

 **Технически университет – София**

**Факултет по електронна техника и технологии**

 **Катедра „Електронна техника”**

**Презентация № 10**

**Операционни усилватели (ОУ) – 2. 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. Схемотехника на операционни усилватели
2. Операционни усилватели на напрежение (VFOA)
  - 2.1. Универсални операционни усилватели
  - 2.2. ОУ с еднополярно захранване
  - 2.3. Прецизни операционни усилватели
  - 2.4. „Rail-to-Rail“ ОУ
  - 2.5. Високоскоростните (бързодействащите) операционни усилватели
  - 2.6. Мощните операционни усилватели
3. Операционни усилватели на проводимост (ОТА)
4. Операционни усилватели с вътрешна токова обратна връзка (СFOA)
5. Операционни усилватели на ток (ССII+)
6. Стандартни корпуси за операционни усилватели и разположения на изводите
7. Заключение
8. 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 Схемотехника на операционни усилватели

Схемотехниката на операционните усилватели включва изучаването на вътрешната структура на усилвателните интегрални схеми, както и принципите им на работа в статичен и динамичен режим. При това схемотехниката на ОУ е в тясна връзка с възможностите на различните микроелектронни технологии (биполярни, биполярно-полеви и CMOS). Микроелектронната схемотехника на ОУ използва някои схеми и методи от схемите с дискретни елементи, но преди всичко се подчинява на специфични принципи, най-важните от които са: ограничена елементна база (в обема на полупроводниковия кристал не могат да се реализират кондензатори с големи капацитети, високоомни резистори, бобини, трансформатори и др.); универсалност - с цел големи производствени серии и ниска цена на изделията, което е свързано с елементно излишество; сравнително голям брой изводи за включване на външни елементи и др.

В резултат на непрекъснатото усъвършенстване на технологиите в производството на ОУ се оформят следните основни групи:

- универсални маломощни усилватели, които имат възможност за работа с ниско захранващо напрежение и приемливи постояннотокови и променливотокови параметри;
- прецизни усилватели с голям коефициент на усилване, голям коефициент на потискане на синфазните сигнали и много малки стойности на входното напрежение и ток на несиметрия, както и на техния температурен дрейф;
- широколентови и свръхбързи усилватели с повишена товароспособност.

В този раздел при разглеждането на схемотехниката на ОУ са описани вътрешната структура и принципът на действие на четирите основни типа усилвателни ИС, въз основа на които се реализират универсални, прецизни и широколентови ОУ. Фокусът на вниманието е поставен върху операционните усилватели на напрежение, които най-често се използват в практиката.



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 Операционни усилватели на напрежение (VFOA)

Операционните усилватели на напрежение (Voltage Feedback Operational Amplifiers – VFOAs) се изграждат по двустъпална или тристъпална структура (фиг.1 а и фиг. 1б). Двустъпалният ОУ съдържа първо (входно) стъпало (1), което е диференциален усилвател, второ стъпало (2), което представлява усилвател с динамичен товар (драйверно стъпало) и крайно (изходно) стъпало, формиращо изходната мощност на усилвателя. Тристъпалният ОУ, освен тези две стъпала, има и второ диференциално стъпало.

Входното стъпало на ОУ представлява ДУ и определя входното съпротивление, коефициента на потискане на синфазни сигнали, входния поляризиращ ток и входното напрежение и ток на несиметрия. При двустъпалната структура входното стъпало е със симетричен вход и несиметричен изход и осигурява по-голяма част от усилването по напрежение. В тристъпалната структура входният ДУ е със симетричен вход и изход.



