

---

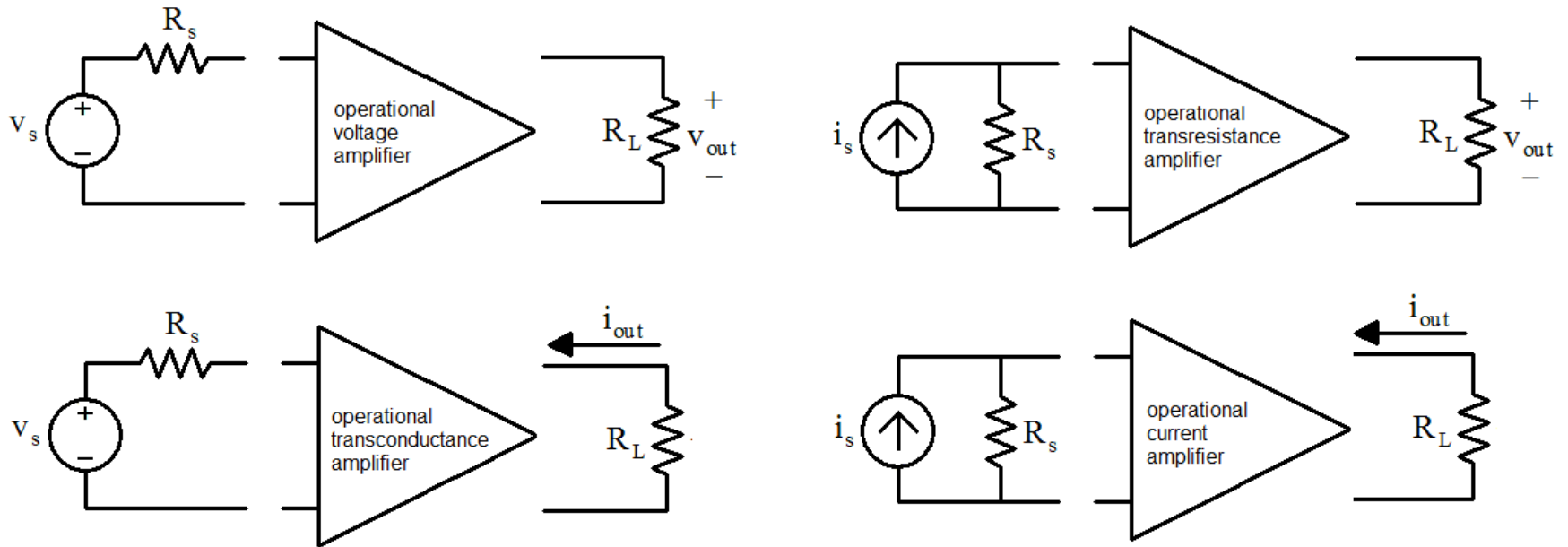
# Операционни усилватели - 3

---

Проектиране на аналогови интегрални схеми

Емил Д. Манолов, [edm@tu-sofia.bg](mailto:edm@tu-sofia.bg)  
кат. “Електронна техника”, Технически университет - София

# Видове операционни усилватели

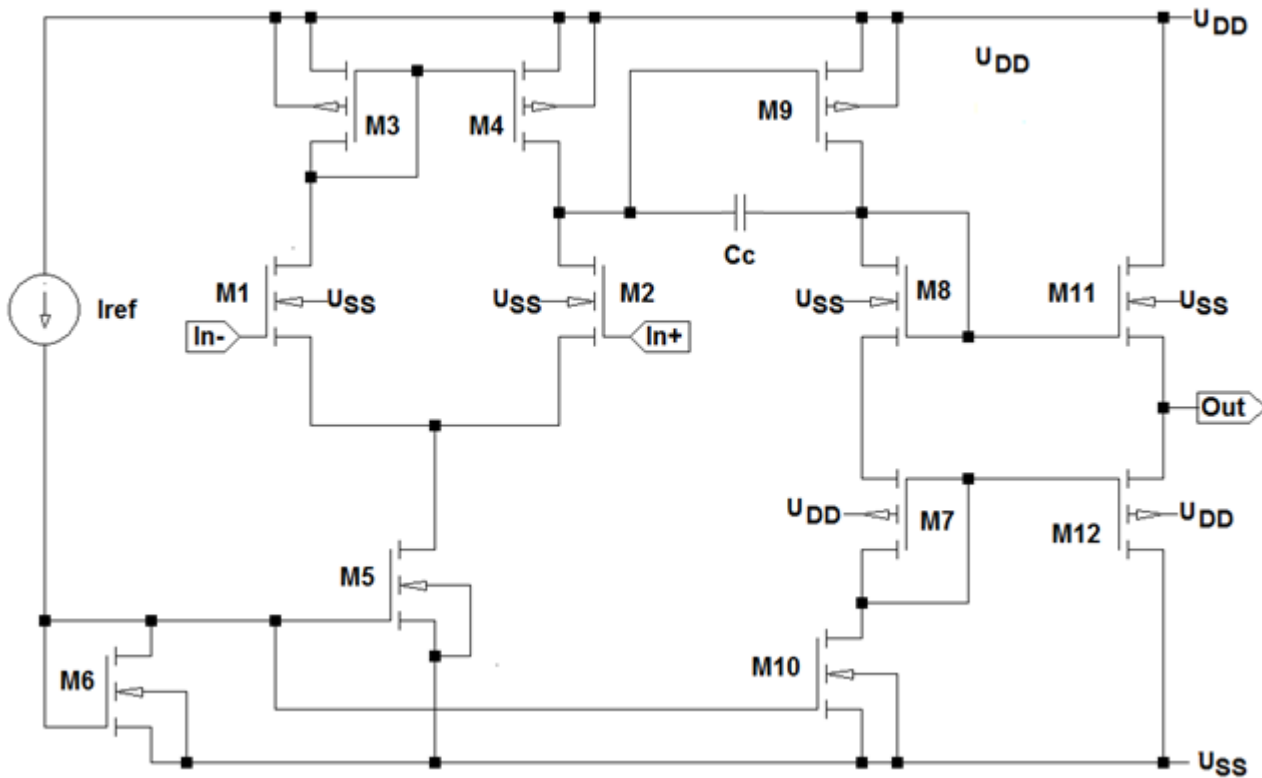


- стандартни операционни усилватели (operational voltage amplifier, Op Amp):  
ВХОД – напрежение, ИЗХОД – напрежение.
- операционни усилватели на проводимост (operational transconductance amplifier, OTA):  
ВХОД – напрежение, ИЗХОД – ТОК.
- операционни трансимпедансни усилватели (operational transresistance amplifier, OTRA):  
ВХОД – ТОК, ИЗХОД – напрежение.
- операционни усилватели на ток (operational current amplifier, OCA):  
ВХОД – ТОК, ИЗХОД – ТОК.

# Стандартен операционен усилвател (Voltage-mode operational amplifier - VMOA)

- високо входно съпротивление  $r_{in} \rightarrow \infty$ ;
- ниско изходно съпротивление  $r_{out} (r_o) \rightarrow 0$ ;
- коэффициент на усилване на входното напрежение  $A_u \rightarrow \infty$

