

 **Технически университет – София**

Факултет по електронна техника и технологии

 **Катедра „Електронна техника”**

Презентация № 10

Операционни усилватели (ОУ) – 2. Част 4

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

Таблица 5. Операционни усилватели с токова обратна връзка (CFOA).

Тип ОУ	Производител	U_{io}	I_{iB}	B_1	SR	V_{CC} min/max	Брой ОУ с един корпус	I_{CC}
AD844	Analog D.	50 μ V	200nA	60MHz	2000V/ μ s	9/36V	1	6,5mA
AD8000	Analog D.	1mV	5 μ A	1580MHz	4100V/ μ s	4,5/12V	1	14,3mA
AD8001	Analog D.	2mV	3 μ A	880MHz	1000V/ μ s	6/12V	1	5mA
AD8003	Analog D.	0,7mV	7 μ A	1650MHz	3800V/ μ s	4,5/10V	3	10,2mA
AD8009	Analog D.	2mV	50 μ A	1GHz	5500V/ μ s	5/12V	1	16mA
AD8010	Analog D.	5mV	6 μ A	230MHz	800V/ μ s	9/12V	1	17mA
AD8011	Analog D.	2mV	5 μ A	400MHz	3500V/ μ s	3/12V	1	1,3mA
AD8040	Analog D.	1,6mV	0,7 μ A	125MHz	62V/ μ s	2,7/12V	4	1,5mA
AD8073	Analog D.	4mV	4 μ A	100MHz	500V/ μ s	5/12V	3	5mA
OPA684	Burr B. (TI)	4mV	12 μ A	210 MHz	820V/ μ s	5/12V	1	3,9mA
OPA3684	Burr B. (TI)	4mV	12 μ A	210 MHz	820V/ μ s	5/12V	3	3,9mA
OPA683	Burr B. (TI)	3mV	20 μ A	200 MHz	400V/ μ s	5/12V	1	1,03mA
OPA695	Burr B. (TI)	3mV	41 μ A	1700MHz	2900V/ μ s	5/12V	1	12,9mA
OPA2695	Burr B. (TI)	3mV	41 μ A	1100 MHz	2900V/ μ s	5/12V	2	13,4mA
OPA3695	Burr B. (TI)	3,5mV	30 μ A	900MHz	2400V/ μ s	5/12V	3	13,4mA
LT1259	Lin. Tech.			130MHz	1600V/ μ s	4/36V	2	5mA
LT1253	Lin. Tech.			250MHz	250V/ μ s	10/30V	2	6mA
MAX4223	Maxim	0,5mV	2 μ A	1000MHz	1000V/ μ s	6/11V	1	6mA
MAX4226	Maxim	0,5mV	2 μ A	250 MHz	1100V/ μ s	6/11V	2	6mA
MAX4224	Maxim	7mV	4 μ A	330MHz	1400V/ μ s	6/11V	1	6mA
THS3202	Texas I. (TI)	5mV	50 μ A	2000MHz	9000V/ μ s	6,6/15V	2	20mA
THS3061	Texas I.	4,5mV	40 μ A	300MHz	7000V/ μ s	10/30V	1	12mA
THS6022	Texas I.	4mV	12 μ A	210MHz	1900V/ μ s	9/32V	2	10mA



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

Операционни усилватели на ток (CCII+)

Операционните усилватели на ток (Drive - R – Amplifier; Diamond Transistor; Positive Second generation current conveyor – CCII+) се различават от CFOA, като се получават подобно на ОТА от VFOA, а именно чрез премахване на крайното стъпало.

Опростена принципна схема на управляем операционен усилвател на ток (positive second-generation current controlled conveyor – CCCII+) е показана на фиг. 3.12. Схемното означение е дадено на фиг. 3.12, а еквивалентната схема на фиг. 3.12. Операционните усилватели на ток могат да се разглеждат като “идеални (или диамантени) биполярни транзистори” с три извода – високоомен вход (база – V или y), нискоомен вход/изход (емитер – E или x) и токов изход (колектор – C или z). За разлика от обикновените биполярни транзистори токът в полюса C на CCII+ ще бъде изходящ за положително входно напрежение между $V - E$ и токът ще бъде входящ за отрицателно напрежение $V - E$. Операционните усилватели на ток в сравнение с дискретните транзистори осигуряват по-добра линейност на предавателната характеристика, имат по-голямо входно съпротивление и позволяват работа с по-големи колекторни токове.

