

Операционни усилватели

Операционни усилватели

Под *операционен усилвател* (ОУ) се разбира постояннотоков усилвател с диференциален вход, много голям коефициент на усилване по напрежение, много голямо входно съпротивление, много малко изходно съпротивление и неограничена честотна лента.

Винаги се използват с някакъв вид обратна връзка, която определя параметрите и характеристиките на реализираната с тях схема.

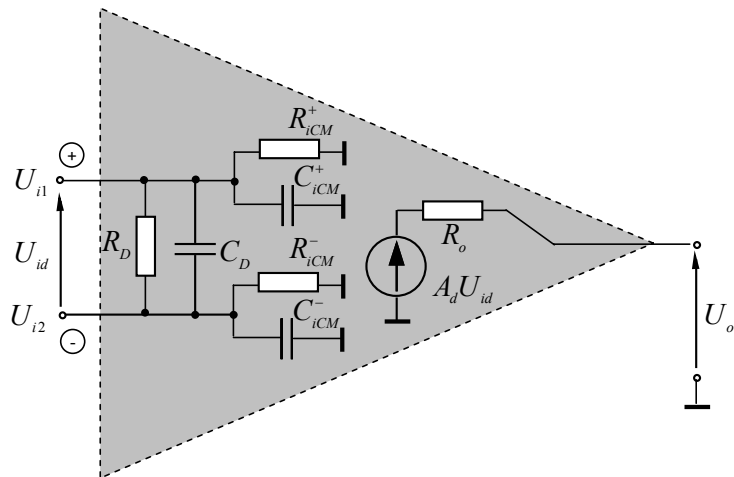
Наричат се *операционни*, защото чрез тях се реализират аналогови схеми, извършващи математически операции – сумиране, изваждане и т.н.

Съвременните интегрални операционни усилватели, изработени чрез най-новите микроелектронни технологии (*Bipolar, JFET, BiCMOS* и *CMOS*).

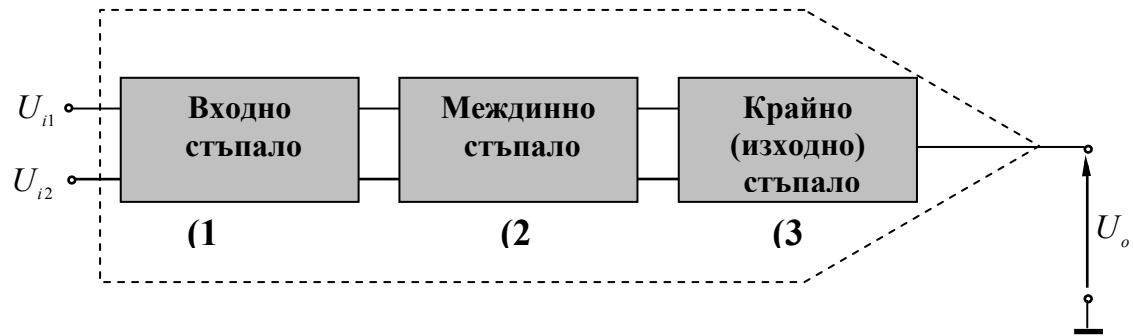
Имат:

- коефициент на усилване от 10^4 до 10^6 и по-голям,
- входно съпротивление от $1M\Omega$ до $10T\Omega$ и
- изходно съпротивление от 25Ω до 100Ω . Освен това ОУ имат
- размери и цена, близки до тези на един транзистор, поради което изместват многотранзисторните устройства

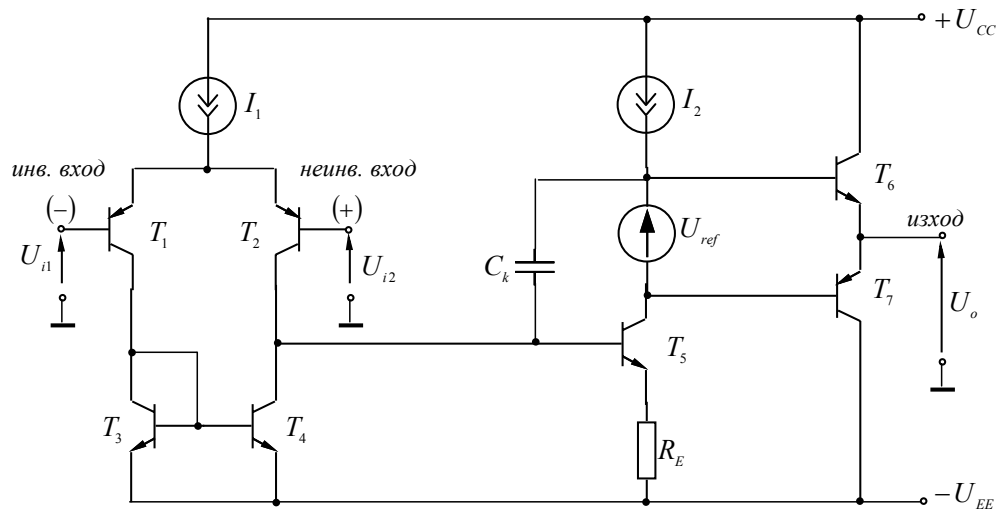
Схемното означение



Фиг. 2.50.



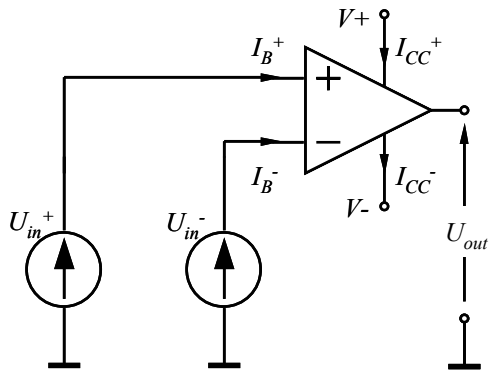
Фиг. 2.51.