# Стандартен ОУ



$$GBW = \frac{g_{m2}}{2\pi C_c}$$

$$f_2(f_{nd}) = \frac{g_{m9}}{2\pi C_L}$$

$$f_z = \frac{g_{m9}}{2\pi C_c}$$

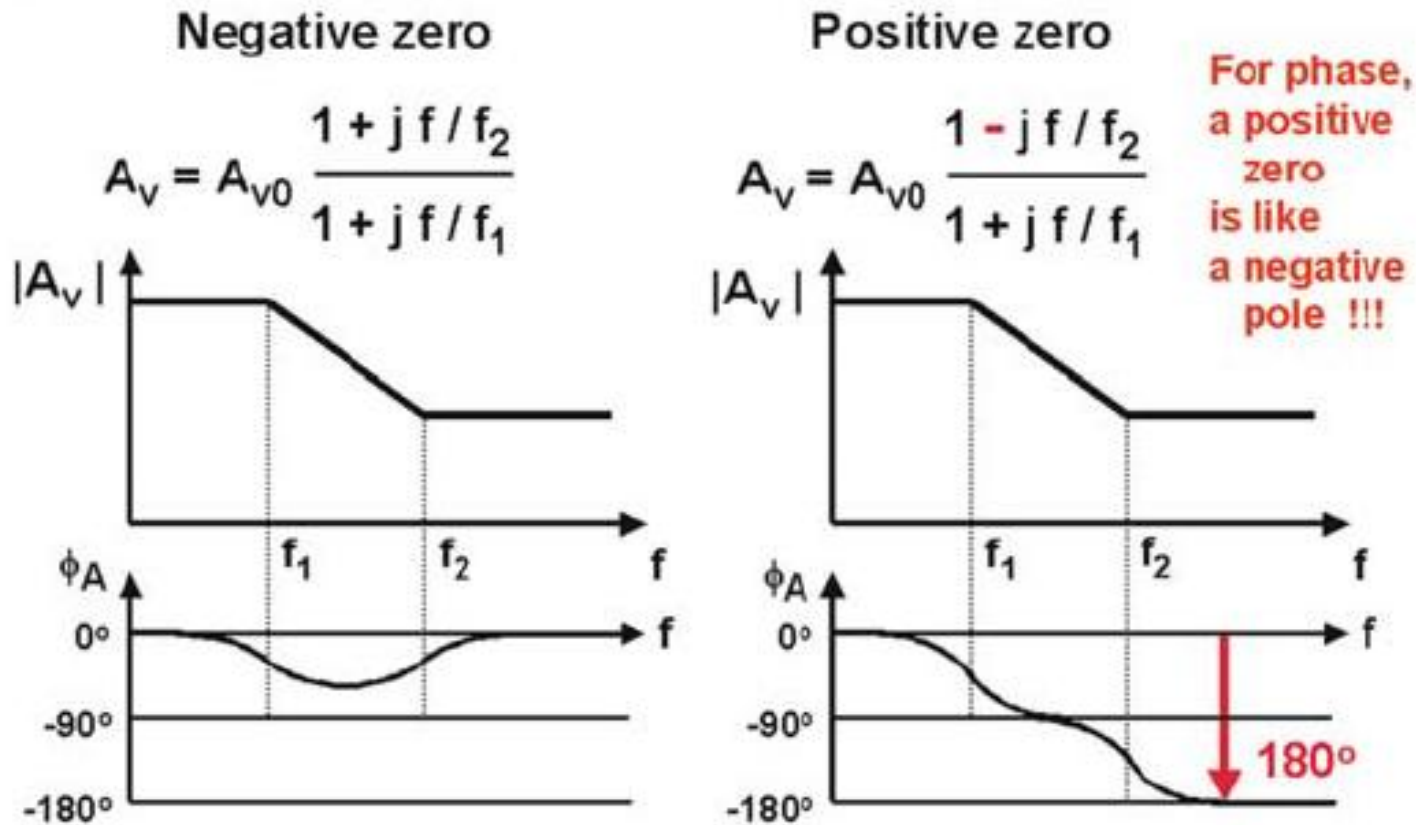
$$f_z > 10GBW$$

$$f_{p2}(f_{nd}) > 2,2GBW$$

$$A_{ud} \approx \left( -\frac{g_{m2}}{g_{ds2} + g_{ds4}} \right) \left( -\frac{g_{m9}}{g_{ds9} + g_{ds10}} \right) \left( \frac{g_{m11} + g_{m12}}{g_{m11} + g_{m12} + g_{mb11} + g_{mb12}} \right)$$

$$r_{out} = \frac{1}{g_{m11} + g_{mb11} + g_{m12} + g_{mb12}}$$

# Стандартен ОУ – ефект на положителната нула



# Компенсация на нулата със сериен резистор

$$f_z = \frac{1}{2\pi C_c (1/g_{m9} - R_c)}$$



$R_c = 1/g_{m9}$  No zero

$R_c > 1/g_{m9}$  Negative zero

$R_c \gg 1/g_{m9}$   $\rightarrow$   $f_z = -\frac{1}{2\pi C_c R_c}$

При “отрицателна” нула е желателно стойността ѝ да е близка до тази на втория (не доминиращ) полюс с оглед компенсирането му.

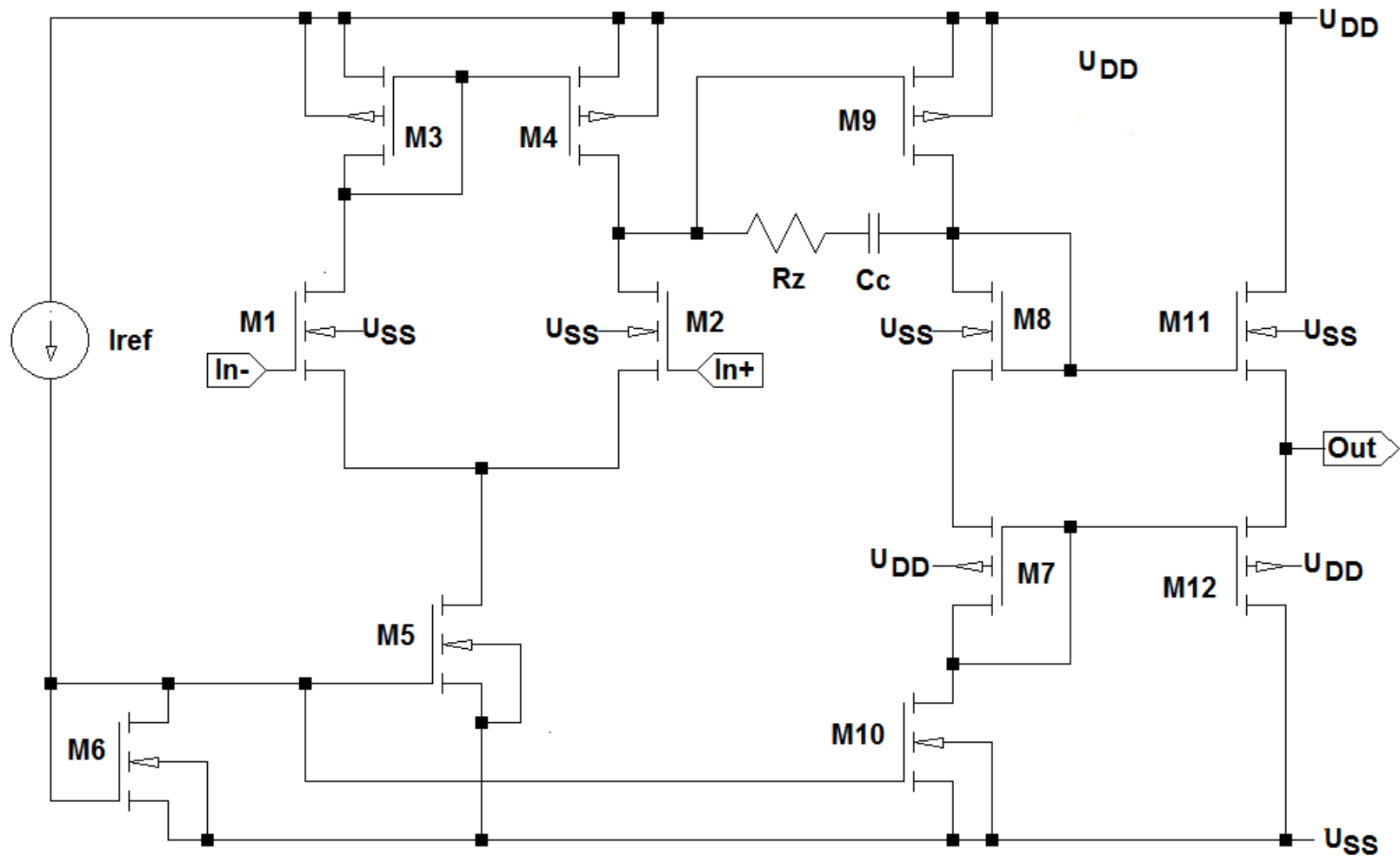
$f_z \geq 2,2\text{GBW}$   $\rightarrow$   $R_c \leq \frac{1}{2,2g_{m2}}$

Final choice :

