

 **Технически университет – София**

Факултет по електронна техника и технологии

 **Катедра „Електронна техника”**

Презентация № 10

Операционни усилватели (ОУ) – 2. Част 3

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

3 Операционни усилватели на проводимост (ОТА)

Операционните усилватели на проводимост (Operational Transconductance Amplifiers – OTAs) могат да се получат от стандартните операционни усилватели на напрежение (VFOA), като се премахне крайното стъпало (в някои случаи с драйверното стъпало). По този начин изходът може да се разглежда като еквивалентен генератор на ток. ОТА се характеризират с голямо изходно съпротивление без ООВ за ниски честоти. Коефициентът им на предаване се определя от стръмността G_m (или S_d), която може да има много голяма стойност.

Операционните усилватели на проводимост се изграждат по *едностъпална* или *двустъпална структура*, използващи биполярни или униполярни транзистори. *Едностъпалният ОТА* е диференциален усилвател със симетричен вход и несиметричен изход. За стабилизация на постояннотоковия режим на диференциалния усилвател обикновено се използва управляем генератор на ток. *Двустъпалният ОТА* съдържа първо (входно) стъпало, което е диференциален усилвател и второ (изходно) стъпало, което представлява усилвател по схема общ емитер (или общ сорс) с динамичен товар. Между изхода и входа на второто стъпало обикновено се свързва кондензатор, който съгласно ефекта на Милер формира доминантния полюс в честотната характеристика. Въз основа на този ефект двустъпалните ОТА се наричат още *операционни усилватели на Милер* (Miller OTA).



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 Операционни усилватели на проводимост (ОТА)

Операционните усилватели на проводимост (Operational Transconductance Amplifiers – OTAs) могат да се получат от стандартните операционни усилватели на напрежение (VFOA), като се премахне крайното стъпало (в някои случаи с драйверното стъпало). По този начин изходът може да се разглежда като еквивалентен генератор на ток. ОТА се характеризират с голямо изходно съпротивление без ООВ за ниски честоти. Коефициентът им на предаване се определя от стръмността G_m (или S_d), която може да има много голяма стойност.

Операционните усилватели на проводимост се изграждат по *едностъпална* или *двустъпална структура*, използващи биполярни или униполярни транзистори. *Едностъпалният ОТА* е диференциален усилвател със симетричен вход и несиметричен изход. За стабилизация на постояннотоквия режим на диференциалния усилвател обикновено се използва управляем генератор на ток. *Двустъпалният ОТА* съдържа първо (входно) стъпало, което е диференциален усилвател и второ (изходно) стъпало, което представлява усилвател по схема общ емитер (или общ сорс) с динамичен товар. Между изхода и входа на второто стъпало обикновено се свързва кондензатор, който съгласно ефекта на Милер формира доминантния полюс в честотната характеристика. Въз основа на този ефект двустъпалните ОТА се наричат още *операционни усилватели на Милер* (Miller OTA).



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

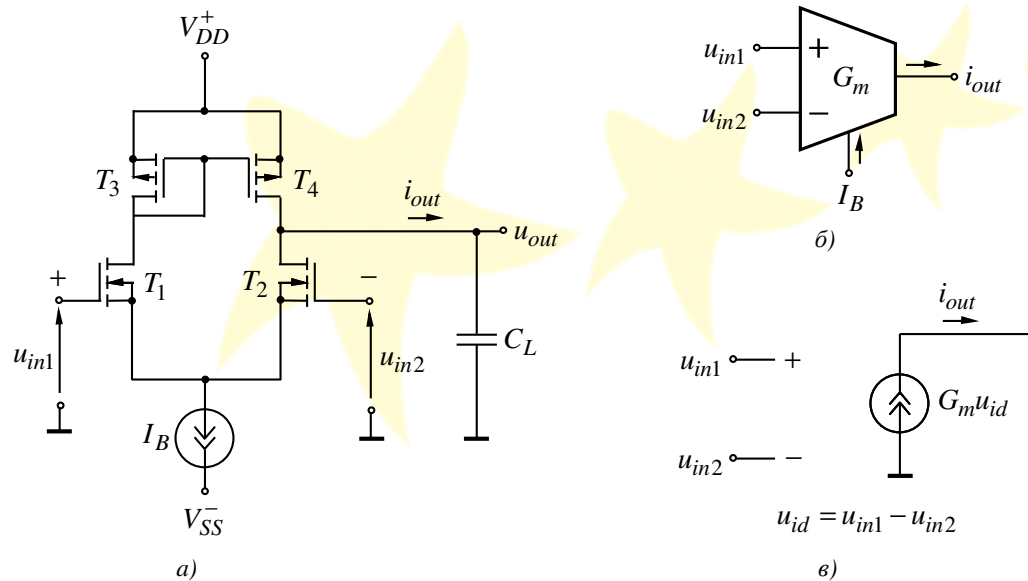
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