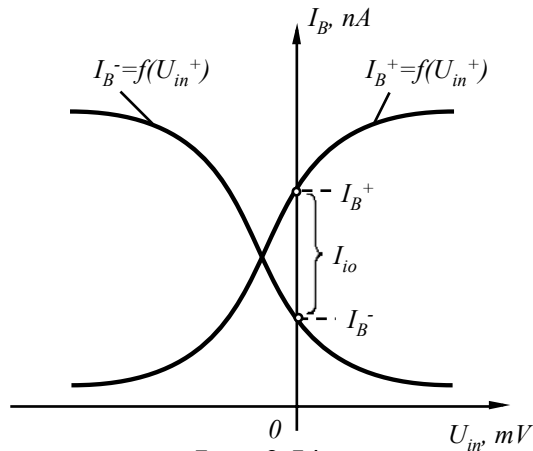
Фиг. 2.52.

Характеристики и параметри на ОУ

Входни характеристики



Фиг. 2.53.



Фиг. 2.54.

– Входен поляризиращ ток I_{iB} : Това е средната стойност на токовете при $U_{IN} = 0V$:

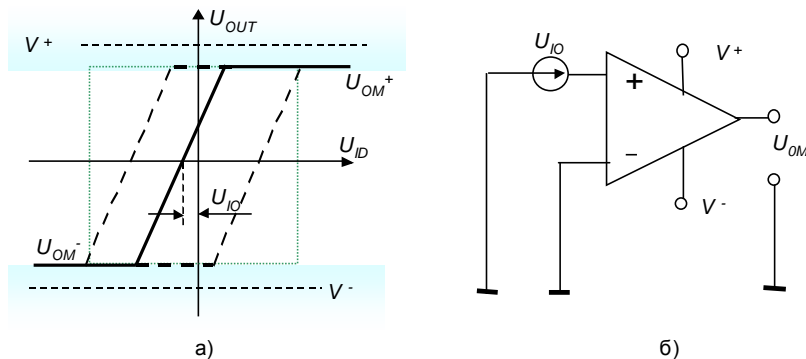
$$(2.146) \quad I_{iB} = (I_B^+ + I_B^-) / 2 .$$

– Входен ток на несиметрия I_{io} : Разликата между токовете при $U_{IN} = 0V$: (2.147)

$$I_{io} = I_B^+ - I_B^- .$$

– Входното диференциално съпротивление R_{iD} :

Статична предавателна характеристика за диференциалните сигнали



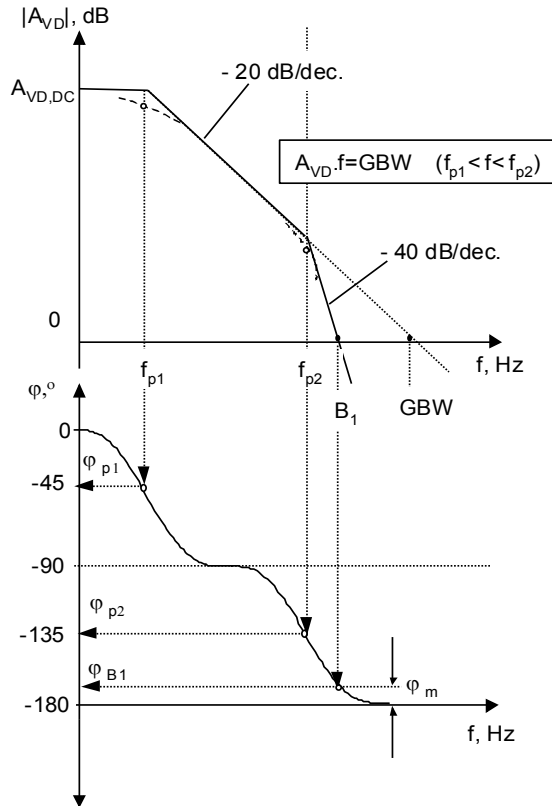
Фиг. 2.55.

– Коефициент на усилване по напрежение A_U :

$$(2.148) \quad A_U = \frac{U_{out}}{U_{id}}.$$

– Входно напрежение на несиметрия U_{io} :

Честотни характеристики и параметри на ОУ



Фиг. 2.56.

– Амплитудно-честотна характеристика АЧХ

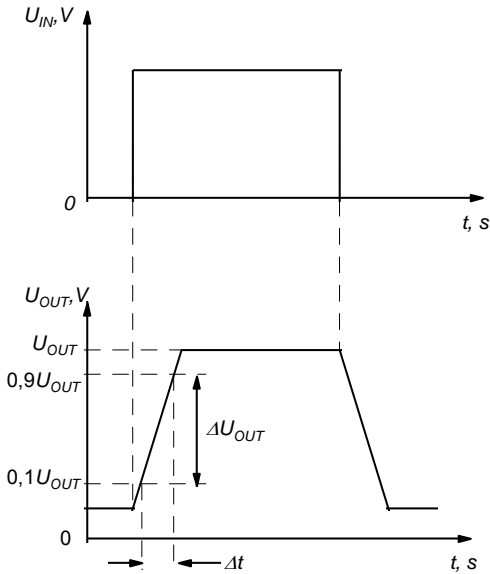
– Гранична честота на ОУ на ниво -3dB f_{p1} :

– Честота на единично усилване B_1 :

