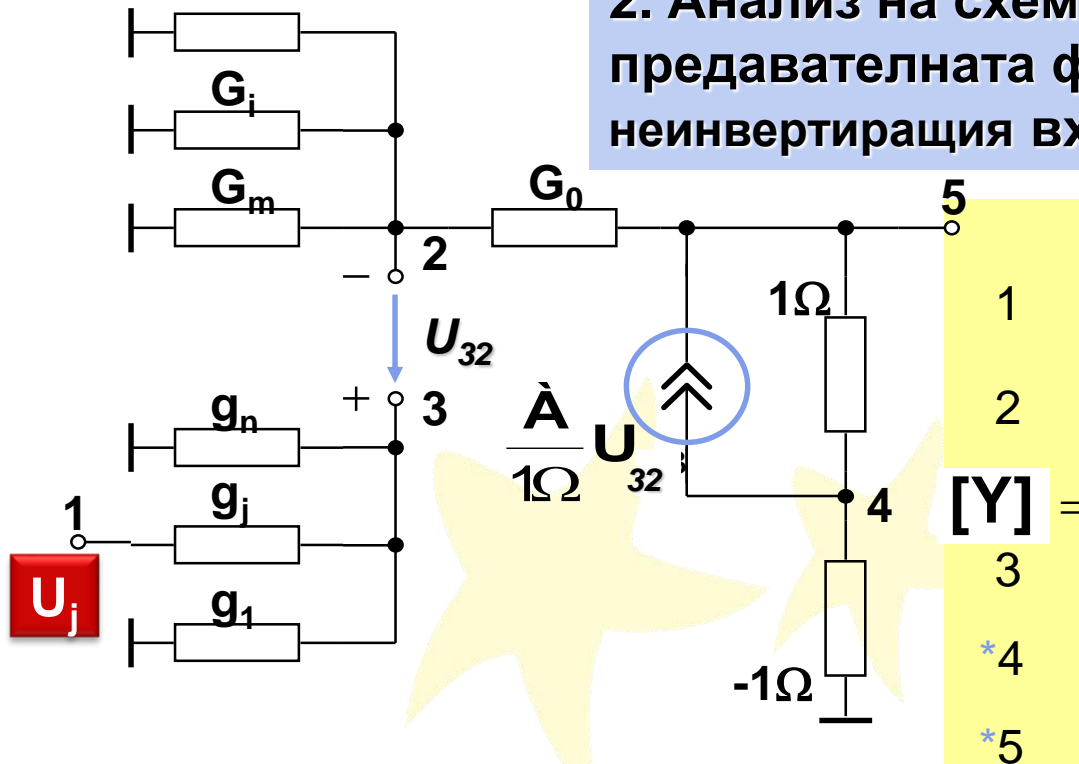
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Суматор

2. Анализ на схемата и определяне на предавателната функция по напрежение от неинвертиращия вход с напрежение U_j до изхода:



	1	*2	*3	4	5
1	g_j		$-g_j$		
2		$\sum_1^m G_i + G_0$			$-G_0$
3	$-g_j$		$\sum_1^n g_j$		
*4		$-A$	A		-1
*5		$-G_0 + A$	$-A$	-1	$1 + G_0$

$$K_{U_j} = \frac{U_{изхj}}{U_{вхj}} = \frac{\Delta_{15}}{\Delta_{11}} = \frac{1 + \frac{1}{G_0} \sum_1^m G_i}{\frac{1}{g_j} \sum_1^n g_j} = \frac{g_j \sum_1^m G_i}{G_0 \sum_1^n g_j} = \frac{g_j}{G_0} \cdot \frac{Y_*}{g^*}$$

$$Y_* = \sum_1^m G_i$$

$$g^* = \sum_1^n g_j$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PФ001--4.3.04-0042