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

Опростена принципна схема на едностъпален управляем CMOS OTA е представена на фиг. 8а. Схемното означение е дадено на фиг. 8б, а еквивалентната електрическа схема на фиг. 8в. Едностъпалният CMOS OTA е CMOS диференциален усилвател с динамичен товар и генератор на ток I_B . В него диференциалната двойка T_1 и T_2 работи с управляем динамичен товар, реализиран с транзисторите T_3 и T_4 . Особеното тук е, че потенциалът на гейта на T_4 не е фиксиран, а в него се подава сигналът от дрейна на T_1 . Така изходното напрежение u_{out} е сума от две напрежения, които постъпват във фаза в общата точка (дрейновете) на транзисторите T_2 и T_4 .



Фиг. 3.36. Едностъпален управляем операционен усилвател на проводимост (OTA): а) опростена принципна схема; б) схемно означение; в) еквивалентна схема.



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

При реализацията на схемата транзисторите T_1 и T_2 са направени с равни отношения W/L , където W ширината на канала между дрейна и сорса, а L е дължината на канала. Транзисторите T_3 и T_4 обикновено се изработват също с равни отношения W/L . Изборът транзисторите в схемата да бъдат с равни W/L – отношения до голяма степен опростява технологичния процес и електрическото проектиране. Постояннотоковият режим на транзисторите T_1 и T_2 се установява чрез източника на ток I_B . При условие, че транзисторите са еднакви в режим на покой през двете рамена на диференциалния усилвател протича половината от тока I_B .

За ниски честоти, при които могат да се пренебрегнат инерционните качества на транзисторите проводимостта на ОТА при условие, че $g_{m1} = g_{m2} = G_m$ се определя от формулата

$$(1) \quad G_m = \frac{\partial I_{D1,2}}{\partial U_{GS1,2}} = \sqrt{2K_n I_B \frac{W}{L}},$$

където $I_{D1,2} = \frac{K_n W}{2L} (U_{GS1,2} - U_{Th})^2$ е токът през транзисторите, съответно T_1 и T_2 , K_n е специфичната стръмност, а U_{Th} е праговото напрежение.

От (1) се вижда, че при увеличаване или намаляване на тока I_B проводимостта G_m на ОТА се изменя в същата посока. Обикновено токът I_B се подава от външен генератор на ток, чийто изходен ток може да се изменя в определени граници.



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

Типични представители на двустъпалните комерсиални ОТА от първо поколение са СА3060 и СА3080, а представители на двустъпалните ОТА от второ поколение са LM13700 и МАХ436 с неговите усъвършенствани схемни варианти (МАХ4444 и МАХ4445).

Третото поколение двустъпални ОТА включват CMOS входен диференциален усилвател и изходно стъпало, което представлява усилвател по схема общ сорс с динамичен товар. Тези усилватели се реализират основно в чипа на други аналогови или аналогово-цифрови интегрални схеми и почти не се предлагат на пазара като отделни прибори.

