

 **Технически университет – София**

Факултет по електронна техника и технологии

 **Катедра „Електронна техника“**

Презентация № 10

Операционни усилватели (ОУ) – 2. Част 2

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

2.3 Прецизни операционни усилватели

Прецизните усилватели са специален вид монолитни ОУ, които се характеризират с малко входно напрежение и ток на несиметрия (например $U_{io} \leq 100 \mu V$ и $I_{io} \leq 1 nA$), малък дрейф (например $\alpha_{U_{io}} \leq 0,1 \mu V / ^\circ C$), голям коефициент на усилване по напрежение без ОВ (например $A_d \geq 10^6$) и голям коефициент на потискане на синфазните сигнали (например $CMRR \geq 100 dB$). При реализацията на прецизни ОУ важно значение има структурата на входното диференциално стъпало, тъй като от него се определя големината на входното напрежение и ток на несиметрия, температурният им дрейф и коефициентът $CMRR$. Най-често при реализацията на класически прецизни ОУ се използва тристъпалната структура от фиг. 2б. В нея входният диференциален усилвател е със симетричен вход и изход, което осигурява възможност за получаването на по-малко напрежение на несиметрия и по-голям коефициент $CMRR$.

В процеса на реализация на точни постояннотокови мащабиращи усилватели, предназначени за устройства, използвани в науката и промишлеността, често се налага употребата на ОУ с U_{io} , I_{io} и $\alpha_{U_{io}}$, значително по-малки от посочените по-горе, както и A_d и $CMRR$, значително по-големи от посочените. За да се удовлетворят тези изисквания, в практиката се използват т. нар. ОУ с автоматична корекция на нулата (*Auto-zeroing amplifiers* или *Chopper stabilized amplifiers*). Това са прецизни усилватели, които по отношение на захранване, вход, изход и т.н. не се различават от стандартните ОУ, но се характеризират с електрически параметри, например $U_{io} \leq 10 \mu V$, $I_{io} \leq 0,1 nA$, $\alpha_{U_{io}} \approx 0,01 \mu V / ^\circ C$ и $A_d > 10^6$. Тези стойности на параметрите в ОУ с автоматична корекция на нулата се постигат чрез модификация на структурата и принципа на действие на стандартните прецизни усилватели на напрежение. В резултат на това структурата на усилвателите е съществено усложнена, като в нея са добавени още един ОУ, два (или повече) електронни ключа, два запомнящи кондензатора и вътрешен импулсен генератор с две фази на произвеждания сигнал. По този начин площта на чипа на ИС се увеличава поне два пъти, а оттам нараства и цената на готовите за употреба ОУ.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

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

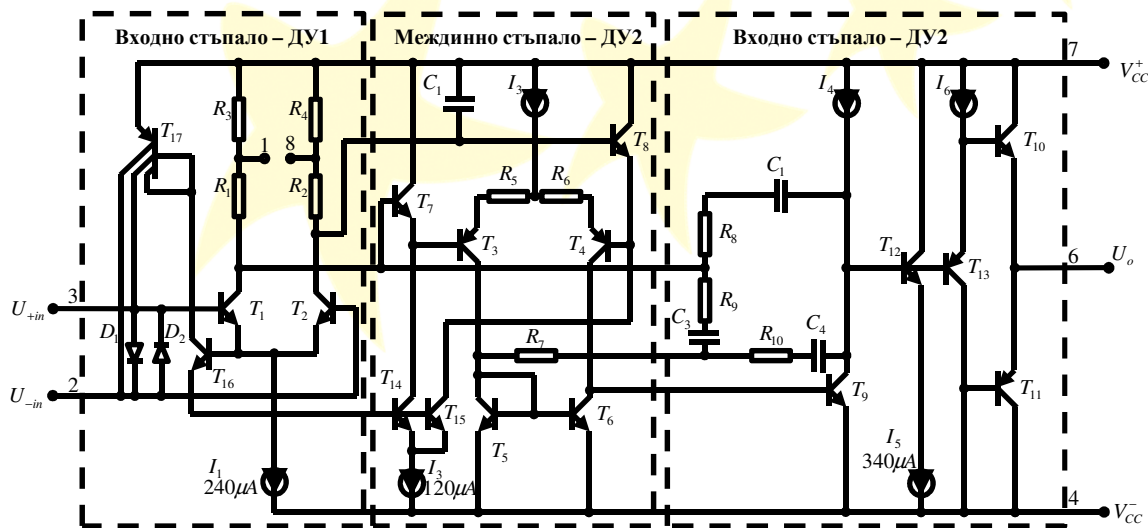
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Класически прецизни операционни усилватели