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

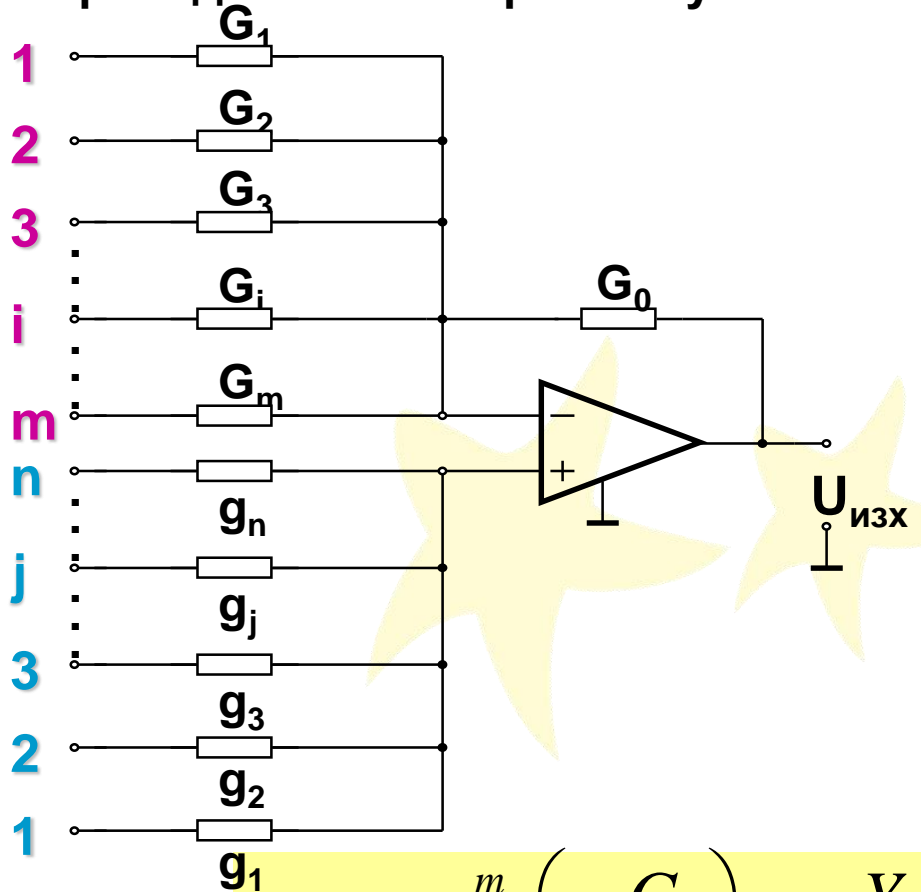
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



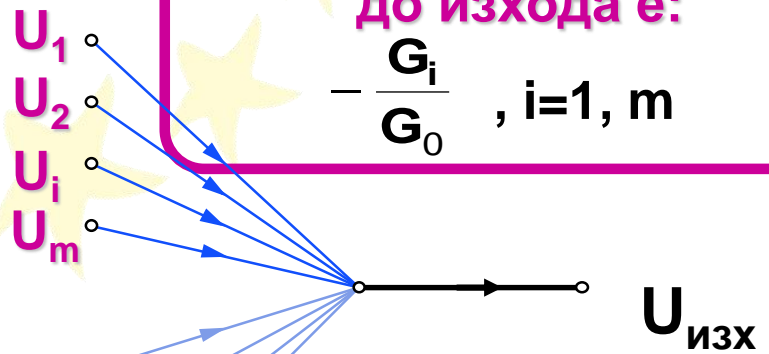
Европейски социален фонд

Суматор

Изходното напрежение на многовходовия аналогов суматор е равно на приведената алгебрична сума от въздействащите входни сигнали:



Предавателната функция от m -инвертиращи входове до изхода е:

$$-\frac{G_i}{G_0}, i=1, m$$


Предавателната функция от n -неинвертиращи входове до изхода е:

$$\frac{g_i}{G_0} \cdot \frac{Y_*}{g_*}, j=1, n$$

$$U_{изх} = \sum_{i=1}^m \left(-\frac{G_i}{G_0} \right) U_i + \frac{Y_*}{g_*} \sum_{j=1}^n \frac{g_j}{G_0} U_j$$