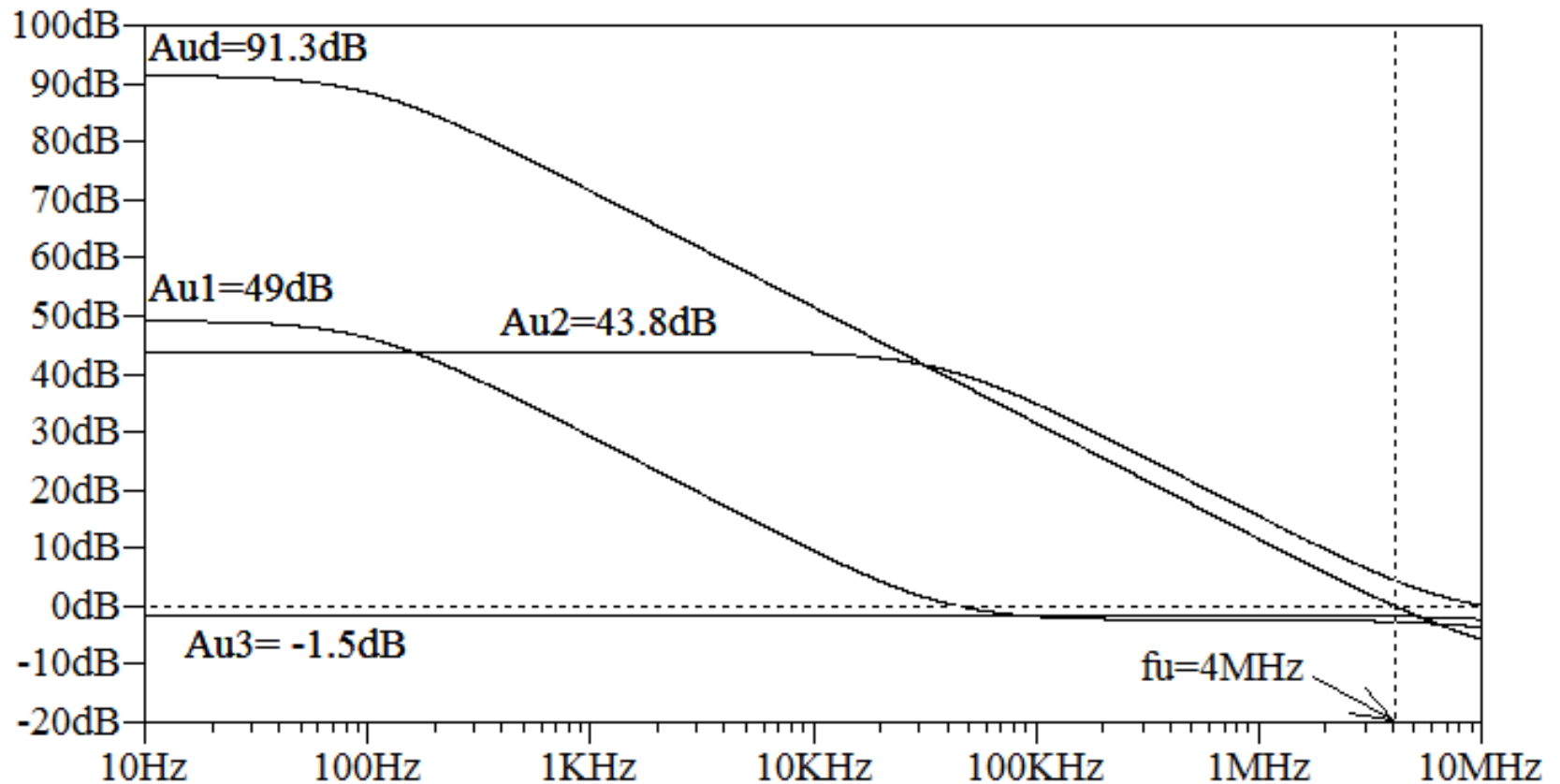
$$\frac{1}{g_{m9}} \ll R_c \leq \frac{1}{2,2g_{m2}}$$