Входното стъпало на схемата от фиг. 3.12а е реализирано с комплементарните двойки транзистори $T_1 - T_5$ и $T_2 - T_6$. Транзисторите T_1 и T_5 са свързани по схема общ колектор с динамични товари (вътрешното съпротивление на източниците, означени с I_B). Транзисторите T_2 и T_6 по отношение на входния сигнал u_x са свързани по схема обща база. Неинвертиращият вход y на CCII+ е високоомен, като $r_y = 1 \dots 10M\Omega$, а инвертиращият вход – x е с малко входно съпротивление ($r_x = 10 \dots 100\Omega$).



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

Входният ток i_x към нискоомния вход е пропорционален на разликата между напреженията u_y и u_x . Този ток формира колекторните токове на транзисторите T_2 и T_6 , които управляват токовете огледала $T_3 - T_4$ и $T_7 - T_8$. Изходният ток i_z на токовете огледала повтаря тока i_x , т.е. $i_z \approx i_x$ като мащабният коефициент е приблизително равен на единица. Съпротивлението r_z и капацитетът C_z определят еквивалентния изходен импеданс на ССП+. Всъщност транзисторите T_4 и T_8 формират изходното стъпало на ССП+. Постояннотоковият режим на транзисторите се установява чрез източниците на ток, означени с I_B .

При условие, че всички транзистори на ССП+ са реализирани по една и съща технология и работят при еднакъв постояннотоков режим за ниски честоти на входния сигнал проходната проводимост G_m по аналогия с дискретните биполярни транзистори има вида

$$G_m \approx \frac{1}{r_x} \approx \frac{2I_B}{\Phi_T}.$$



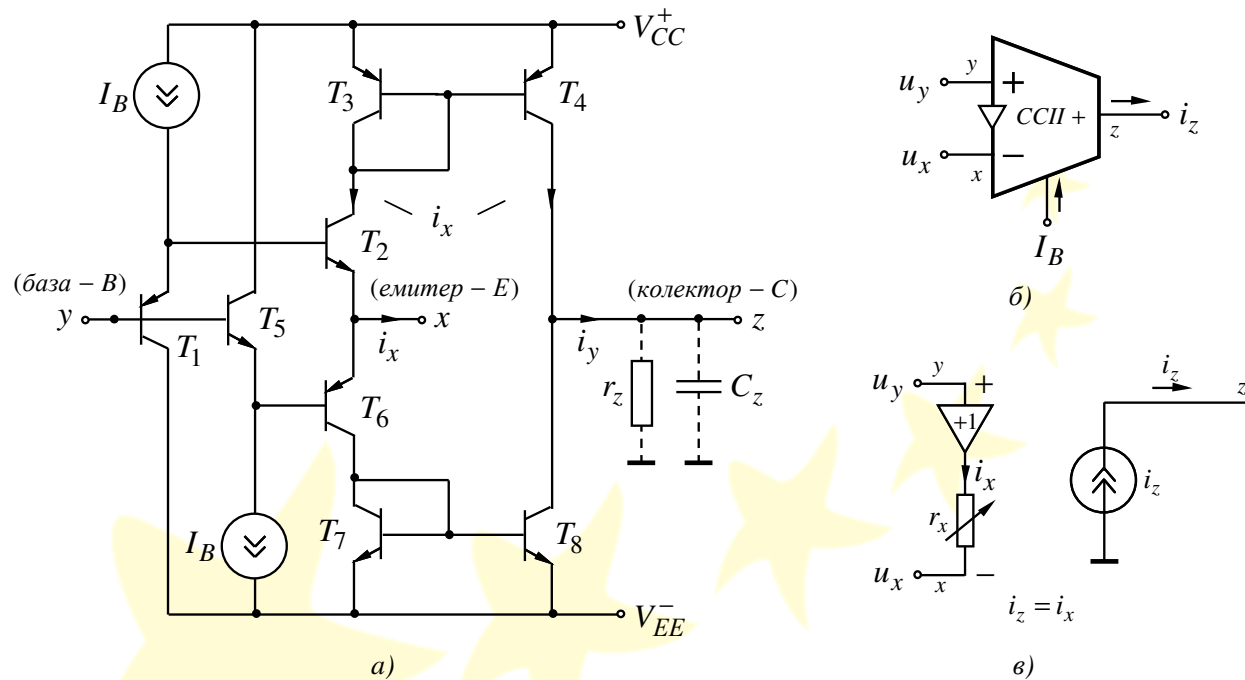
Европейски съюз

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!





Фиг. 3.12. Управляем операционен усилвател на ток (управляем ССП+ или СССП+): а) опростена принципна схема; б) схемно означение; в) еквивалентна схема.



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!