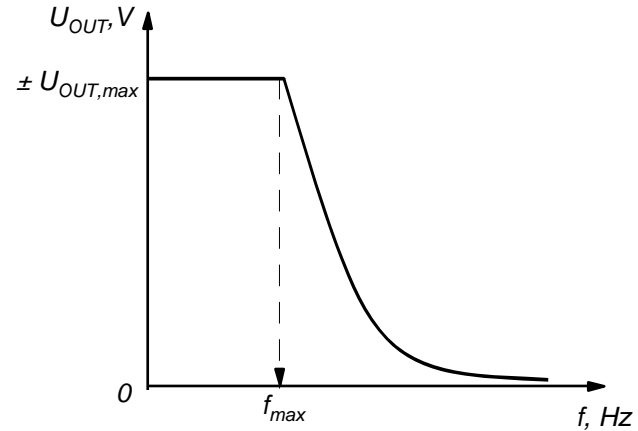
$$B_1 = f_{A_{VD}=1}$$

– Фазово-честотна характеристика ФЧХ

Преходна характеристика при голям сигнал



Фиг. 2.57.



Фиг. 2.58.

Преходната характеристика при голям сигнал (фиг. 2.57) представлява реакцията на електронна схема при скокообразна промяна на входния сигнал.

– Скорост на нарастване на изходното напрежение (Slew Rate) SR :

Определя се като промяната на изходното напрежение на ОУ за единица времеви интервал:

$$(2.149) \quad SR = \frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta t}, \text{ V}/\mu\text{s}.$$

При синусоидален входен сигнал

$$u_{OUT} = U_{OUT,max} \sin \omega t$$

изходното напрежение има

$$(2.150a) \quad \frac{du_{OUT}}{dt} = 2\pi f U_{OUT,max} \cos \omega t$$

Тя е максимална при $\omega t = 0$:

$$(2.150б) \quad \left. \frac{du_{OUT}}{dt} \right|_{(max)} = 2\pi f U_{OUT,max}.$$

$$(2.151) \quad U_{OUT,max} = \frac{SR}{2\pi f}.$$

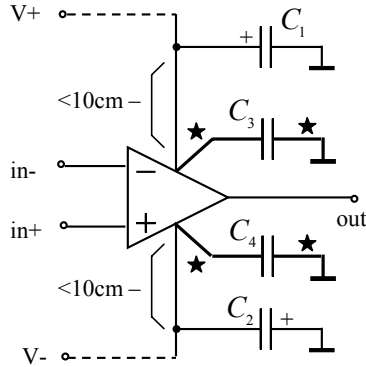
Когато скоростта на нарастване на изходното напрежение превиши параметъра SR на ОУ, изходният сигнал се деформира.

Зависимостта на максималната изходна амплитуда от честотата е показана на фиг. 2.58.

Честотна лента при максимално изходно напрежение f_{\max}

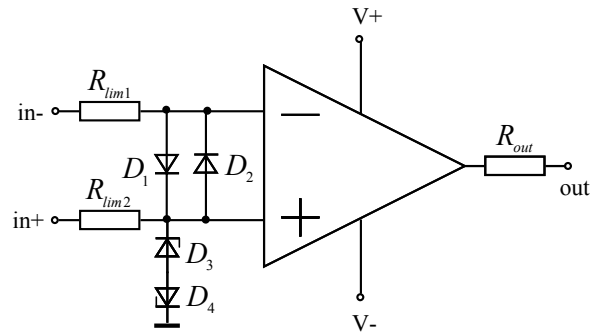
Максималната амплитуда е неизкривена при сигнал с честота $f < f_{\max}$.

Захранване и защита на операционните усилватели



★ -Монтаж на минимално разстояние

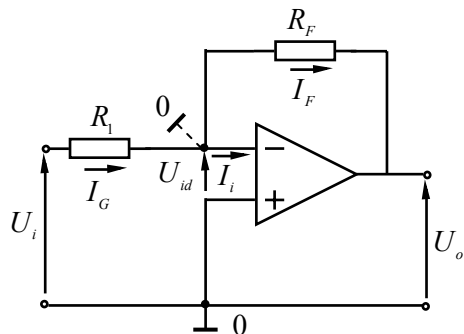
Фиг. 2.59.



Фиг. 2.60.

коэффициент на потискане на пулсациите на захранващото напрежение (*Power Supply Rejection Ratio*) $PSRR+$ и $PSRR-$.

Инвертиращ усилвател с операционен усилвател



Фиг. 2.61.

При $A_d = U_o / U_{id} \rightarrow \infty$ $U_{id} \approx 0$.

виртуална (привидна) нула.

$$(2.152) \quad I_G = U_i / R_1,$$

$$(2.153) \quad I_F = -(U_o / R_F).$$

За идеален ОУ $I_i \approx 0$ и за общата точка между R_1 и R_F съгласно първи закон на Кирхоф може да се запише, че $I_G \approx I_F$.

Тогави $U_i / R_1 = -U_o / R_F$.

Следва

$$(2.154) \quad A_F = U_o / U_i = -R_F / R_1.$$

Входното и изходното съпротивление на схемата са

$$(2.155a) \quad R_{iA} = R_i + U_{id} / (I_i + I_F) \approx R_1$$

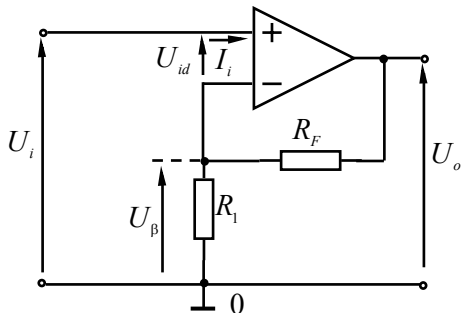
и

$$(2.1556) \quad R_{oA} = R_o / (1 + \beta * A_d).$$

Изводи:

- входното съпротивление R_{iA} зависи главно от стойността на резистора R_1 ,
- изходното съпротивление R_{oA} зависи от дълбочината на ООВ $\beta * A_d$. При $\beta * A_d \gg 1$ и изходно съпротивление на ОУ R_o няколко десетки ома, изходното съпротивление на схемата ще бъде по-малко от един Ом.
- по отношение на изхода инвертиращият усилвател може да се разглежда като идеален източник на напрежение.