Стойността на  $R_c$  се избира максимално близка до  $\frac{1}{2,2g_{m2}}$

# Стандартен ОУ с компенсирателен серийен резистор

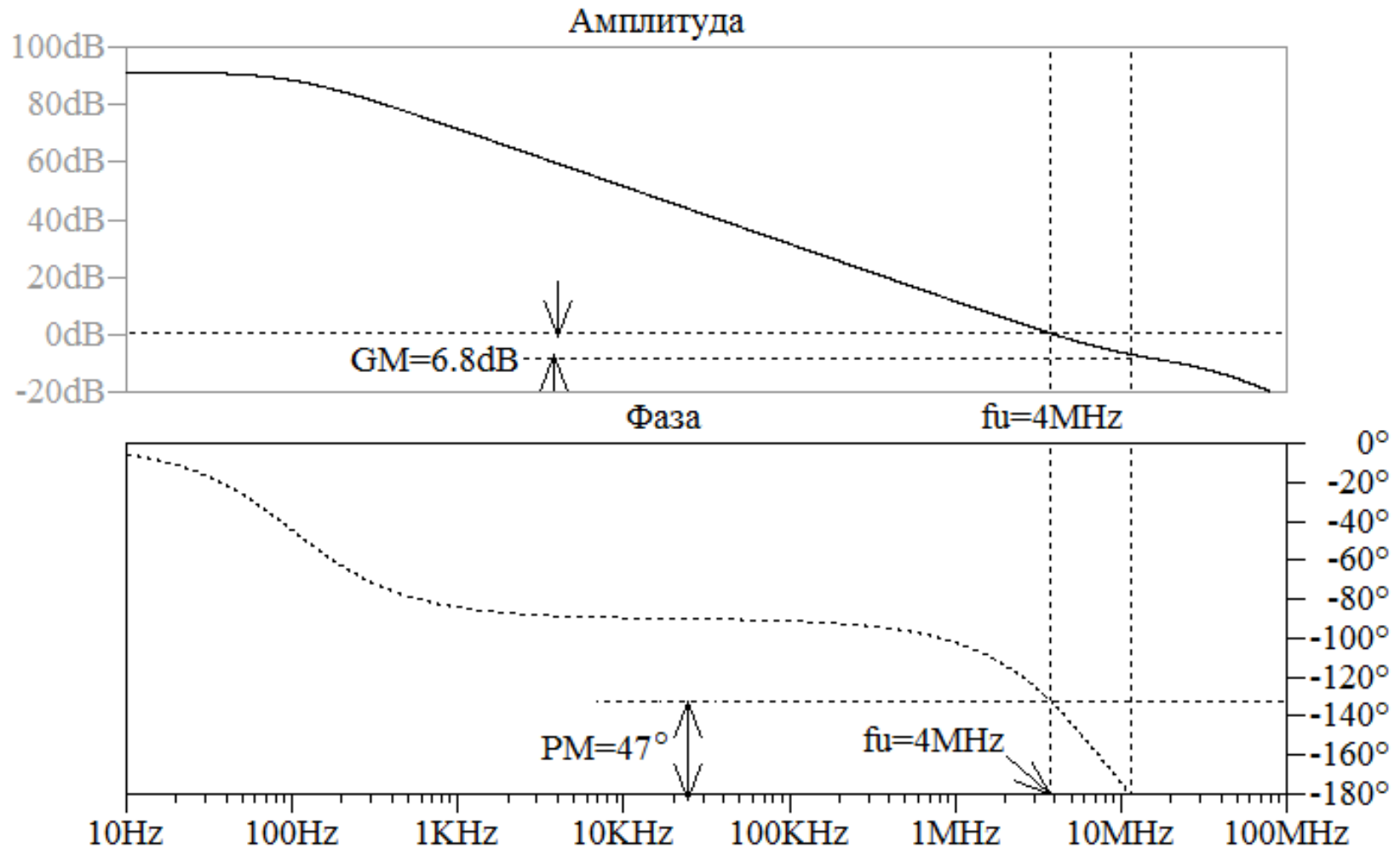


# АЧХ без компенсиращ сериен резистор

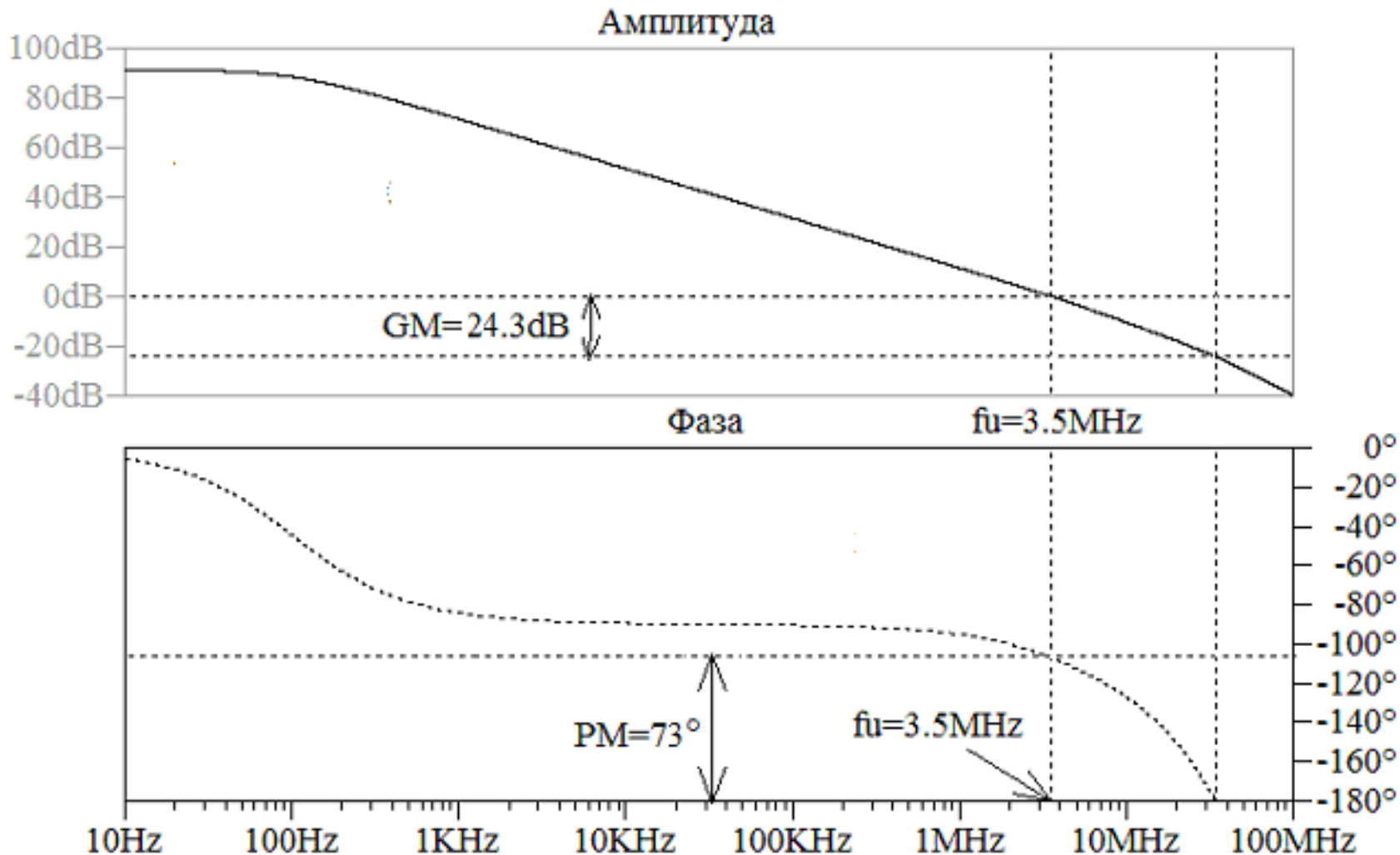




# АЧХ и ФЧХ без компенсиращ сериен резистор



# АЧХ и ФЧХ с компенсиращ сериен резистор



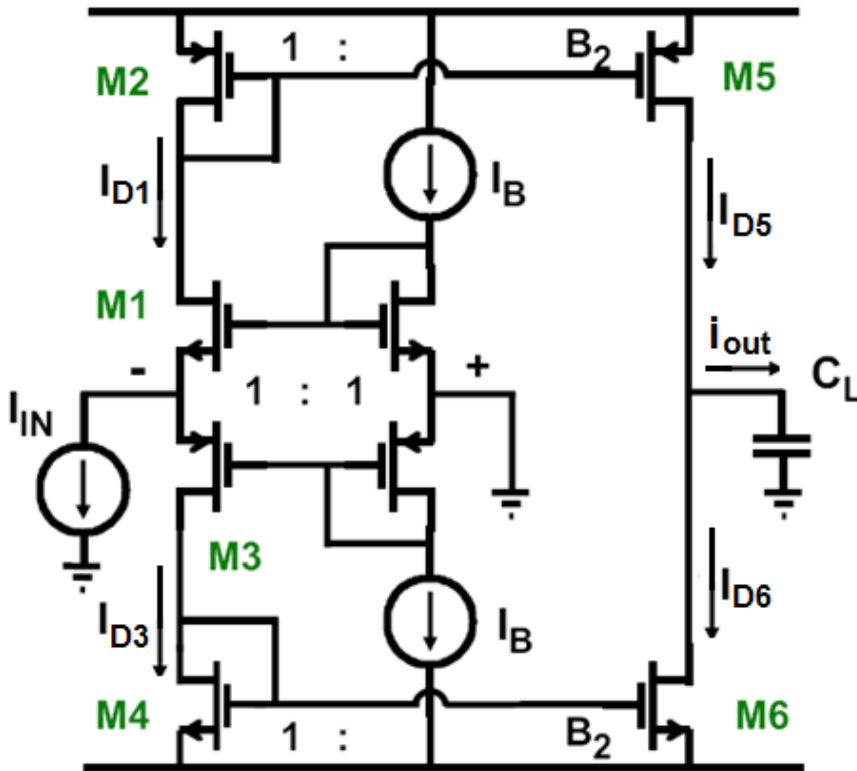
# Операционни усилватели на ток (Operational current amplifier - OCA)

Използват се за обработка на сигнали от токови сензори и при високочестотни приложения.

Характеристика на операционните усилватели на ток (OCA):

- ниско входно съпротивление  $r_{in} \rightarrow 0$ ;
- високо изходно съпротивление  $r_{out} (r_o) \rightarrow \infty$ ;
- проходно съпротивление  $A_R = u_{out} / i_{in}$ ;
- коефициент на усилване на входния ток  $A_i = i_{out} / i_{in}$ ;
- изходно напрежение  $u_{out} = i_{out} r_{out} = A_R r_{out} i_{in}$

# Базова схема на ОСА



$$I_{D1} = I_B + \frac{i_{in}}{2}$$

$$I_{D3} = I_B - \frac{i_{in}}{2}$$

$$r_{i1} = \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1}}$$

$$r_{i3} = \frac{1}{g_{m3} + g_{mb3}}$$

$$r_{in} = r_{i1} \parallel r_{i3} \approx \frac{1}{2(g_{m1} + g_{mb1})} \approx \frac{1}{2,4g_{m1}}$$

$$r_{out} = r_{ds6} \parallel r_{ds5} = \frac{1}{g_{ds6} + g_{ds5}}$$

$$I_{D5} = B_2 \left( I_B + \frac{i_{in}}{2} \right)$$

$$I_{D6} = B_2 \left( I_B - \frac{i_{in}}{2} \right)$$

$$i_{out} = I_{D5} - I_{D6} = B_2 i_{in}$$

$$A_i = B_2$$

$$u_{out} = i_{out} r_{out} = B_2 r_{out} i_{in}$$

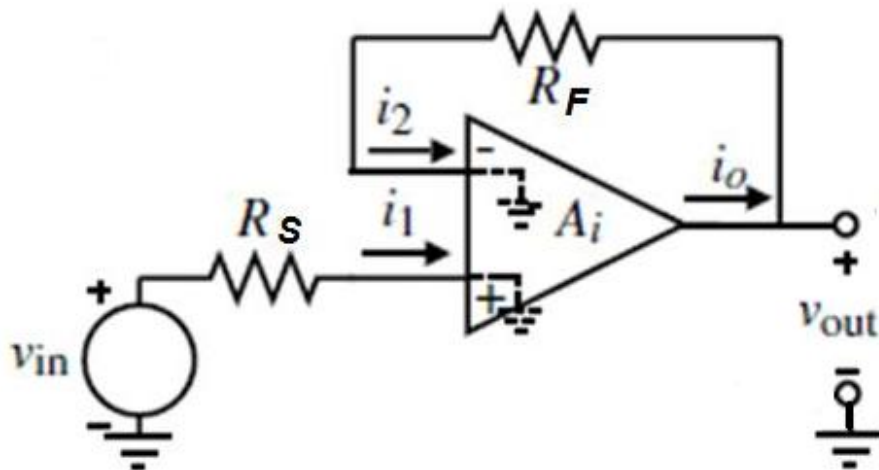
$$A_R = \frac{u_{out}}{i_{in}} = B_2 r_{out}$$

$$BW = f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi r_{out} C_L} = \frac{g_{ds6} + g_{ds5}}{2\pi C_L}$$

$$A_R BW = \frac{B_2}{2\pi C_L}$$

$$SR = \frac{I_{D5} - I_{D6}}{C_L} = \frac{B_2 i_{in}}{C_L}$$

## Свързване на ОСА с ООВ

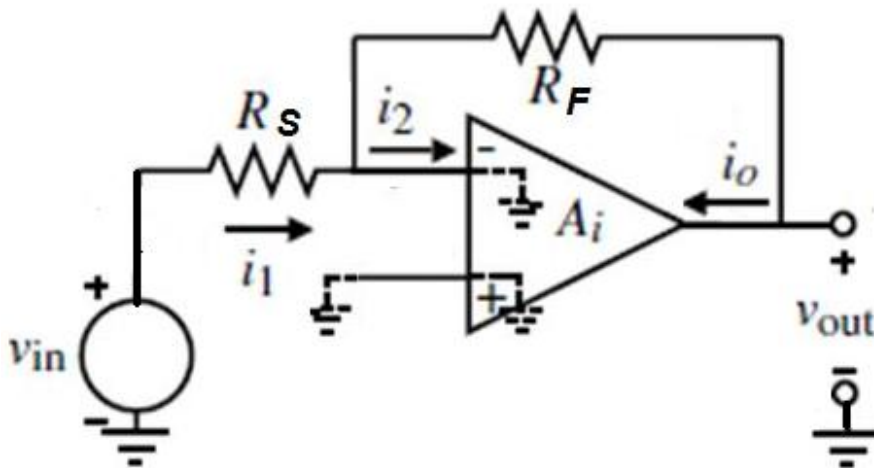


$$i_o = A_i(i_1 - i_2) = A_i \left( \frac{u_{in}}{R_S} - i_o \right)$$

$$i_o = \left( \frac{A_i}{1 + A_i} \right) \frac{u_{in}}{R_S}$$

$$u_{out} = R_F i_o = \frac{R_F}{R_S} \left( \frac{A_i}{1 + A_i} \right) u_{in}$$

$$A_u = \frac{R_F}{R_S} \left( \frac{A_i}{1 + A_i} \right) \approx \frac{R_F}{R_S}$$