В таблица 6 са дадени параметрите на малка група монолитни операционни усилватели на ток. Те са предназначени основно за работа при високи честоти. За тях входната и изходната величина е ток (current-mode operation). Основните предимства на схемите с операционни усилватели на ток в сравнение с VFOA-базираните схеми са, че усилвателите на ток осигуряват по-широка честотна лента с по-голяма линейност и имат по-голям динамичен диапазон. Освен това ширината на честотната лента на ССII-базираните схеми може да се настройва независимо в определени граници чрез елементите във веригата на ООВ. За голяма част от операционните усилватели на ток входната проводимост G_m на входните транзистори и съответно съпротивлението $r_x \approx 1/G_m$ могат да се задават чрез външен източник на ток. По този начин се реализират електронни схеми на управляеми генератори и филтри. За някои от монолитните операционни усилватели на ток, например AD844 и OPA860, има вграден повторител на напрежение (буфер). Това позволява чрез каскадно свързване на ССII+ и буфера да се получи CFOA.

Таблица 6. Операционни усилватели на ток (ССII+).

Тип ОУ	Производител	U_{io}	I_{iB}	B_1	SR	V_{CC} min/max	Брой ОУ с един корпус	Изходен ток
AD844	Analog D.	60 μ V	0,2 μ A	60MHz	2000V/ μ s	9/36V	1	60mA
OPA615	Texas I.	4mV	0,5 μ A	710MHz	2500V/ μ s	8/12V	1	5mA
OPA860	Texas I.	3mV	1 μ A	80MHz	3500V/ μ s	5/13V	1	15mA
OPA861	Texas I.	12mV	1 μ A	80MHz	900V/ μ s	4/12,6V	1	15mA



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!

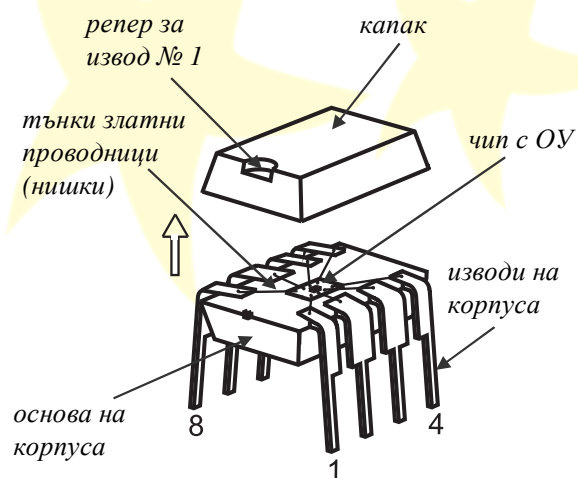


Европейски социален фонд

6

Стандартни корпуси за операционни усилватели и разположения на изводите

Съвременното производство на аналогови интегрални схеми е основано на груповите технологии, при които върху една полупроводникова пластина чрез последователни технологични операции се създават необходимите елементи и електрически връзки за няколко операционни усилвателя. След изпълнението на основните операции пластината се нарязва на отделни по-малки правоъгълни пластини (чипове), като всяка една от тях представлява ОУ. За да бъде възможно ползването на така получените операционни усилватели в електронна апаратура, всеки чип се затваря в отделен корпус, като предварително се монтира върху основата на корпуса и се осъществяват връзки с тънки златни проводници (нишки) между изводните площадки на чипа и съответните изводи на корпуса. Запояването на нишките (бондирането) се извършва с термокомпресия или ултразвукова техника.



Фиг. 13. Конструкция на ОУ в пластмасов корпус PDIP – 8.



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!



Съществува голямо разнообразие от метални, керамични или пластмасови корпуси за интегрални схеми. При това различните производители използват собствени буквено-цифрови означения за корпусите, но при съвпадащи основни геометрични размери. Спазването на стандарти за основните размери значително улеснява проектантите, които изготвят печатни платки за устройствата си. Ортогоналните изгледи на най-често срещаните корпуси за ОУ са представени на фиг. 3.14. По репера, означен на корпусите, потребителят може да се ориентира към кой извод коя точка от схемата е свързана. Стандартните корпуси PDIP-8 и PDIP-14 са предназначени за обикновен монтаж, при който изводите (крачетата) на корпуса преминават през всички слоеве на печатната платка. Останалите корпуси (SOIC-8, SOIC-14, TSSOP-8, TSSOP-14, SOT23-5) са за повърхностен монтаж. Разстоянията между крачетата за корпусите са, както следва: PDIP-8 и PDIP-14 – $0,1in (2,54mm)$; SOIC-8 и SOIC-14 – $0,050in (1,27mm)$; TSSOP-8 и TSSOP-14 – $0,65mm$; SOT23-5 – $0,95mm$.