Европейски съюз

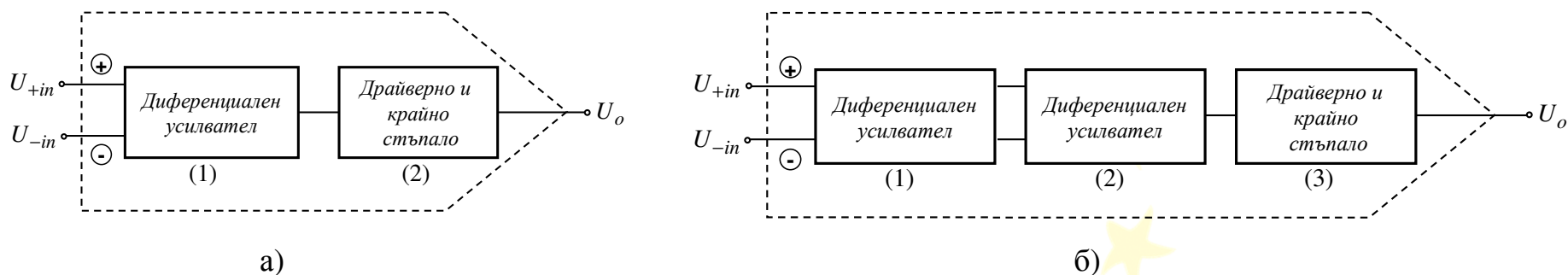
**ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042**

**„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



Фиг. 1. Блокова схема на операционен усилвател: а) с двустъпална структура; б) с тристъпална структура.

*Второто стъпало* в тристъпалната схема е също ДУ. Той е със симетричен вход и несиметричен изход и определя част от усиляването по напрежение.

*Третото стъпало* в тристъпалната структура и второто в двустъпалната структура са съставени от драйверно и крайно стъпало. Драйверното стъпало трябва да осигури необходимата амплитуда за възбуждане на крайното стъпало. Затова обикновено то се реализира с усилвател с динамичен товар. Изходното най-често е комплементарно крайно стъпало, като транзисторите са свързани по схема ОК. Така се осигурява ниското изходно съпротивление на ОУ.

Освен тези стъпала се използват и спомагателни вериги: генератор на ток, от който с помощта на токови огледала се получава режимният ток на всички транзистори във входното, междинното и крайното стъпало; схеми за защита от претоварване по ток в изхода; схеми за защита от пренапрежение (на входа и на изхода); вериги за корекция на АЧХ и ФЧХ 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

## 2.1 Универсални операционни усилватели

Типичен представител на двустъпалните универсални операционни усилватели е  $\mu A741$  (LM741 или MC1741). Принципната електрическа схема на този ОУ е представена на фиг. 3.

*Входното стъпало* е диференциален усилвател със сложна структура, който осигурява инвертиращия и неинвертиращия вход на ОУ. То поема част от общото усилване по напрежение на ОУ при отворена верига на обратна връзка. За схемата от фиг. 3 входните транзистори  $T_1$  и  $T_2$  работят като емитерни повторители. Към емитерите на  $T_1$  и  $T_2$  са включени транзисторите  $T_3$  и  $T_4$ , които работят по схема ОБ. Така се получават каскоди ОК – ОБ с повишено входно съпротивление и голям коефициент на усилване по напрежение. За това спомагат и динамичните товари за схемите обща база, реализирани с транзисторите  $T_5 - T_6$  и резисторите  $R_1 - R_3$ . Особеното за този ДУ е, че потенциалът на базата на  $T_6$  не е фиксиран, а на нея се подава сигналът от емитера на  $T_7$ . Транзисторът  $T_7$  е свързан по схема ОК, като прехвърля сигнала от колектора на  $T_3$  към базата на  $T_6$ . Така изходният сигнал, който се получава в общата точка на колекторите на  $T_4$  и  $T_6$ , е сума от два сигнала. Единият, отбелязан с  $(-)$ , е резултат от усилването на  $U_{-in}$  от каскода  $T_2 - T_4$ . Другият сигнал, отбелязан с  $-$ , е сигналът, получен в колектора на  $T_3$  и допълнително усилен и инвертиран от  $T_6$ . Така усилването на ДУ е както на стъпалото със симетричен вход.