На фиг. 7 е представена опростена принципна схема на основния прецизен ОУ тип ОР27 (ОРА27). Той е изграден по тристъпалната структура. Входният ДУ е съставен от транзисторите T_1 и T_2 , свързани по схема ОЕ. Колекторните резистори са разделени на две ($R_1 = R_3 = 10k\Omega$ и $R_2 = R_4 = 10k\Omega$). От средните им точки има два извода (1 и 8) към които се включва потенциометър за компенсиране на напрежението U_{io} . Между входовете на ОУ (2 и 3) са включени диоди D_1 и D_2 , които да осигурят защита срещу големи входни диференциални напрежения ($U_{id} \geq 0,6V$). Освен това с помощта на многоколекторния транзистор T_{17} , свързан като токово огледало, се осъществява компенсация на входните поляризиращи токове и техния температурен дрейф.



Фиг. 7. Опростена принципна схема на прецизен операционен усилвател ОР27.



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

Диференциалното напрежение от колекторите на T_1 и T_2 през емитерните повторители T_7 и T_8 се подава към второто диференциално стъпало, изпълнено с транзисторите T_3 и T_4 , които работят с управляем динамичен товар (T_5 и T_6). Емитерните повторители, реализирани с T_7 и T_8 , работят с динамични товари (T_{14} и T_{15}). Така първото стъпало работи с високоомен товар, представляващ входното съпротивление на каскодните повторители с T_7 и T_8 . Това спомага за получаване на по-голям коефициент на усилване на първото стъпало. Както първото, така и второто диференциално стъпало са с генератори на ток в емитерната верига, означени с I_1 и I_2 . Това осигурява голям коефициент на потискане на синфазните сигнали $\approx 120dB$. Драйверното стъпало е изпълнено с транзистора T_9 , свързан по схема ОЕ с динамичен товар, представен в схемата с източника I_4 . Елементите $C_1 - C_4$ и $R_8 - R_9$ формират честотна корекция на АЧХ с изоставане по фаза и осигуряват устойчивостта на ОУ. Сигналят от колектора на T_9 се подава към базите на комплементарната двойка транзистори T_{10} и T_{11} през емитерните повторители, реализирани с T_{12} и T_{13} , които имат динамични товари (означени с I_5 и I_6). Крайните транзистори T_{10} и T_{11} работят в клас АВ, осигуряван от напреженията В – Е на транзисторите T_{12} и T_{13} . Основните електрически параметри на ОУ от фиг. 7 са дадени в таблица 3.



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 3. Прецизни операционни усилватели.