Неинвертиращ усилвател с операционен усилвател



$$(2.156a)$$

$$U_{\beta} = \frac{R_1}{R_1 + R_F} * U_o \text{ и}$$

$$(2.156б)$$

$$U_i = U_{id} + U_{\beta} \approx U_{\beta}, \text{ тогава}$$

$$(2.156в)$$

$$A_F = \frac{U_o}{U_i} = \frac{R_1 + R_F}{R_1} = 1 + \frac{R_F}{R_1}.$$

Фиг. 2.62.

Входното съпротивление

$$(2.156г) \quad R_{iA} = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_{id} + U_{\beta}}{I_i} = \frac{U_{id} + U_{id} * \beta * A_d}{I_i} = R_{id} * (1 + \beta * A_d) = F * R_{id} \text{ и}$$

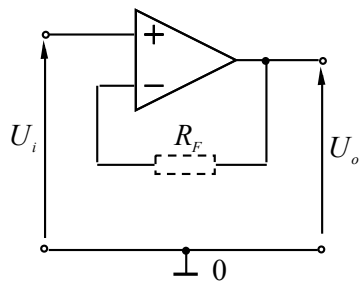
Изходно съпротивление

$$(2.156д) \quad R_{oA} = R_o / (1 + \beta * A_d) = R_o / F.$$

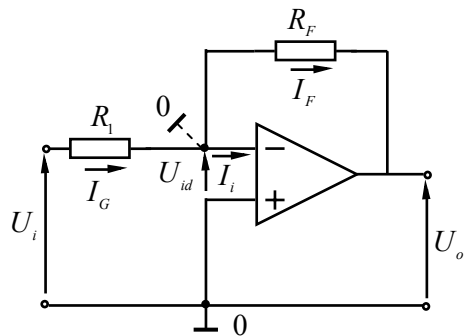
Изводи:

Неинвертиращият усилвател има високо входно и ниско изходно съпротивление.

Повторител с $A_F \approx 1$,

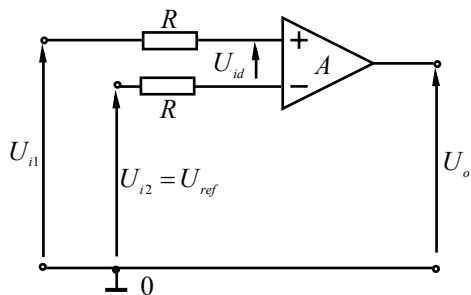


Фиг. 2.63.

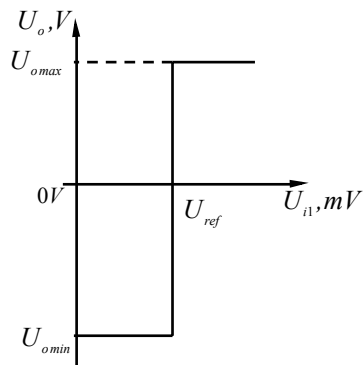


Фиг. 2.61.

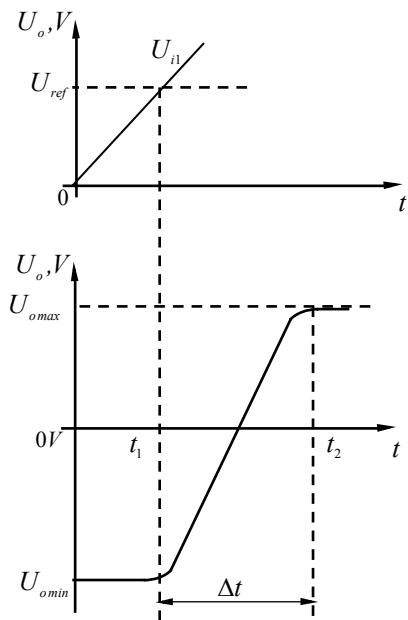
Компаратори на напрежение



Фиг. 2.64а.



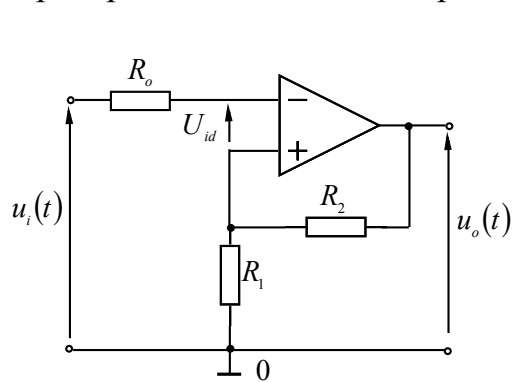
Фиг. 2.64б.



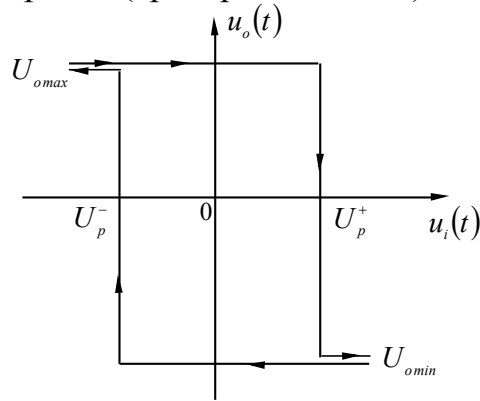
Фиг. 2.64в.

аналогови компаратори.