Европейски съюз

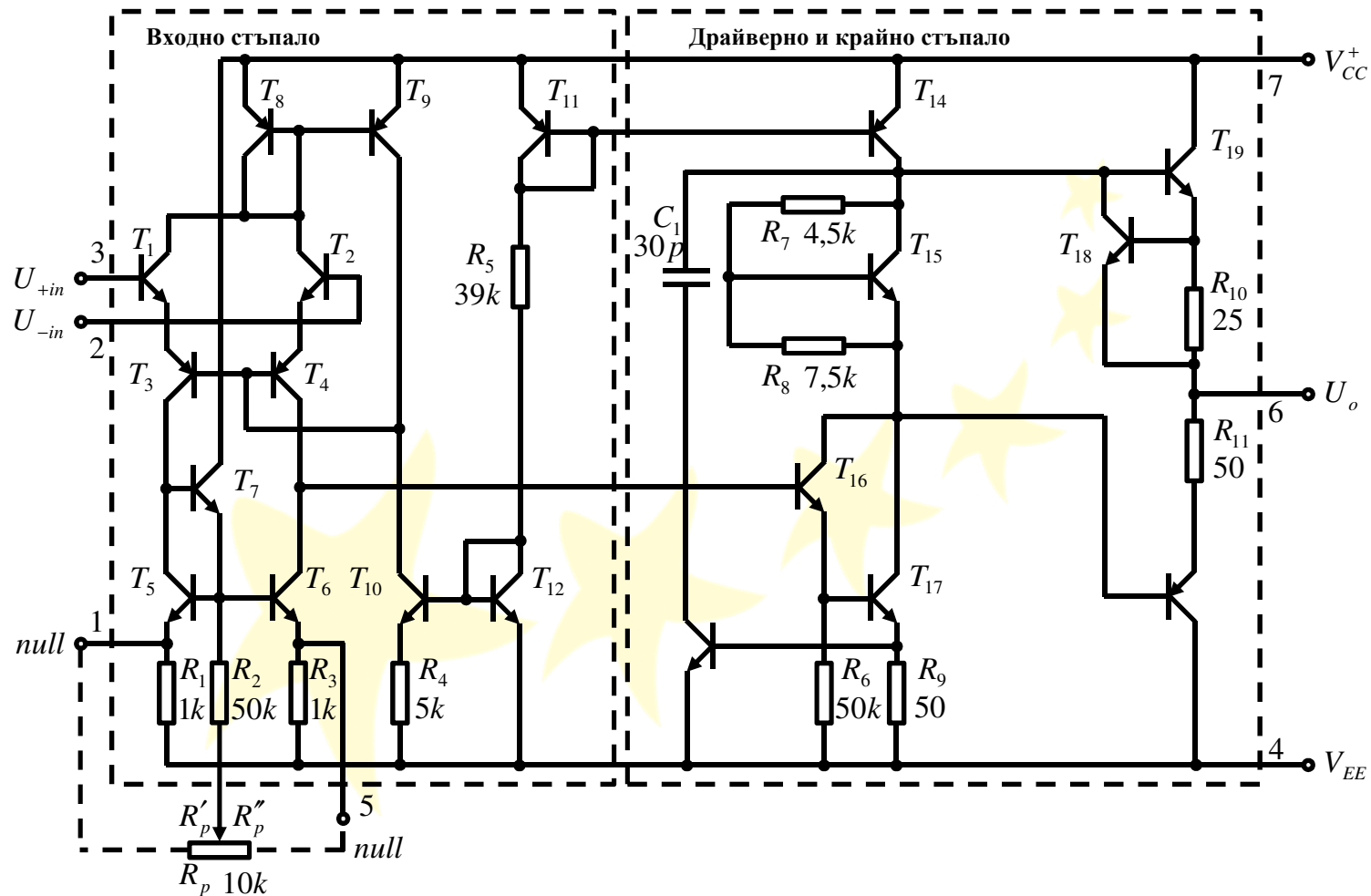
ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

*„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!*



Европейски социален фонд



Фиг. 3. Пълна принципна схема на операционен усилвател uA741



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

*Драйверното стъпало* реализира основната част от усиляването по напрежение и определя първия полюс в амплитудно-честотната характеристика на ОУ. За схемата от фиг. 3 усилвателният елемент в това стъпало са транзисторите  $T_{16}$  и  $T_{17}$ . Свързаните в схема Дарлингтон транзистори  $T_{16}$  и  $T_{17}$  осигуряват голямо входно съпротивление, с което натоварват незначително изхода на първото стъпало. Активният товар, реализиран чрез транзистора  $T_{14}$ , както и голямото входно съпротивление на крайното стъпало, определят големия коефициент на усиляване по напрежение на ОУ (300 ... 1000 пъти). Транзисторът  $T_{15}$  съвместно с резисторите  $R_7$  и  $R_8$  осигуряват около 1,2V постоянно напрежение между двете бази на транзисторите  $T_{19}$  и  $T_{20}$ , за да определят клас АВ на крайното стъпало. Кондензаторът  $C_1$  осигурява корекция на АЧХ с изоставане по фаза и определя устойчивостта на ОУ.