| Тип ОУ | Производител | U_{io} | I_{iB} | B_1 | SR | V_{CC} min/max | Брой ОУ с един корпус | Особености |
|----------|-------------------|------------|----------|---------|---------------|---------------------|-----------------------------|----------------------|
| AD8551 | Analog Dev. | 1 μ V | 10pA | 1,5MHz | 0,4V/ μ s | 2,7/5V | 1 | autozero |
| AD8628 | Analog Dev. | 1 μ V | 30pA | 2,5MHz | 1V/ μ s | 2,7/5V | 1 | autozero |
| ICL7650S | Intersil | 5 μ V | 10pA | 2MHz | 2,5V/ μ s | 4,5/16V | 1 | autozero |
| OP27 | много | 10 μ V | 10nA | 8MHz | 2,8V/ μ s | 8/44V | 1 | $A_d=1,8 \cdot 10^6$ |
| OP177 | Analog Dev. | 10 μ V | 0,3nA | 0,6 MHz | 0,3V/ μ s | 6/36V | 1 | $A_d=10^7$ |
| OPA334 | Texas I. (TI) | 5 μ V | 70pA | 2MHz | 1,8V/ μ s | 2,7/5,5V | 1 | autozero |
| OPA4277 | Burr B. (TI) | 10 μ V | 1nA | 1MHz | 0,8V/ μ s | 6/36V | 4 | $A_d=10^7$ |
| OPA627 | Burr B. (TI) | 40 μ V | 1pA | 16 MHz | 55V/ μ s | 9/36V | 1 | $A_d=10^6$ |
| HA5147 | Harris (Intersil) | 30 μ V | 15nA | 130 MHz | 35V/ μ s | 8/36V | 4 | $A_d=10^6$ |
| LT1028 | Lin. Tech. | 10 μ V | 25nA | 75 MHz | 15V/ μ s | 8/32V | 1 | $A_d=10^7$ |
| LT1114 | Lin. Tech. | 30 μ V | 50pA | 750 kHz | 0,3V/ μ s | 9/32V | 4 | $A_d=10^7$ |
| LT1125 | Lin. Tech. | 20 μ V | 5nA | 12 MHz | 4V/ μ s | 8/40V | 4 | $A_d=10^6$ |
| LT1218 | Lin. Tech. | 25 μ V | 30nA | 0,3 MHz | 0,1V/ μ s | 2/30V | 1 | $A_d=10^6$ |
| LT2078 | Lin. Tech. | 30 μ V | 6nA | 0,2 MHz | 0,1V/ μ s | 5/40V | 2 | $A_d=10^7$ |
| LTC1152 | Lin. Tech. | 1 μ V | 10pA | 0,7 MHz | 0,5V/ μ s | 2,7/14V | 1 | autozero |
| MAX430 | Maxim | 1 μ V | 10pA | 0,5 MHz | 0,5V/ μ s | 5/32V | 1 | autozero |
| MAX4239 | Maxim | 2 μ V | 1pA | 1MHz | 1,6V/ μ s | 2,7/5,5V | 1 | autozero |
| TLC2652A | Texas I. | 1 μ V | 4pA | 1,9MHz | 2,8V/ μ s | 1,9/8V | 1 | autozero |



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

2.4 Rail-to-Rail OУ

Rail-to-Rail усилвателите са специален вид прецизни ОУ, за които работата със синфазни входни напрежения е възможна не само до отрицателното захранващо напрежение, но и до положителното захранващо напрежение. Примерна схема на Rail-to-Rail ОУ може да се получи въз основа на еднополярния CMOS усилвател, показан на фиг. 6. На фиг. 10 е показана схема на CMOS диференциален усилвател за ОУ тип LMC6484. Двойката MOS транзистори T_1 и T_2 са с вграден n-канал, като подложките им са свързани към положителното захранващо напрежение $+5V$. Биполярните транзистори T_3 и T_4 , свързани като токово огледало, са динамичен товар за T_1 и T_2 . Принципът на работа на това стъпало е илюстриран на фиг. 10. При подаване на входно синфазно напрежение, равно на $+5V$ или $-5V$, праговите напрежения се променят, при което MOS транзисторите остават в пентоден режим на работа.