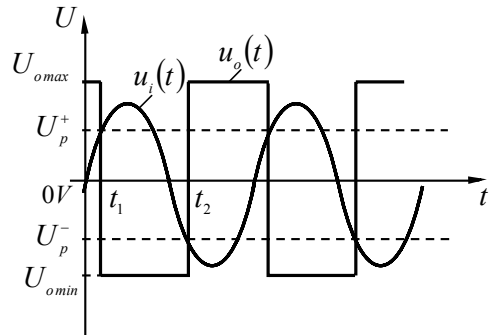
Компаратори с положителна обратна връзка (тригери на Шмит).



Фиг. 2.65а.



Фиг. 2.65б.



Фиг. 2.65в.

$$(2.157) \quad U_p^+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{omax}$$

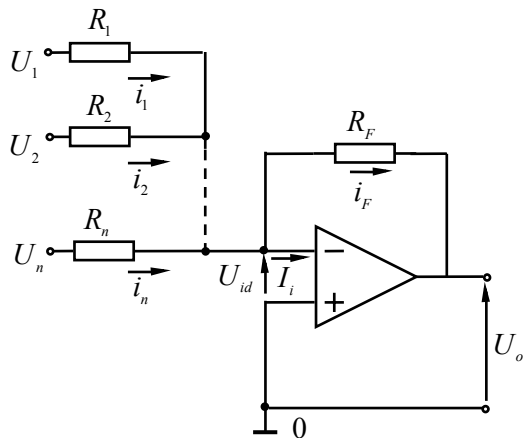
$$(2.158) \quad U_p^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{omin}$$

ширина на хистерезиса:

$$(2.159) \quad \Delta U_{iH} = U_p^+ - U_p^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (U_{omax} - U_{omin})$$

Линейни и нелинейни операционни схеми

Суматори



Фиг. 2.66.

$$(2.160) \quad U_o = -i_F * R_F,$$

където $i_F = \sum_{i=1}^n i_i$ ($I_{in} \approx 0$).

$$i_1 = U_1 / R_1, \quad i_2 = U_2 / R_2, \quad \dots \quad i_n = U_n / R_n,$$

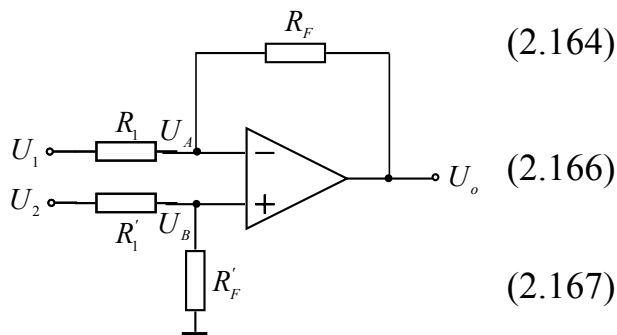
$$(2.161) \quad i_F = \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{R_i}.$$

$$U_o = -R_F * \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{R_i} = - \left(\frac{R_F}{R_1} * U_1 + \frac{R_F}{R_2} * U_2 + \dots + \frac{R_F}{R_n} * U_n \right).$$

АКО $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R_F$,

$$(2.163) \quad U_o = -(U_1 + U_2 + \dots + U_n).$$

Диференциален усилвател с ОУ



$$U_B = U_2 * \frac{R'_F}{R'_F + R'_1} = U_2 * \frac{1}{1 + R'_1 / R'_F},$$

$$(U_1 - U_A) / R_1 + (U_o - U_A) / R_F = 0,$$

$$U_A = \frac{U_1 + U_o * (R_1 / R_F)}{1 + R_1 / R_F}.$$

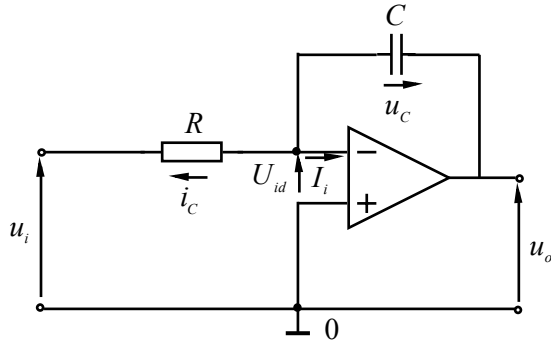
Фиг. 2.67.

$$(2.168a) \quad U_o = \frac{R_F}{R_1} * \left(\frac{1 + R_1 / R_F}{1 + R'_1 / R'_F} * U_2 - U_1 \right).$$

При условие, че $R_1 = R'_1$ и $R_F = R'_F$, напрежението U_o се получава

$$(2.168б) \quad U_o = \frac{R_F}{R_1} * (U_2 - U_1).$$

Интегратор

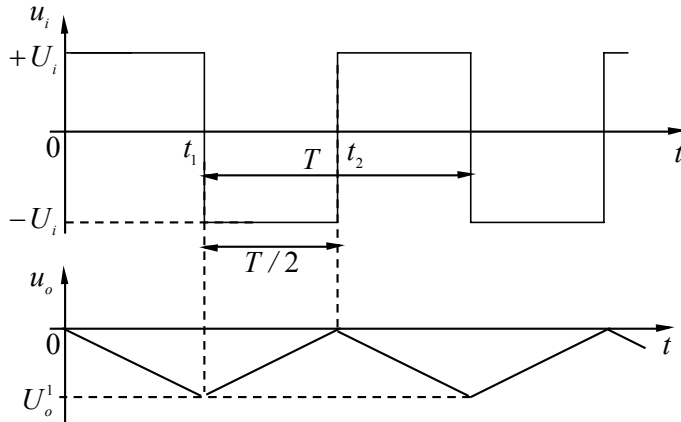


Фиг. 2.68.