За двустъпалният ОТА СА3080 от Harris (Intersil) токът в режим на покой $I_{EE} = 2I_0$ на входния диференциален усилвател се задава чрез генератор на ток с токово огледало от външен резистор, свързан към маса. При това максималният ток I_q през входната диференциална двойка транзистори в динамичен режим не надвишава тока I_0 . Изходното стъпало в схемата е общ емитер с динамичен товар. Тогава максималният изходен ток на ОТА се получава

$$I_{o,\max} = I_{EE} = 2I_0 \approx 0,5mA.$$



Европейски съюз

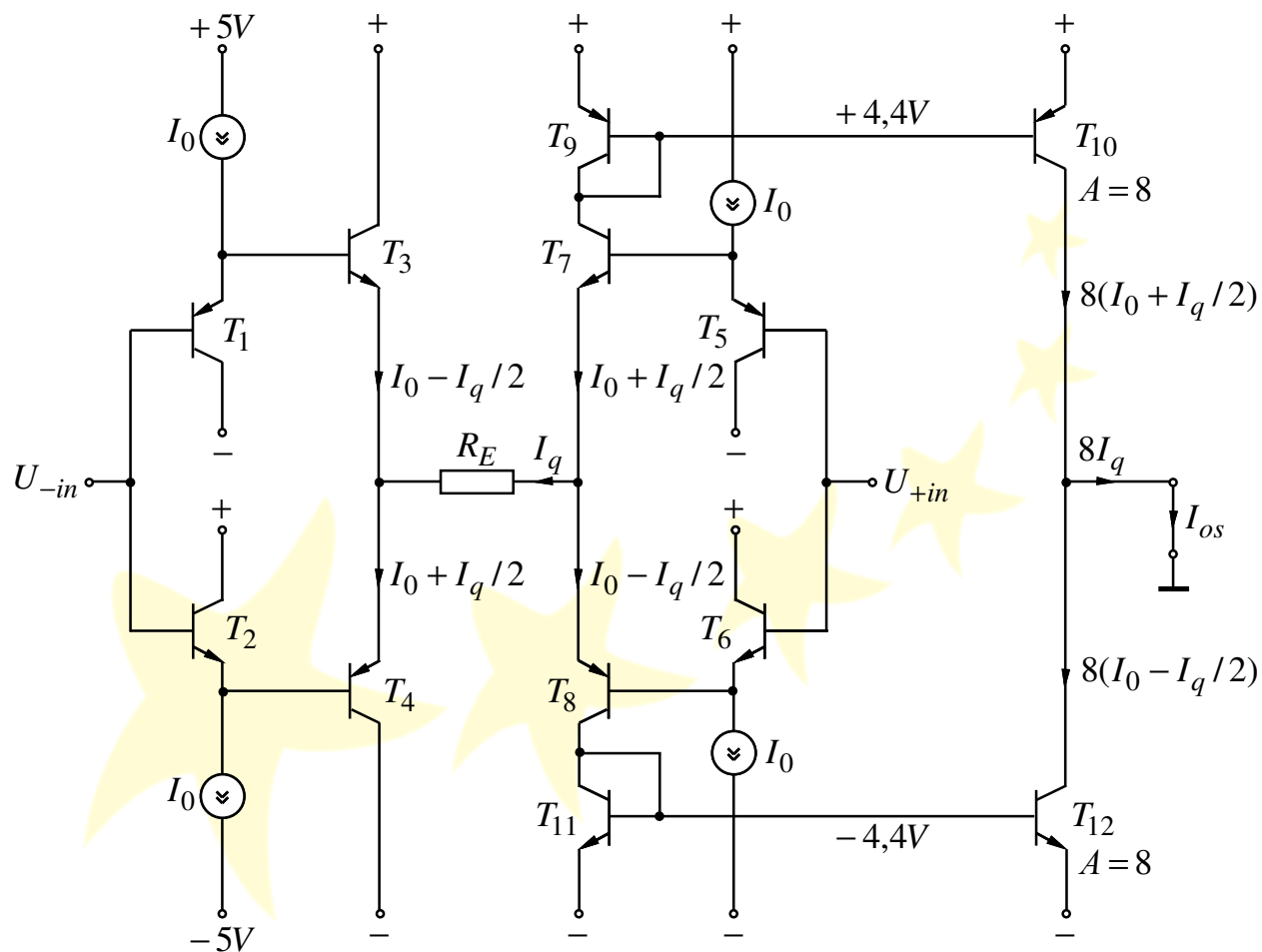
ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„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!