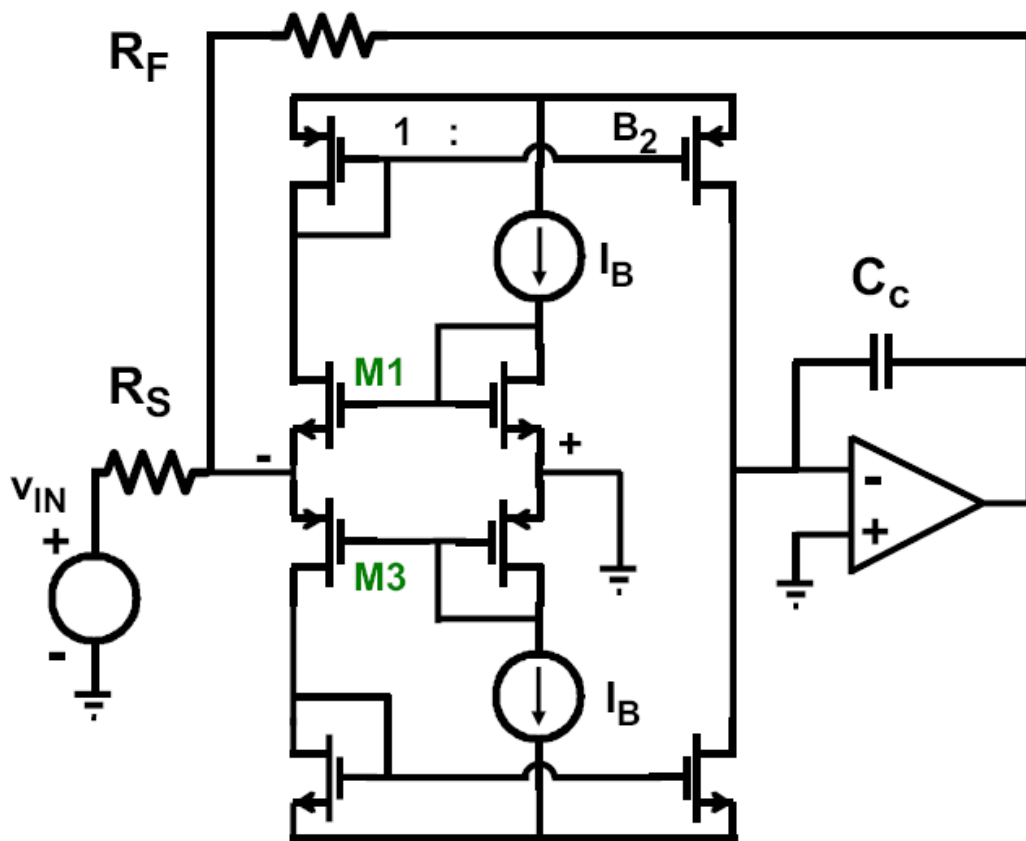
$$i_o = A_i i_2 \quad i_2 = i_1 - i_o = \frac{i_o}{A_i}$$

$$i_o \frac{A_i + 1}{A_i} = i_1 = \frac{u_{in}}{R_S}$$

$$u_{out} = -R_F i_o = -\frac{R_F}{R_S} \left( \frac{A_i}{A_i + 1} \right) u_{in}$$

$$A_u = -\frac{R_F}{R_S} \left( \frac{A_i}{1 + A_i} \right) \approx -\frac{R_F}{R_S}$$

# Операционен усилвател в токов режим (Current-mode operational amplifier - CMOA)



$$A_{u0} = -\frac{R_F}{R_S}$$

$$A_u = \frac{A_{u0}}{1 + j\frac{f}{f_{-3dB}}} = \frac{A_{u0}}{1 + j\frac{f}{BW}}$$

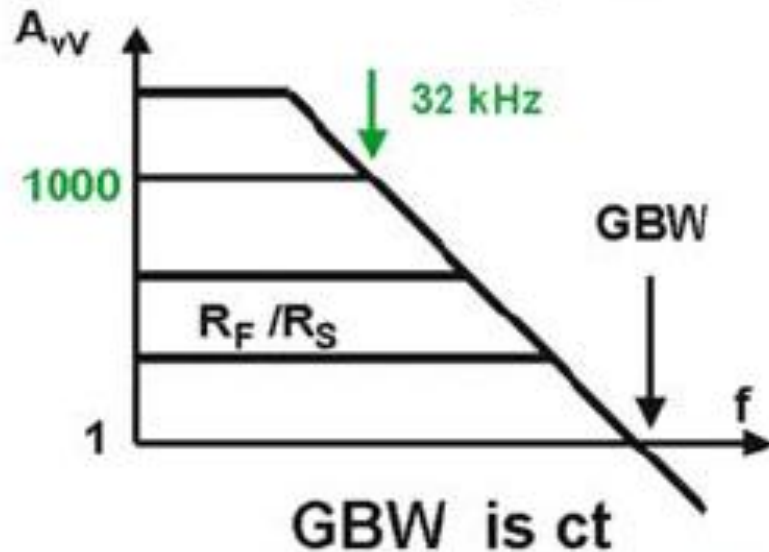
$$BW = \frac{1}{2\pi R_F C_C}$$

$$A_u = -\frac{R_F}{R_S} \frac{1}{1 + j2\pi f R_F C_C}$$

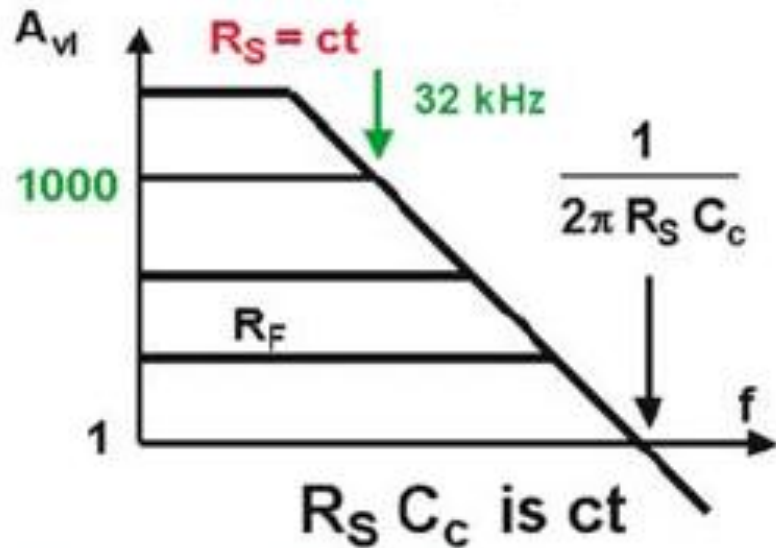
$$GBW = |A_{u0}| \cdot BW = \frac{1}{2\pi R_S C_C}$$

# Сравнение между VMOA и CMOA

$$A_{VV} = -\frac{R_F}{R_S} \frac{1}{1 + \frac{R_F}{R_S} \frac{j\omega C_c}{g_{m1}}}$$



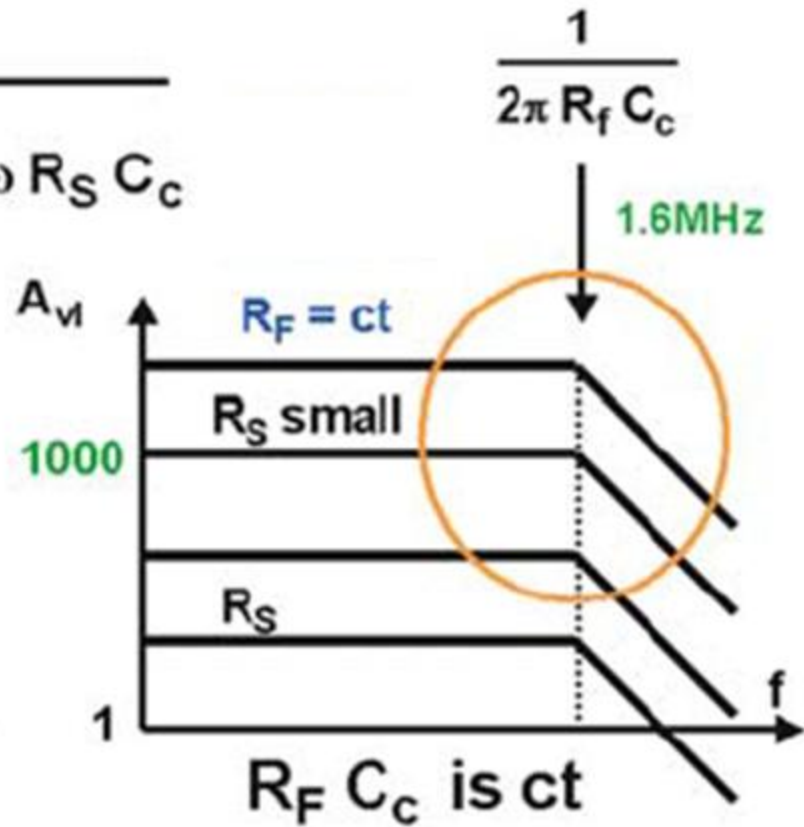
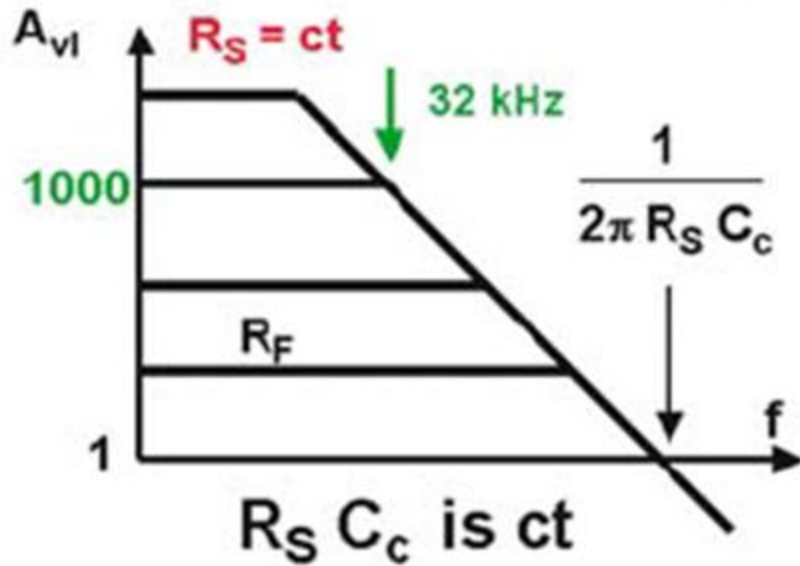
$$A_{VI} = -\frac{R_F}{R_S} \frac{1}{1 + \frac{R_F}{R_S} j\omega R_S C_c}$$