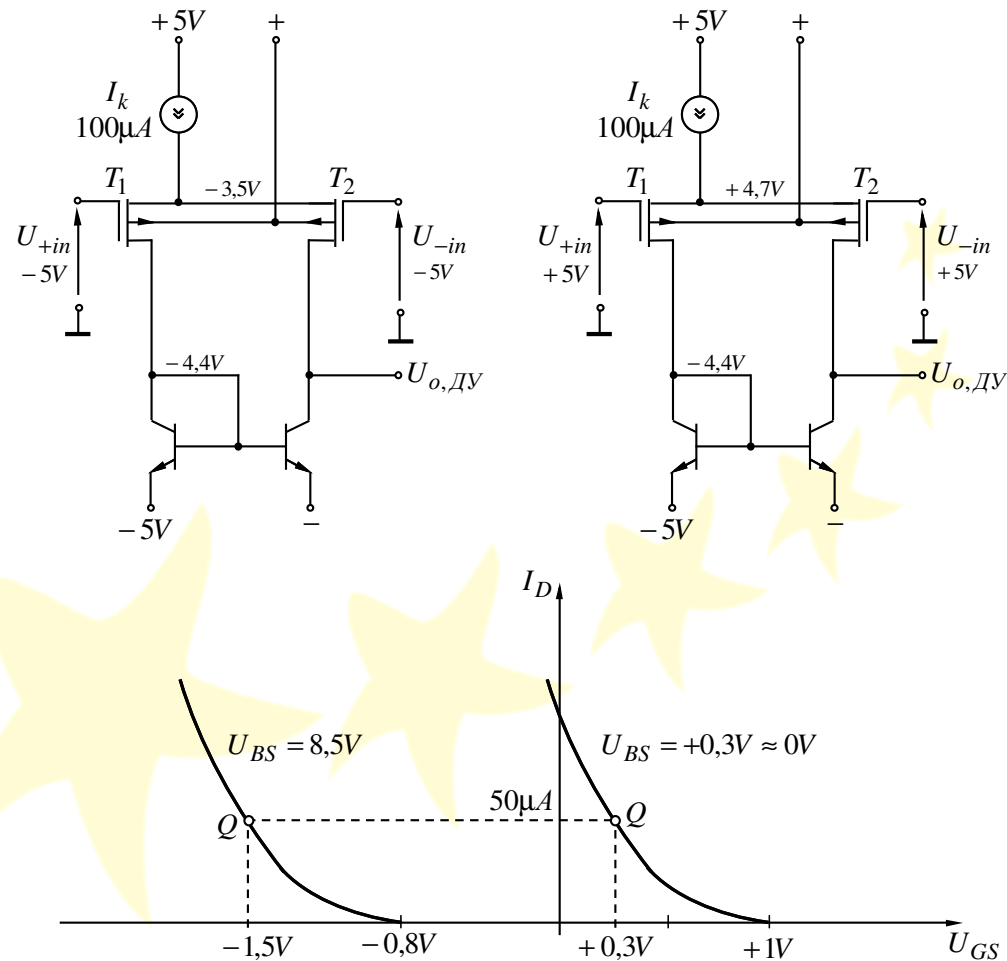
Европейски съюз

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. 10. Rail-to-Rail CMOS диференциален усилвател за ОУ тип LMC6484. Предавателни характеристики на входните MOS транзистори и разположение на работните точки в крайните случаи: а) за $U_{iCM} = V_{SS}^-$; б) за $U_{iCM} = V_{DD}^+$.



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 4. Rail-to-Rail ОУ.