Най-често в един корпус се поставят един, два или четири ОУ. На фиг. 3.15 са дадени разположенията на изводите на ОУ за по-горе изброените стандартни корпуси. За всеки тип ОУ означението е специфично, като се изписва върху корпуса. Най-общо означенията включват букви и цифри (например AD741L, TLE2227, LT1356). Първите букви са свързани с името на фирмата производител или някои особености на ОУ (например AD, ADG, OP... Analog Devices, LT, LTC... Linear Technology, MAX... Maxim, TL, THS... Texas Instruments, INA – Instrumentation Amplifier и ISO – Isolation Amplifier). Следва число от три до пет цифри, свързано с конкретния тип ОУ. В някои случаи една от цифрите дава информация за температурния обхват, в който работи ОУ, или за броя ОУ в един корпус. Следва суфикс от една или повече букви, който дава информация за типа на корпуса, работния температурен обхват и др.



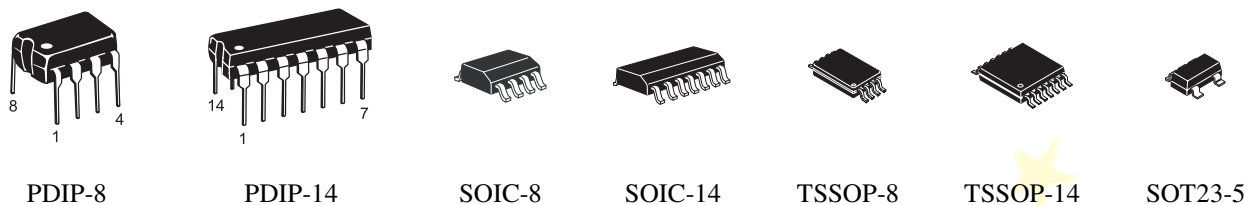
Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

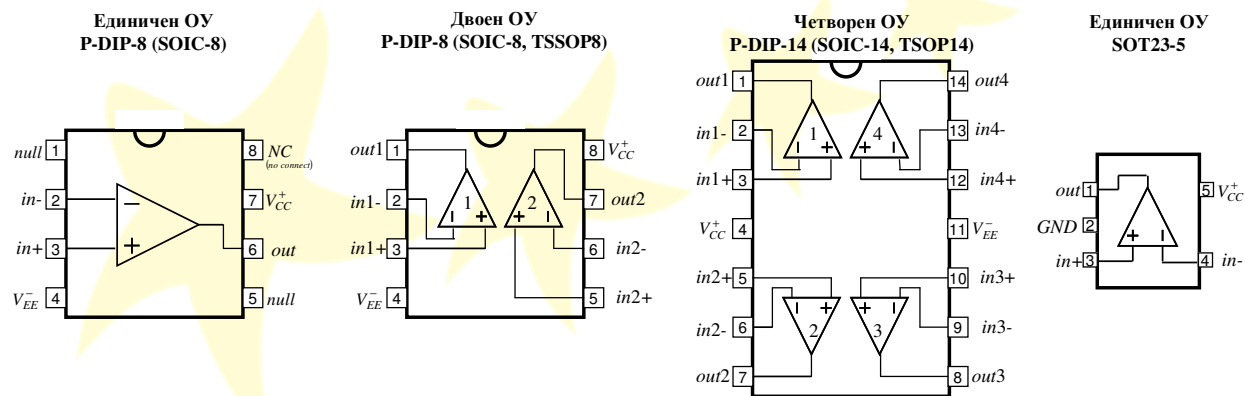
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

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!





Фиг. 14. Пластмасови корпуси за операционни усилватели.



Фиг. 15. Разположение на изводите за единичен, двоен и четворен ОУ.



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!



7

Заклучение

Вместо заключение ще бъдат приложени в синтезиан табличен вид Основните предимства и недостатъци на различните видове ОУ.

<i>Изходна величина - <u>напрежение</u></i>		
Входна величина - <u>напрежение</u>	Популярно наименование	Операционен усилвател на напрежение
	Системно наименование	Преобразувател на напрежение в напрежение
	Вид на управляемия източник	Източник на напрежение, управляван с напрежение (ИНУН)
	Вид на ООВ по отношение на изхода	Обратна връзка по напрежение, напрежителен изход
	Приложения	Универсални схеми с ограничена честотна лента
	Предимства	Малко входно напрежение на несиметрия Малък дрейф на входното напрежение на несиметрия Висока точност при ниски честоти
	Недостатъци	Неподходящ при високи честоти Проблеми за осигуряване на устойчивост при капацитивен и индуктивен товар
	Типичен пример	OP177 (Analog Devices)
	Входно напрежение на несиметрия	10 μV ☺
	Температурен дрейф на напр. на несиметрия	0,1 $\mu V/^\circ C$ ☺
	Входен поляризиращ ток	0,3 nA ☺
	Честотна лента при голям сигнал	5 kHz ☹
	Скорост на нарастване на изходното напрежение	0,3 V/ μs ☹

Таблица 7. Операционен усилвател на напрежение (VFOA).