$g_{m1} = 0.2 \text{ mS}$ ;  $C_c = 1 \text{ pF}$ ;  $GBW = 32 \text{ MHz}$ ;  $A_{VV} = 1000$ ;  $BW = 32 \text{ kHz}$

# Предимства на СМОА

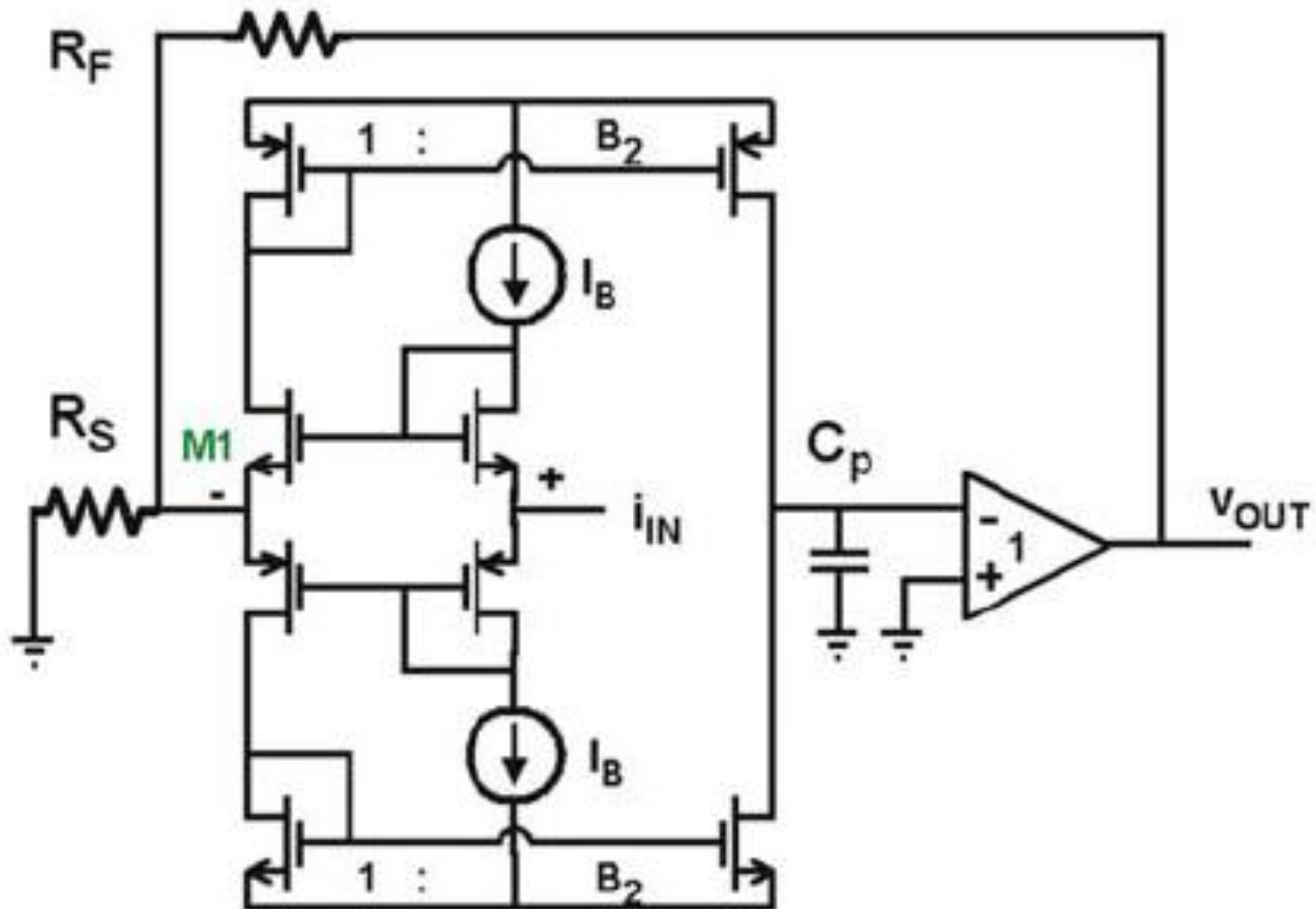
$$A_{v1} = -\frac{R_F}{R_S} \frac{1}{1 + \frac{R_F}{R_S} j\omega R_S C_C}$$



$C_C = 1 \text{ pF}; R_S = 100 \text{ } \Omega; R_F = 100 \text{ k } \Omega; BW = 1.6\text{MHz} \square$



# Неинвертирац СМОА



# Микромощни ОТА

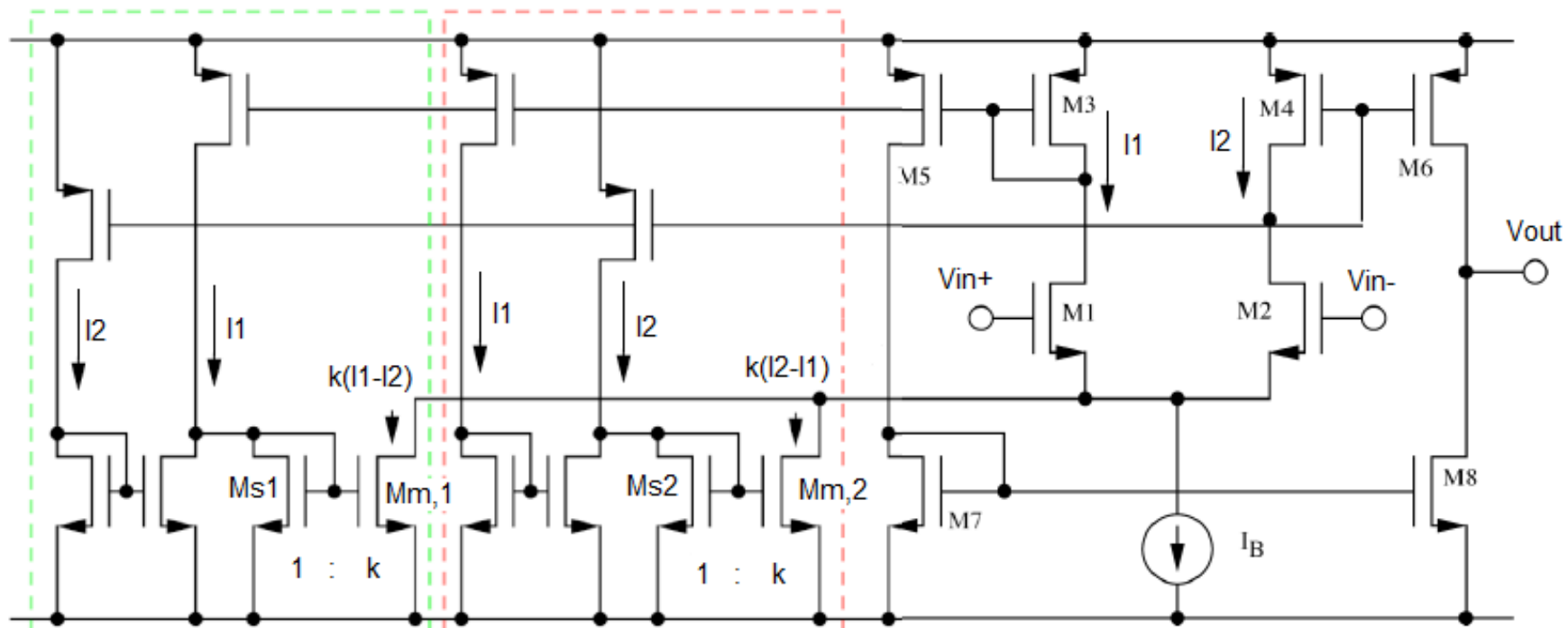
Характерна особеност – работа при ниски захранващи напрежения и малки токове (режим на слаба инверсия).