*Крайното стъпало* осигурява полезната изходна мощност на ОУ и е комплементарна схема, реализирана с транзистори с допълнителна симетрия  $T_{19}$  и  $T_{20}$ , работещи като емитерни повторители. По този начин изходното съпротивление на ОУ е малко и се определя основно от резисторите  $R_{10}$  и  $R_{11}$ . *Защитата от късо съединение* е осигурена чрез транзисторите  $T_{18}$  и  $T_{13}$ .



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!*





**Таблица 1.** Универсални операционни усилватели.

Тип ОУ	Производител	$U_{io}$	$I_{iB}$	$B_1$	$SR$	$V_{CC}$ min/max	Брой ОУ с един корпус	Технология
... 324	много	2mV	45nA	1MHz	0,6V/μs	6/32V	4	Bipolar
OP467	Analog D.	0,2mV	150nA	28MHz	300V/μs	10/30V	4	Bipolar
OPA2244	Burr B. (от TI)	1mV	10 nA	0,3MHz	0,1V/μs	2,2/36V	2	Bipolar
OPA4343	Burr B. (от TI)	2mV	0,2pA	5,5MHz	6V/μs	2,5/5,5V	4	CMOS
OPA4134	Burr B. (от TI)	0,5mV	5pA	8MHz	20V/μs	5/36V	4	BiFET
LT1356	Lin. Tech.	0,3mV	80nA	12MHz	400 V/μs	8/32V	4	Bipolar
MAX4044	Maxim	0,2mV	2nA	90MHz	40 V/μs	2,4/5,5V	4	Bipolar
MAX4329	Maxim	1mV	50nA	5MHz	2V/μs	2,4/6,5V	4	Bipolar
LF356	National	1mV	30pA	4,5MHz	12V/μs	8/36V	1	BiFET
LMV324	National	2mV	11nA	1MHz	1V/ μs	2,7/5,5V	4	Bipolar
TS274	SGS-Th.	5mV	10pA	3,5MHz	5,5V/μs	3/16V	4	CMOS
TL074	Texas I. (TI)	3mV	65pA	3MHz	13V/μs	8/36V	4	BiFET
LTC2274	Texas I.	0,3mV	1pA	2MHz	3,6V/μs	3/16V	4	CMOS
TLE2084	Texas I.	2mV	20pA	10MHz	35V/μs	5/38V	4	BiFET



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 Single-Supply OУ

Основен усилвател, предназначен и за работа с еднополярно захранващо напрежение, е LM324. Опростената принципна схема е показана на фиг. 4. В голяма степен тази схема съответства на схемата от фиг. 3 с някои промени, за да може да се използва и при еднополярно захранващо напрежение. Към входния диференциален усилвател са добавени транзисторите  $T_5$  и  $T_6$ , свързани по схема ОК. В режим на покой в емитерите на  $T_1$  и  $T_2$  се осигурява по-високо напрежение  $\approx 1,2V$ . Тогава за напрежението колектор – емитер на  $T_1$  и  $T_2$  се получава  $0,6V$  дори когато входното напрежение намалява до  $0V$ . Драйверното стъпало е съставено от транзистора  $T_7$ , свързан в схема ОЕ с динамичен товар (вътрешното съпротивление на източника  $I_2$ ). Напрежението база – емитер е  $0,6V$ , а напрежението база – колектор е приблизително  $0V$ . Тогава транзисторът  $T_7$  работи на границата между нормалния активен режим и насищане. За разлика от схемата на фиг. 3, където за крайните транзистори се осигурява преднапрежение  $\approx 1,2V$  в схемата от фиг. 4 базите на крайните транзистори  $T_8$  и  $T_9$  са свързани накъсо. В този случай на базите общо се подава напрежение  $0,6V$ . Транзисторът  $T_9$  е запущен, а транзисторът  $T_8$  е в нормален активен режим за изходни напрежения под  $0,6V$ . При това на изхода се получава напрежение приблизително  $0V$ .