$$(2.169a) \quad i_c = C * \frac{du_c}{dt},$$

$$(2.169б) \quad u_i = i_c * R = -RC * \frac{du_o}{dt} \text{ и}$$

$$(2.169в) \quad u_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_i dt + U_{o(t=0)},$$



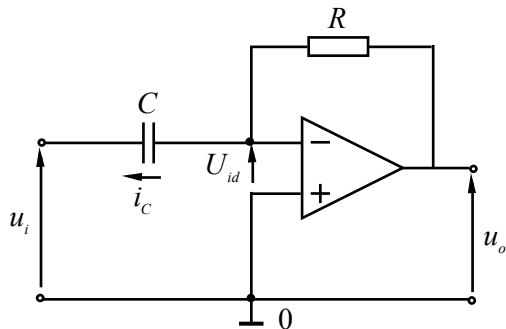
Фиг. 2.69.

$$(2.170)$$

$$u_o = -\frac{U_i}{RC} * t + u_{o(t=0)} = -\frac{U_i}{RC} * t,$$

където $u_{o(t=0)} = 0V$.

Дифференциатор

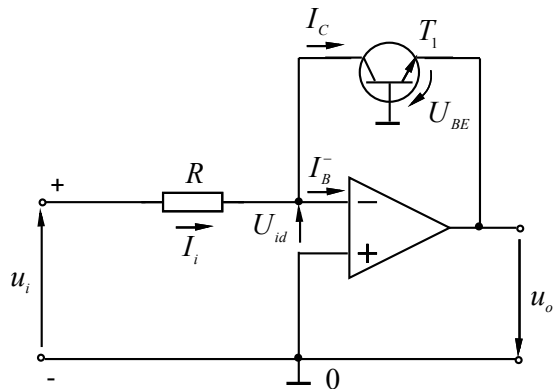


Фиг. 2.70.

$$(2.171a) \quad i_c = C * \frac{du_i}{dt} \text{ и}$$

$$(2.171б) \quad u_o = -i_c * R = -RC * \frac{du_i}{dt}.$$

Логаритмичен усилвател (логаритматор)



Фиг. 2.71.

дъка на $10^{-10} \div 10^{-9} A$), а $U_T = \frac{k * T}{q}$ е топлинният потенциал, при $T = 25^\circ C$ ($298^\circ K$)

$$U_T \approx 25,3 \text{ mV}; \quad I_C = I_i \approx \frac{U_i}{R}$$

$$(2.173) \quad u_o = -U_T * \ln \frac{u_i}{R I_{ES}} \approx -2,3 * U_T * \lg \frac{u_i}{R * I_{ES}}.$$

Логаритмичните усилватели са нелинейни електронни схеми, в които изходното напрежение е пропорционално на логаритъма на входното напрежение.

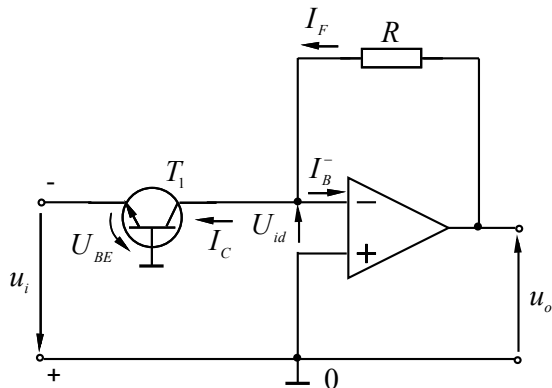
$$u_o = -U_{BE}.$$

$$(2.172a) \quad I_C = I_{ES} * e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \quad \text{или}$$

$$(2.172б) \quad U_{BE} = U_T * \ln \frac{I_C}{I_{ES}},$$

където I_{ES} е обратният емитерен ток (от поря-

Експоненциален усилвател (антилогаритматор)



Фиг. 2.72.

$$(2.174) \quad I_C \approx I_{ES} * e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} = I_{ES} * e^{-\frac{u_i}{U_T}},$$

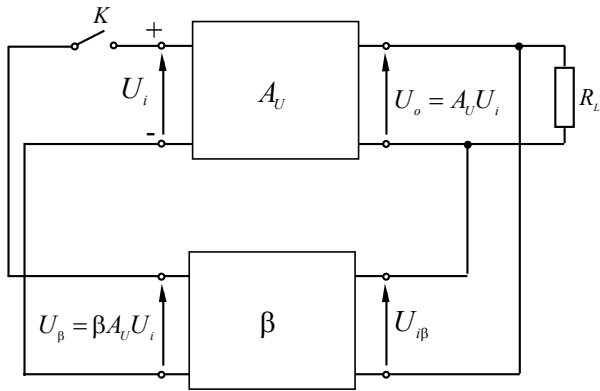
където $U_{BE} = -u_i$.

$$(2.175) \quad u_o \approx I_F * R.$$

$$(2.176) \quad u_o = R * I_{ES} * e^{-\frac{u_i}{U_T}}.$$

Генератори на синусоидално напрежение.