$$g_m = \frac{I_d}{n\phi_T} \quad A_u = \frac{-1}{n\phi_T(\lambda_n + \lambda_p)}$$

Основни проблеми:

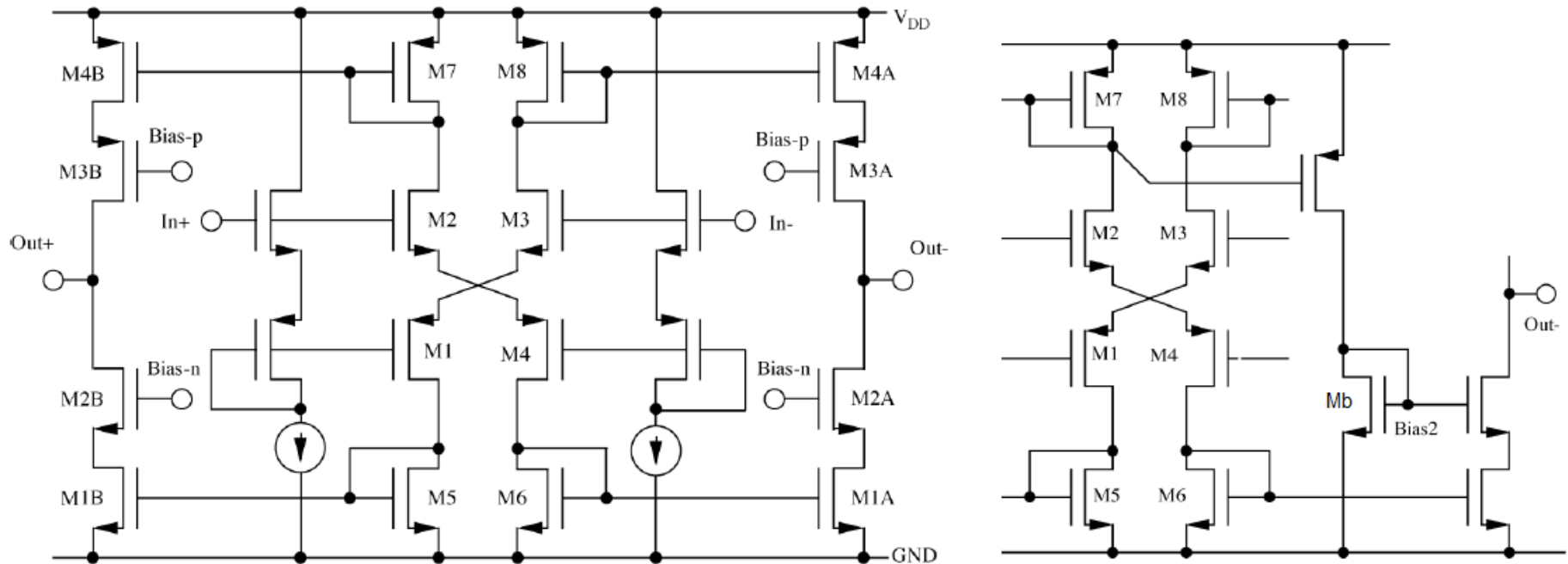
- ограничена честотна лента;
- минимална стойност на скоростта на нарастване на сигнала, което налага използване на специфични техники за подобряването ѝ.

# Динамично управление на задаващия ток



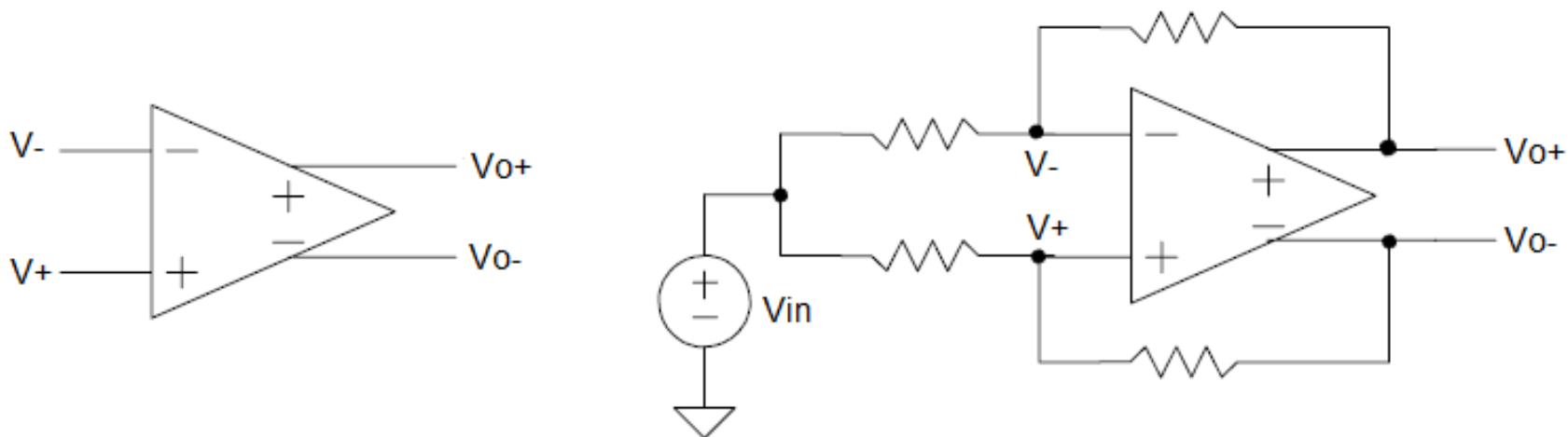
Динамично управление на задаващия ток, чрез контролиране на разбалансирането на входния диференциален усилвател. В резултат задаващият ток на диференциалния усилвател нараства пропорционално на разликата между токовете в двете рамена -  $k(I_1 - I_2)$  или  $k(I_2 - I_1)$ . **Това осигурява максимална скорост на нарастване на сигнала.**

# Динамично постоянно-токово осигуряване на режима на противотактното изходно стъпало



Увеличение на напрежението гейт-сорс на транзисторите от изходните каскоди при необходимост от по-големи изходни токове.

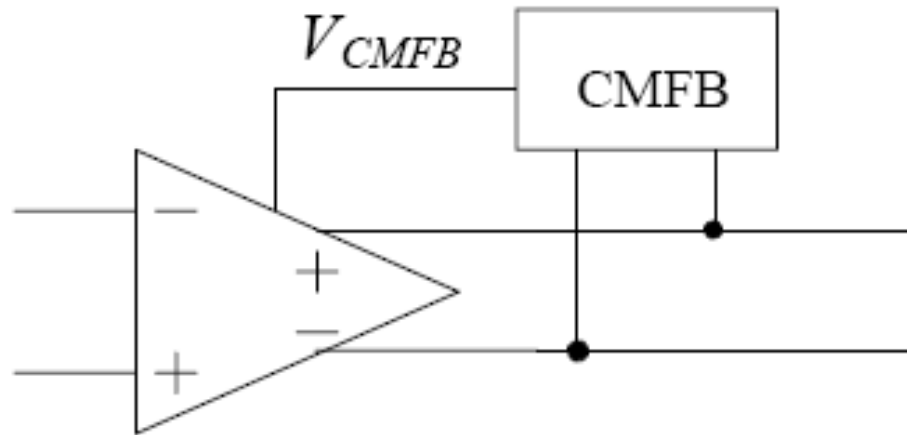
# Диференциални усилватели със симетрични ВХОД И ИЗХОД.