| Тип ОУ | Производител | U_{io} | I_{iB} | B_1 | SR | V_{CC} min/max | Брой ОУ с един корпус | Особености |
|---------|--------------|-------------|-----------|---------|---------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|
| OP450 | Analog D. | 3mV | 2pA | 1MHz | 2V/ μ s | 2,7/6V | 4 | $I_{CC}=0,7mA$ |
| OP462 | Analog D. | 45 μ V | 400nA | 15MHz | 10V/ μ s | 2,7/12V | 4 | $I_{CC}=0,5mA$ |
| OP484 | Analog D. | 65 μ V | 60nA | 3MHz | 2V/ μ s | 3/36V | 4 | |
| OP491 | Analog D. | 80 μ V | 30nA | 3MHz | 400V/ms | 2,7/12V | 4 | $I_{CC}=0,2mA$ |
| OP496 | Analog D. | 300 μ V | 10nA | 300kHz | 250V/ms | 3/12V | 4 | $I_{CC}=60\mu A$ |
| AD8032 | Analog D. | 1mV | 500nA | 80MHz | 30V/ μ s | 2,7/10V | 2 | $I_{CC}=0,8mA$ |
| AD8534 | Analog D. | 5mV | 5pA | 3MHz | 5V/ μ s | 2,7/6V | 4 | $I_o=250mA$ |
| OPA4340 | Burr B. | 500 μ V | 10pA | 5,5MHz | 6V/ μ s | 2,5/5V | 4 | |
| OPA4350 | Burr B. | 150 μ V | 0,5pA | 35MHz | 22V/ μ s | 2,5/5,5V | 4 | |
| LT1218 | Lin. Tech. | 25 μ V | 30nA | 300kHz | 0,1V/ μ s | 2/30V | 1 | |
| LT1491 | Lin. Tech. | 200 μ V | 4nA | 180kHz | 60V/ms | 2,5/40V | 4 | $I_{CC}=40\mu A$ |
| LT1496 | Lin. Tech. | 200 μ V | 250pA | 2,7kHz | 1V/ms | 2,2/36V | 4 | $I_{CC}=1,2\mu A$ |
| LT1499 | Lin. Tech. | 150 μ V | 250nA | 10MHz | 4V/ μ s | 2,2/30V | 4 | |
| LT1633 | Lin. Tech. | 500 μ V | 1 μ A | 45MHz | 45V/ μ s | 2,7/30V | 4 | |
| LT1636 | Lin. Tech. | 100 μ V | 5nA | 220kHz | 70V/ms | 2,7/44V | 2 | $I_{CC}=55\mu A$ |
| LT1639 | Lin. Tech. | 200 μ V | 15nA | 1,2 MHz | 0,5V/ μ s | 2,5/44V | 4 | $U_{iCM} > V_{CC}$ |
| LTC1152 | Lin. Tech. | 1 μ V | 10pA | 700kHz | 500V/ms | 2,7/14V | 1 | autozero |
| LTC1367 | Lin. Tech. | 200 μ V | 15nA | 400kHz | 130V/ms | 1,8/30V | 4 | $I_{CC}=0,4mA$ |
| MAX4129 | Maxim | 200 μ V | 50nA | 5MHz | 2V/ μ s | 2,7/6,5V | 4 | |
| MAX4134 | Maxim | 350 μ V | 50nA | 3MHz | 4V/ μ s | 2,7/6,5V | 4 | |
| MAX4164 | Maxim | 500 μ V | 1pA | 200kHz | 115V/ms | 3/5V | 4 | $I_{CC}=25\mu A$ |
| MAX4169 | Maxim | 250 μ V | 50nA | 5MHz | 2V/ μ s | 2,7/6,5V | 4 | |
| MAX4244 | Maxim | 200 μ V | 2nA | 90kHz | 40V/ms | 1,5/5,5V | 4 | $I_{CC}=10\mu A$ |
| MAX4334 | Maxim | 650 μ V | 25nA | 3MHz | 1,5V/ μ s | 2,3/6,5V | 4 | $I_{CC}=0,3mA$ |
| MC33502 | Motorola | 500 μ V | 40fA | 4MHz | 3V/ μ s | 1/7V | 2 | |
| LMC6464 | National | 300 μ V | 100fA | 50kHz | 23V/ms | 3/15V | 4 | $I_{CC}=20\mu A$ |
| LMC6484 | National | 100 μ V | 20fA | 1,5MHz | 1V/ μ s | 3/15V | 4 | $I_{CC}=0,6mA$ |
| LMC6684 | National | 500 μ V | 80fA | 1,2MHz | 1,2V/ μ s | 1,8/10V | 4 | |
| LMC7111 | National | 900 μ V | 100fA | 25kHz | 15V/ms | 1,8/10V | 1 | $I_{CC}=25\mu A$ |
| NE5234 | Philips | 200 μ V | 90nA | 2,5MHz | 800V/ms | 1,8/6V | 4 | |



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

В таблица 4 са дадени параметрите на някои често използвани Rail-to-Rail ОУ. При тях входното и изходното напрежение може да се променят приблизително до стойностите на захранващите напрежения. При включване на товари с малко еквивалентно съпротивление максималното изходно напрежение обикновено намалява спрямо стойността на празен ход, като достига стойност с $100mV$ по-малка от захранващото напрежение. Rail-to-Rail усилвателите са особено подходящи за работа с ниски захранващи напрежения, защото по-ефективно може да се използва ОУ. Така например голяма част от Rail-to-Rail усилвателите работят с едно захранващо напрежение $+5V$ или с двуполлярно напрежение $\pm 5V$ и много рядко с едно захранващо напрежение $+15V$.

Други видове ОУ на напрежение са нискошумящите прецизни усилватели с малка плътност на шумовото напрежение, високоскоростните усилватели със скорост на нарастване на изходния сигнал по-голяма от $100V/\mu s$ и мощните усилватели, предназначени за работа с големи захранващи напрежения (например повече от $100V$) и голям изходен ток (например повече от $2A$). В таблица 5 са дадени параметрите на някои често използвани нискошумящи прецизни 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!