стр. 6 от ...



Фиг. 3.38. Опростена принципна схема на двустъпален ОТА MAX436.



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

Операционни усилватели с вътрешна токова обратна връзка (CFOA)

Операционните усилватели на съпротивление или операционните усилватели с вътрешна токова обратна връзка (Current Feedback Operational Amplifier – CFOA) се различават от стандартните операционни усилватели на напрежение (VFOA) по това, че входното съпротивление на инвертиращия вход е малко и токът може да се контролира от външните елементи в обратната връзка. Следователно, както беше споменато в обзора на трета глава, този вид операционни усилватели могат да се разглеждат като преобразуватели на ток в напрежение или т.нар. трансимпедансни усилватели (Transimpedance Amplifiers).

Опростена принципна схема на трансимпедансен монолитен усилвател тип AD8001 е представена фиг. 9. В нея входното стъпало е реализирано с транзисторите T_1 , T_2 и T_3 и генераторите на ток I_o . Транзисторът T_1 е свързан по схема ОК с динамичен товар (вътрешното съпротивление на I_o), а транзисторът T_2 по отношение на входния сигнал U_{in} е свързан по схема ОБ. Неинвертиращият вход на ОУ е високоомен (типичните стойности на съпротивлението са $1 \dots 10M\Omega$), а инвертиращият вход е с много малко съпротивление ($R_{in-} = 10 \dots 100\Omega$).



Европейски съюз

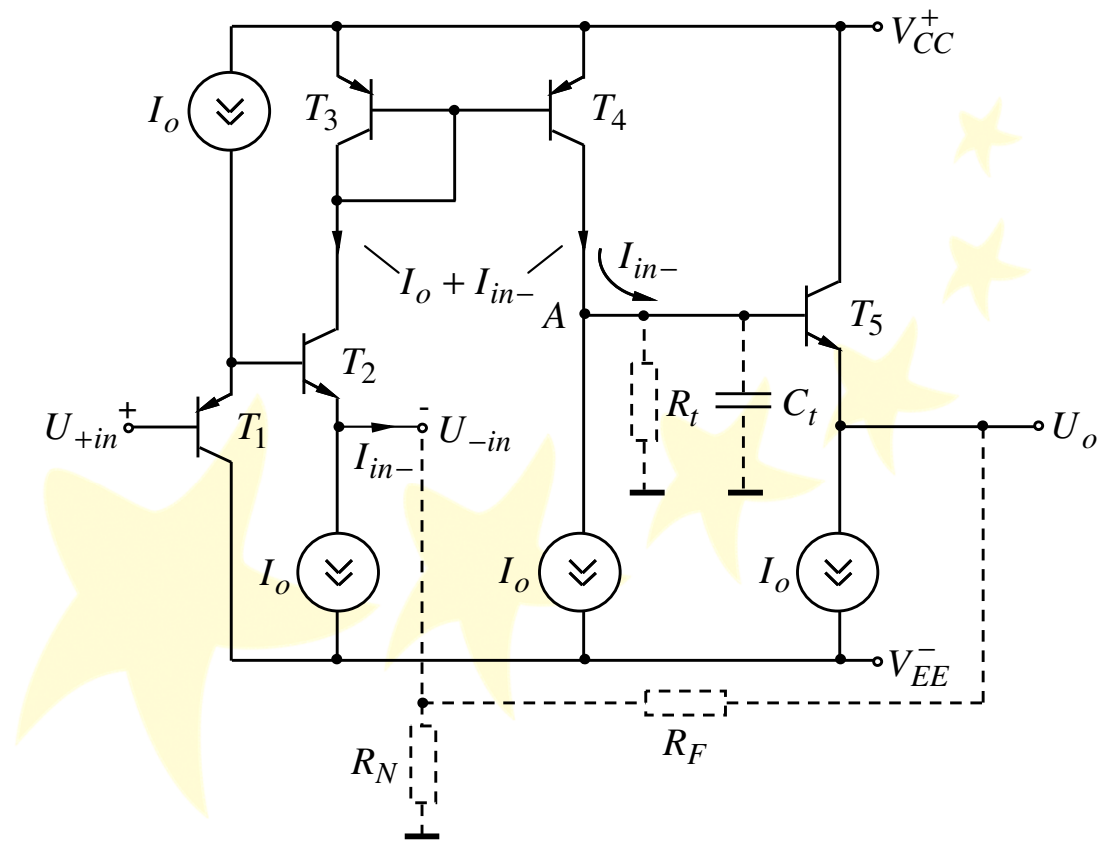
ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„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