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

<i>Изходна величина - ток</i>		
Входна величина - напрежение	Популярно наименование	Операционен усилвател на проводимост
	Системно наименование	Преобразувател на напрежение в ток
	Вид на управляемия източник	Източник на ток, управляван с напрежение (ИТУН)
	Вид на ООВ по отношение на изхода	Обратна връзка по напрежение, токов изход
	Приложения	Драйвери за капацитивни товари, импулсни генератори в ps – обхват и широколентови ДУ
	Предимства	Малко входно напрежение на несиметрия Малък дрейф на напрежението на несиметрия Добра преходна характеристика при капацитивни товари
	Недостатъци	При оразмеряване на схемата товарът трябва да бъде известен
	Типичен пример	MAX436 (MAX4444 и MAX4445) (<i>Maxim</i>)
	Входно напрежение на несиметрия	0,3 mV ☺
	Температурен дрейф на напр. на несиметрия	4 μ V/°C ☹
	Входен поляризиращ ток	1 μ A ☹
	Честотна лента при голям сигнал	200 MHz ☺
	Скорост на нарастване на изходното напрежение	800 V/ μ s ☺

Таблица 8. Операционен усилвател на проводимост (ОТА).



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

<i>Изходна величина - напрежение</i>		
Входна величина - ток	Популярно наименование	Операционен усилвател с токова обратна връзка
	Системно наименование	Преобразувател на ток в напрежение
	Вид на управляемия източник	Източник на напрежение, управляван с ток (ИНУТ)
	Вид на ООВ по отношение на изхода	Обратна връзка по ток, напрежителен изход
	Приложения	Драйвери за високочестотни линии, видеоусилватели, управление на АЦП и I/U преобразуватели за ЦАП
	Предимства	Широка честотна лента Голяма скорост на нарастване на изходното напрежение
	Недостатъци	Проблеми за осигуряване на устойчивост при капацитивен и индуктивен товар
	Типичен пример	AD8001 (Analog Devices)
	Входно напрежение на несиметрия	2 mV ☹
	Температурен дрейф на напр. на несиметрия	10 $\mu V/^\circ C$ ☹
	Входен поляризиращ ток	3 μA ☹
	Честотна лента при голям сигнал	880 MHz ☺
	Скорост на нарастване на изходното напрежение	1000 V/ μs ☺

Таблица 9. Операционен усилвател с токова обратна връзка (CFOA).



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

<i>Изходна величина - ток</i>		
Входна величина - ток	Популярно наименование	Операционен усилвател на ток
	Системно наименование	Преобразувател на ток в ток
	Вид на управляемия източник	Източник на ток, управляван с ток (ИТУТ)
	Вид на ООВ по отношение на изхода	Обратна връзка по ток, токов изход
	Приложения	Усилватели на сигнали с голямо изходно съпротивление, АФ за високи честоти, токови драйвери за магнитни глави, лазерни диоди и високочестотни линии
	Предимства	Широка честотна лента Висока скорост на нарастване на изходното напрежение
	Недостатъци	При оразмеряване на схемата товарът трябва да бъде известен
	Типичен пример	ОРА860 (<i>Texas Instruments – Burr Brown</i>)
	Входно напрежение на несиметрия	3 mV ☹
	Температурен дрейф на напр. на несиметрия	50 $\mu V/^\circ C$ ☹
	Входен поляризиращ ток	1 μA ☹
	Честотна лента при голям сигнал	80 MHz ☺
	Скорост на нарастване на изходното напрежение	3500 V/ μs ☺

Таблица 10. Операционен усилвател на ток (ССИ+).



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

8 Литература

Основна:

1. Пандиев, И., *Електронни схеми с операционни усилватели – анализ и проектиране*,. София, Издателство на ТУ-София, 2012.
2. Пандиев, И., Л. Донева, Д. Стаменов. *Аналогова схемотехника – II*, София, Издателство на ТУ-София, 2008.

Допълнителна:

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

Интернет адреси:

1. *Официален сайт на дисциплината аналогова схемотехника –*
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!