Таблица 5. Нискошумящи операционни усилватели.

| Тип ОУ | Производител | U_{io} | I_{IB} | B_1 | SR | V_{CC} min/max | Брой ОУ с един корпус | Особености \bar{S}_U / \bar{S}_I на \sqrt{Hz} |
|---------|--------------|-------------|------------|--------|---------------|---------------------|-----------------------------|--|
| AD797 | Analog D. | 25 μ V | 300nA | 8MHz | 20V/ μ s | 10/36V | 1 | 1nV/2 pA |
| AD8597 | Analog D. | 15 μ V | 40nA | 10MHz | 14V/ μ s | 10/30V | 1 | 1nV/2pA |
| OPA128 | Burr B. (TI) | 200 μ V | 75fA | 1MHz | 3V/ μ s | 10/30V | 1 | 27nV/0,1fA |
| OPA627 | Burr B. (TI) | 40 μ V | 1pA | 16MHz | 55V/ μ s | 9/36 V | 1 | 4,5nV/1,6fA |
| OPA686 | Burr B. (TI) | 400 μ V | 10 μ A | 300MHz | 600V/ μ s | 8/12V | 1 | 1,3nV/2pA |
| LT1028 | Lin. Tech. | 30 μ V | 40nA | 75MHz | 15V/ μ s | 8/32V | 1 | 1nV/1pA |
| LT1113 | Lin. Tech. | 500 μ V | 300pA | 6MHz | 4V/ μ s | 8/36V | 4 | 4,5nV/10fA |
| MAX4106 | Maxim | 300 μ V | 18 μ A | 300MHz | 275V/ μ s | 5/11V | 1 | 0,75nV/3pA |
| CLC425 | National | 100 μ V | 12 μ A | 2GHz | 350V/ μ s | 6/14V | 1 | 1nV/2pA |
| LMC6001 | National | 200 μ V | 25fA | 1MHz | 1V/ μ s | 5/14V | 1 | 22nV/0,1fA |

Високоскоростните (бързодействащите) операционни усилватели се използват основно за реализацията на видеоусилватели, високоскоростни инструментални усилватели, входни стъпала в паралелни АЦП и изходни стъпала в ЦАП със сумиране на токовете. Високоскоростните ОУ са най-малко три порядъка по-бързи от класическия универсален ОУ тип μ A741. По-голяма част от бързодействащите усилватели са с по-лоши постояннотокови параметри в сравнение в универсалните и прецизните ОУ. Така например бързодействащите усилватели имат сравнително голямо входно напрежение на несиметрия, голям поляризиращ ток и за някои от тях голям ток на консумация. Обикновено бързодействащите ОУ работят с ниски захранващи напрежения, например $\pm 5V$ и по-рядко с по-големи напрежения ($\pm 15V$). От технологична гледна точка полесно могат да се получат нисковолтови транзистори с висока транзитна честота. Разбира се, съществуват и бързодействащи усилватели, подходящи за работа със захранващи напрежения до $\pm 15V$.



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

Мощните операционни усилватели се разделят на усилватели с голямо изходно напрежение и голям изходен ток:

Операционни усилватели с голямо изходно напрежение: Този тип усилватели се характеризират с максимални изходни напрежения, значително надвишаващи възможностите на универсалните усилватели. Това е една сравнително малка група ОУ, тъй като стандартните производствени процеси не са подходящи за реализацията на подобен вид ИС. Поради това за ОУ с работни напрежения по-големи от 100V се използват хибридни схеми, които са обикновено са с висока цена. Изключение прави, например РА42.

Операционни усилватели с голям изходен ток: Този тип усилватели се характеризират с максимален изходен ток, например по-голям от 2А. Протичането на голям ток обуславя и сравнително голяма загубна мощност в ОУ. Затова обикновено работните напрежения за тези усилватели се избират със стойности под 100V . И тук най-качествените ОУ се произвеждат по хибридни технологии. Въпреки някои ограничения мощните ОУ с голям изходен ток могат да осигурят сравнително голяма изходна мощност и голяма скорост на нарастване на изходното напрежение, които трудно могат да се постигнат от усилвател на мощност, включващ предусилвател с универсален ОУ и крайно стъпало с комплементарна двойка транзистори, обхванати от обща ООВ.



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!