Европейски съюз

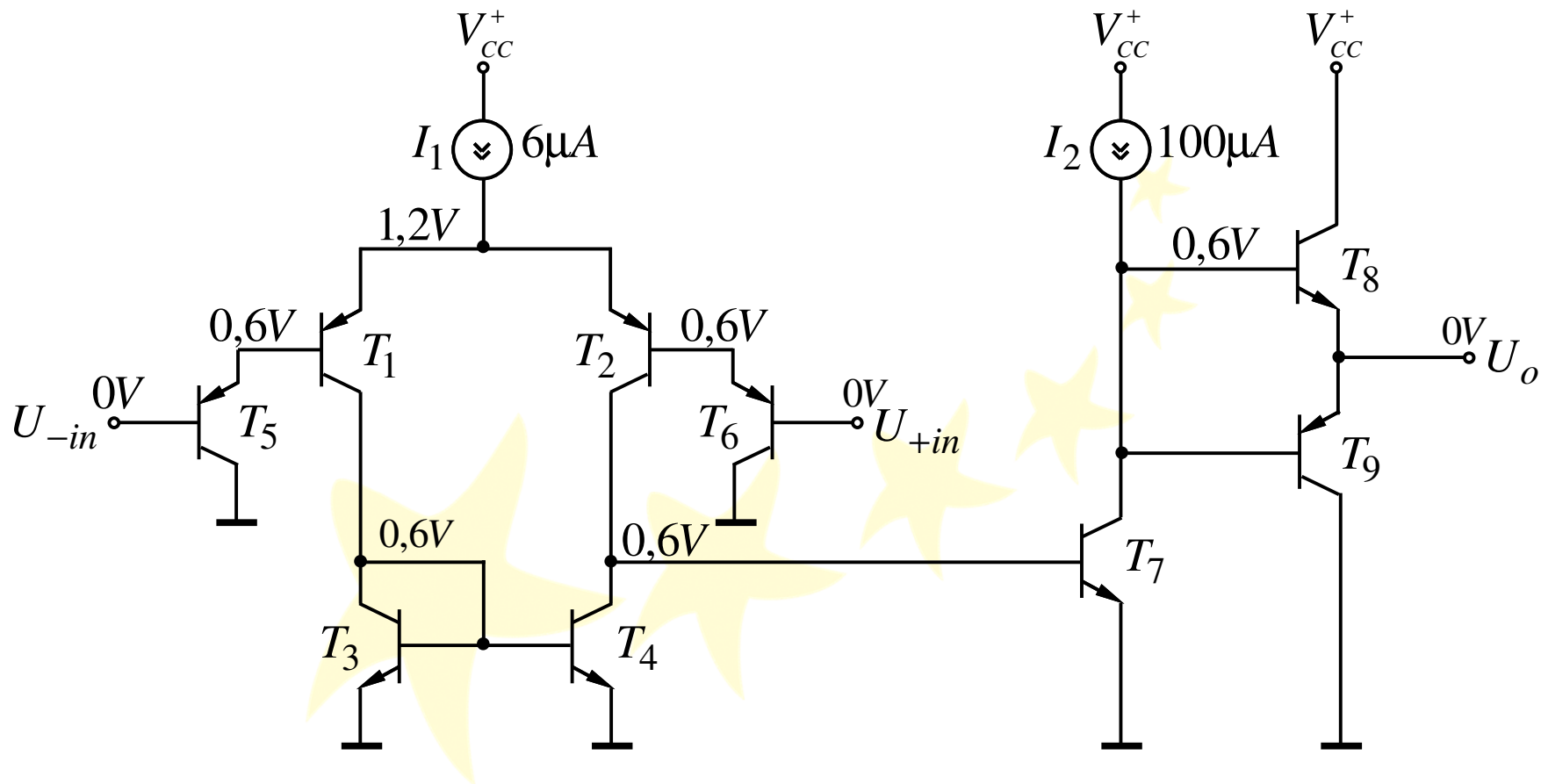
ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

*„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



Фиг. 4. Опростена електрическа схема на Single-Supply биполярен ОУ LM324.



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