## Предимства:

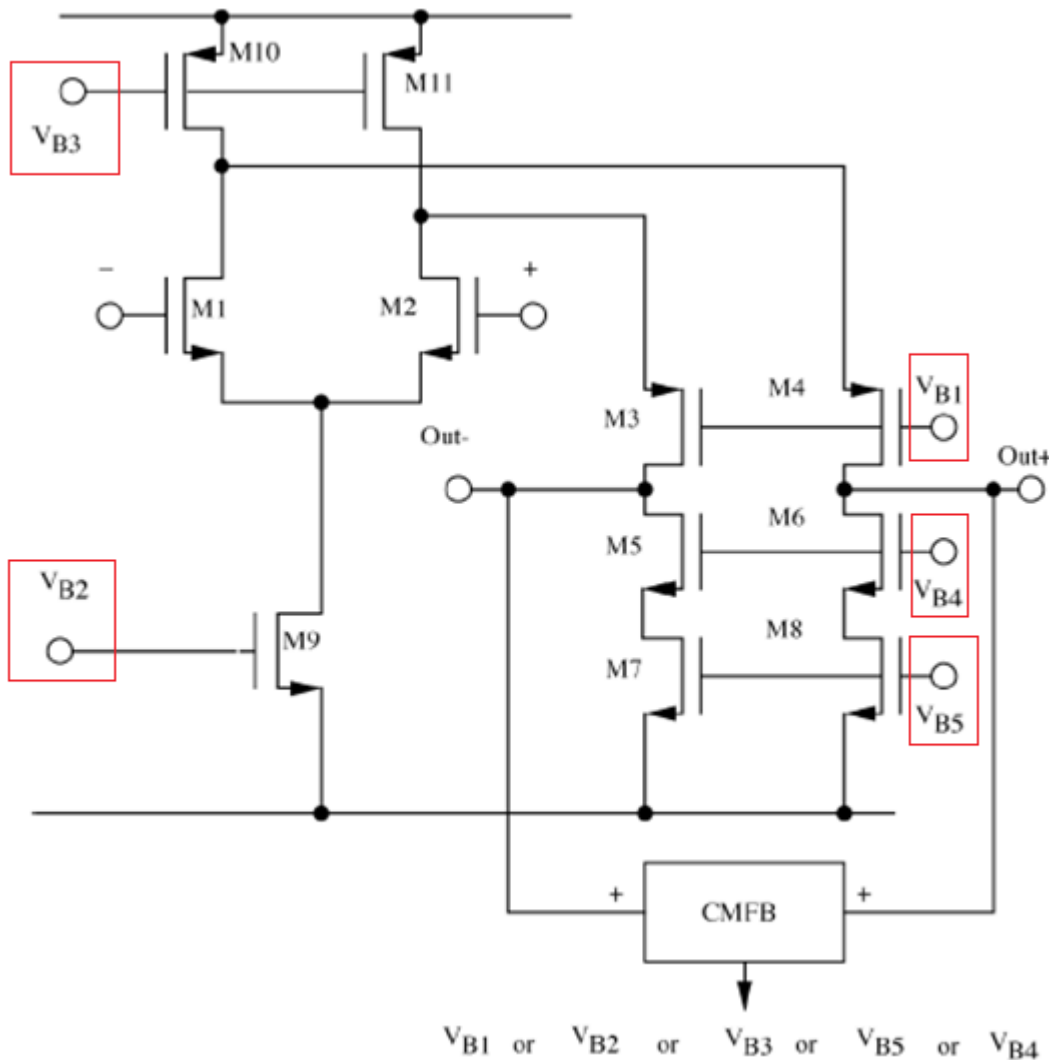
- осигуряват повишен размах на изходния сигнал;
- слабо чувствителни към синфазните сигнали – постояннотокови отмествания и шумове;
- добре балансираните схеми потискат четните хармоници.

# Диференциални усилватели със симетрични вход и изход.



Съществен недостатък – изходно синфазно напрежение е плаващо, което налага използване на синфазна обратна връзка (common-mode feedback circuit) CMFB. С нейна помощ изходното синфазно напрежение обикновено се установява равно на  $(V_{DD}+V_{SS})/2$ .

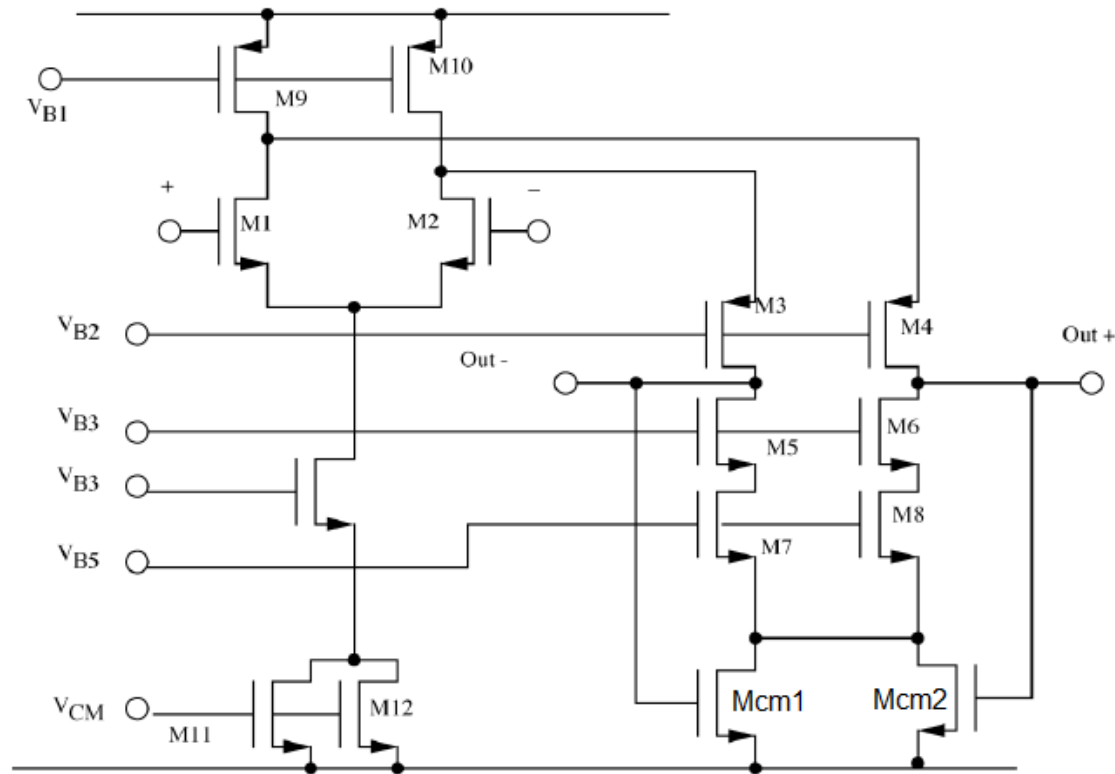
# Симетрични ОТА с прегънат каскод и CMFB



Управление на изходното ниво чрез регулиране на режима на транзисторите:

- M3 и M4 (чрез  $V_{B1}$ );
- M9 (чрез  $V_{B2}$ );
- M10 и M11 (чрез  $V_{B3}$ );
- M3 и M4 (чрез  $V_{B4}$ );
- M7 и M8 (чрез  $V_{B5}$ ).

# Симетричен прегънат каскод с CMFB -1

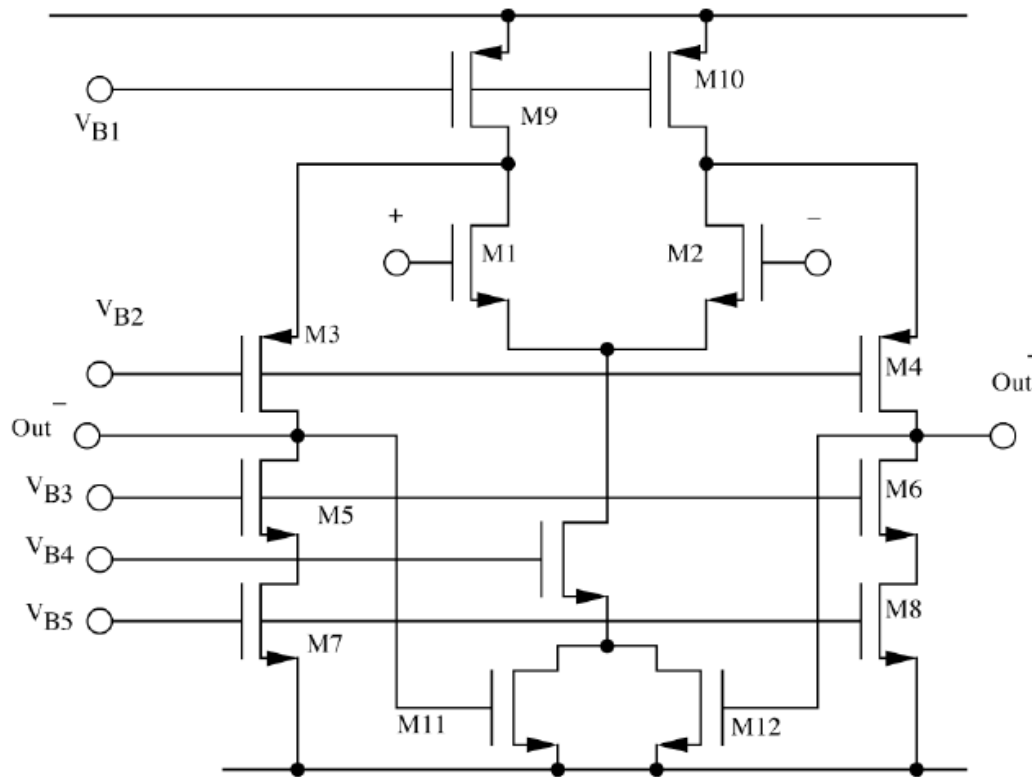


Mcm1 и Mcm2 реализират CMFB. Работят в линейната област като резистори.

Например, ако  $V_{out}$  е по-голямо от избраното  $V_{cm}$ , съпротивленията на Mcm1 and Mcm2 намаляват и изходното напрежение също намалява.



## Симетричен прегънат каскод с CMFB -2



Втори вариант на CMFB. M11 и M12 управляват тока на входната диференциална двойка. Ако  $V_{out}$  нараства, токът на задаващия източник също расте, напрежението в изхода на M1 и M2 намалява и компенсира нарастването на изходното напрежение.

---

БЛАГОДАРЯ!