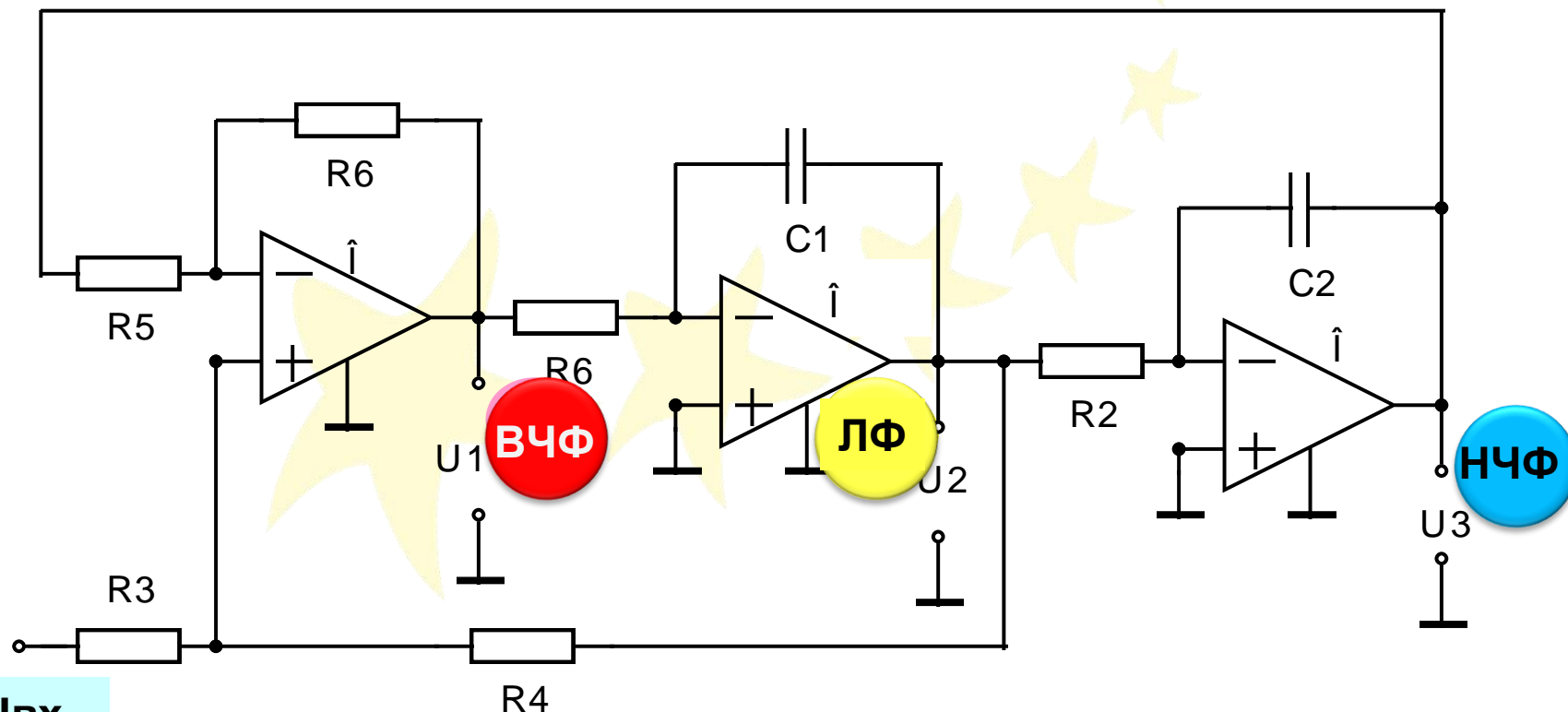
Европейски съюз

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

Практическа схема на Керуин-Хюлсман-Нюкъб с три ОУ



Uвх



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

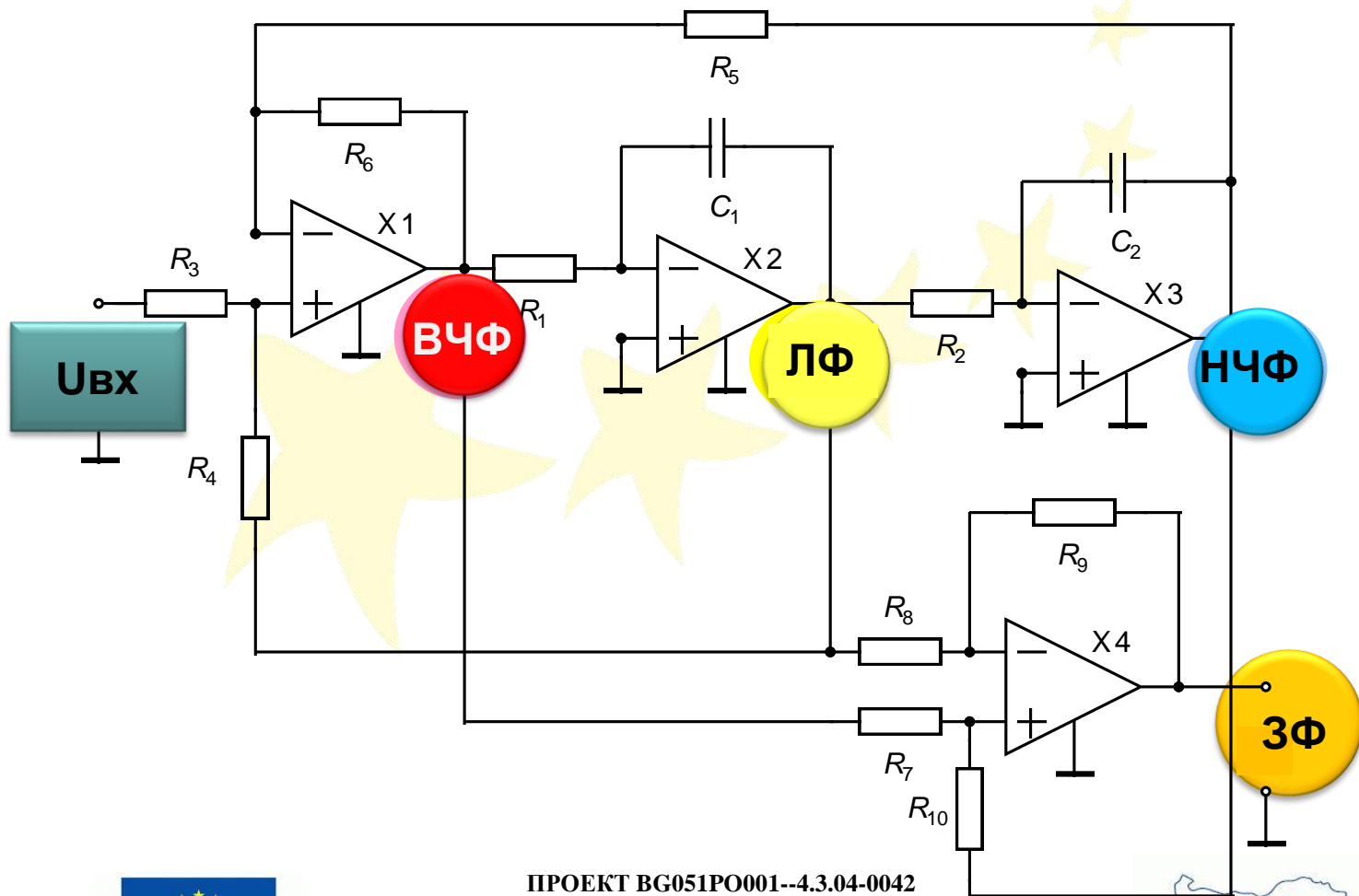
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

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

Практическа схема на Керуин-Хюлсман-Нюкъб с четири 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!



Европейски социален фонд



ttodorov@tu-sofia.bg



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

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



Европейски социален фонд