Блокова схема и условия за самовъзбуждане на генераторите



Фиг. 2.73.

$$U_o = A_U * U_i,$$

$$U_\beta = \beta * A_U * U_i,$$

$$\text{При } U_\beta \geq U_i,$$

Условие за самовъзбуждане

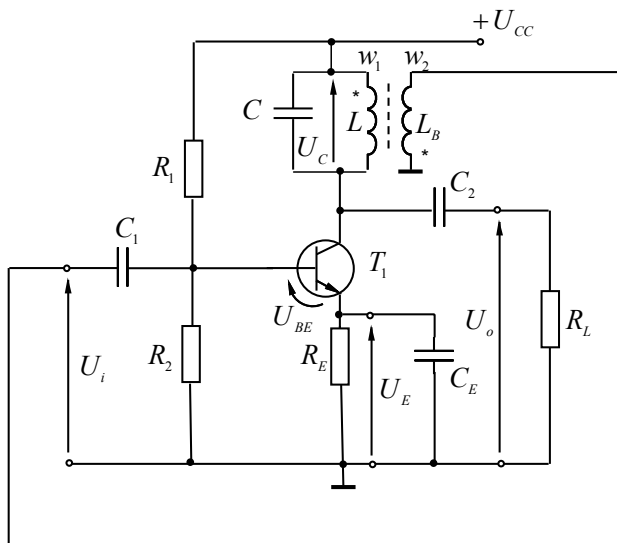
$$\beta * A_U = 1.$$

$$(2.177a) \quad \varphi_A + \varphi_\beta = 0, 360^\circ,$$

$$(2.177b) \quad |A_U * \beta| = 1.$$

LC-генератори и *RC*-генератори

LC- генератор с трансформаторна обратна връзка



Фиг. 2.74.

$$(2.178) \quad A_{F(+)} = \frac{A_U}{1 - \beta^+ * A_U} = \frac{U_o}{U_i},$$

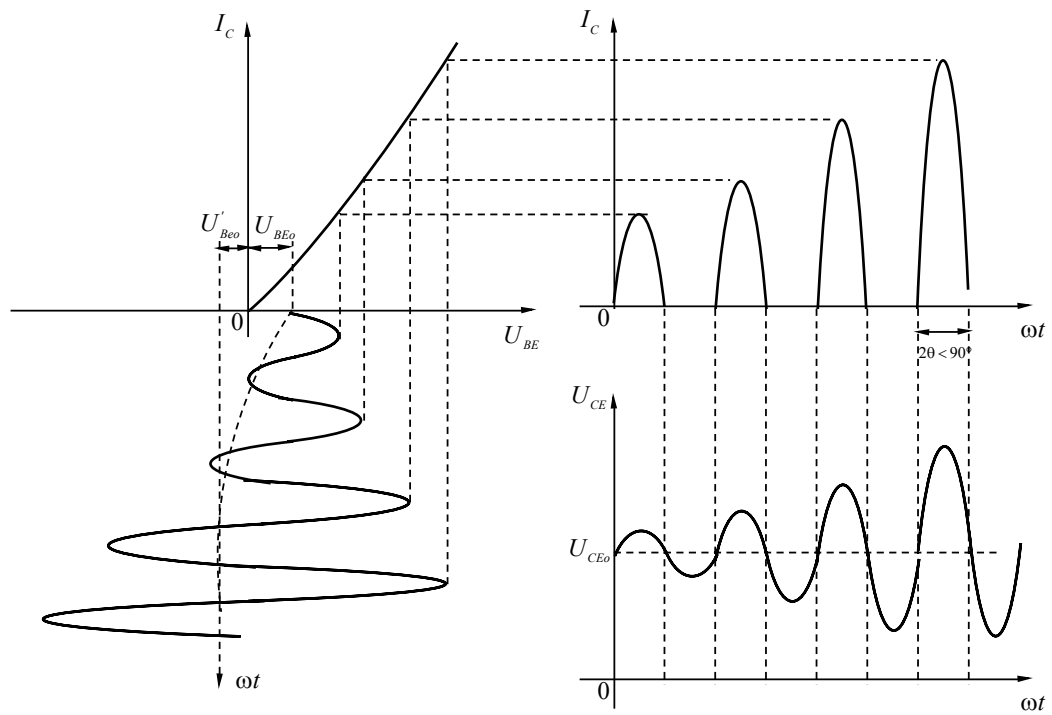
където $A_U = -S * Z_{oe}$, а

$$\beta^+ \approx w_2 / w_1$$

При резонансната честота

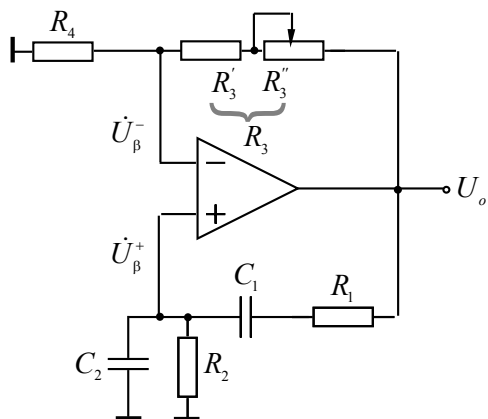
$$f_o = 1 / 2\pi \sqrt{LC}$$

коэффициентът на усилване е максимален.



Фиг. 2.75.

RC-генератори



Фиг. 2.76.

$$A_F^- = (R_3 + R_4) / R_4.$$

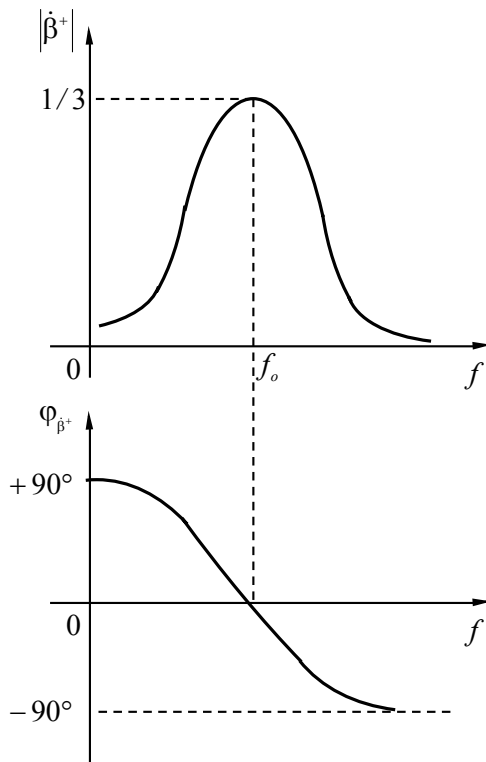
за самовъзбуждане:

$$(2.188a) \quad |\dot{\beta}^+| * |A_F^-| = 1,$$

$$(2.188б) \quad \varphi_{A_F^-} + \varphi_{\beta^+} = 0^\circ.$$

$$|\beta^+(f_o)| = \beta_o^+ = \frac{1}{3}.$$

$$|A_F^-| = \frac{R_3 + R_4}{R_3} = 3.$$



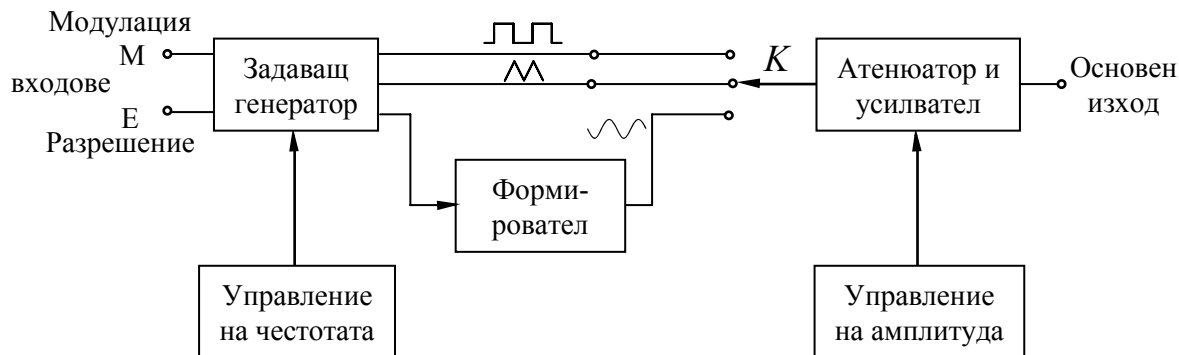
Фиг. 2.77

Функционални генератори

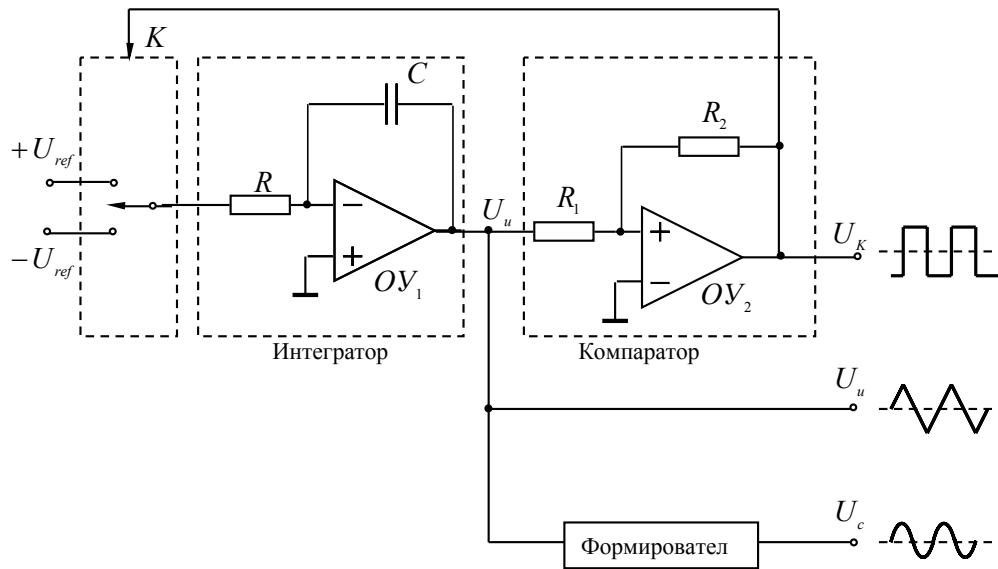
Функционалните генератори са електронни устройства, които произвеждат периодични сигнали с триъгълна, правоъгълна и синусоидална форма.

Амплитудата и/или честотата на генерираните трептения се управлява.

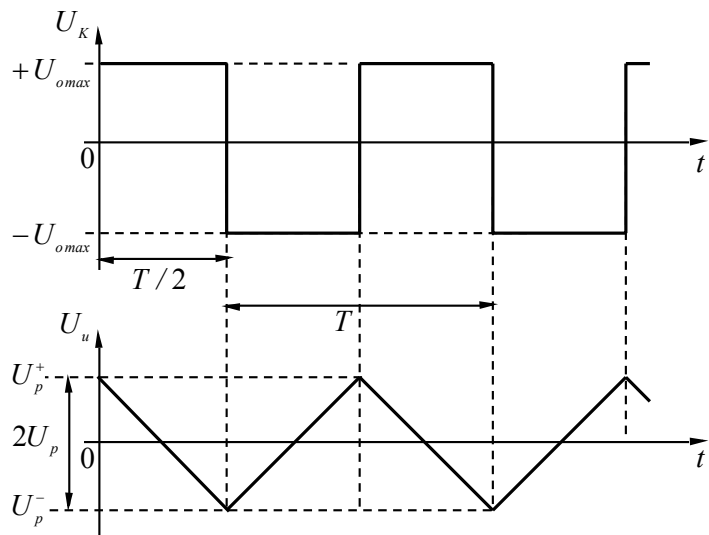
Изменението на изходните параметри може да се осъществи програмно



Фиг. 2.78.



Фиг. 2.79.



Фиг. 2.80.