Фиг. 9. Опростена принципна схема на биполярен CFOA AD8001.



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 динамичен режим входният ток I_{in-} е пропорционален на разликата между напреженията U_{+in} и U_{-in} . Колекторният ток на T_2 управлява токовото огледало $T_3 - T_4$, което повтаря тока I_{in-} във високоимпеданския възел A . Съпротивлението R_t и капацитетът C_t определят еквивалентния импеданс във възел A . Напрежението във възела A се определя от тока I_{in-} и от еквивалентния проходен импеданс $Z_t = R_t \parallel (1/j\omega C_t)$. В този случай предавателната функция на усилвателя има измерение импеданс за разлика от безразмерния параметър A_d при операционните усилватели на напрежение. Изходното стъпало в схемата е реализирано с транзистора T_5 , свързан по схема ОК, като $U_o \approx U_A$ (U_A е напрежението във възел A), а изходното съпротивление е много малко.

Въз основа на принципната схема на фиг. 10 е представена опростена еквивалентна схема по променлив ток, която често се използва при анализ на електронни схеми. В нея входният и изходният буфер са с коефициент на усилване единица, входното съпротивление на инвертиращия вход е означено с $R_{in-} \approx 1/S$, а изходният импеданс на зависимия източник на ток I_{in-} е представен със съпротивлението R_t и капацитета C_t .

От анализа на еквивалентната схема за изходното напрежение на CFOA се получава



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

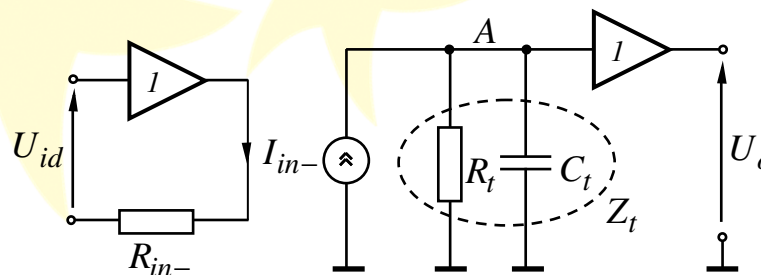
От анализа на еквивалентната схема за изходното напрежение на CFOA се получава

$$\dot{U}_o = \dot{I}_{in-} Z_t = \dot{I}_{in-} \frac{R_t}{1 + j(f/f_p)} \quad \text{или}$$

$$Z_t = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_{in-}} = \frac{R_t}{1 + j(f/f_p)}$$

където Z_t е еквивалентният импеданс на предаване на CFOA, а $f_p = 1/2\pi R_t C_t$ е честотата, за която Z_t спада на ниво $\approx 0,7$ от стойността при ниски честоти R_t . След честотата f_{p1} наклонът на предавателната характеристика в логаритмичен мащаб е приблизително -20dB/dec .

Често анализите се изпълняват, като се приема $R_{in-} = 0$, $R_t \rightarrow \infty$ и $C_t = 0$. В този случай се казва, че CFOA е идеален.



Фиг. 11. Опростена еквивалентна схема на 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