

Лекция 17

Операционни усилватели

Съдържание на Лекция 17

17. Операционни усилватели.

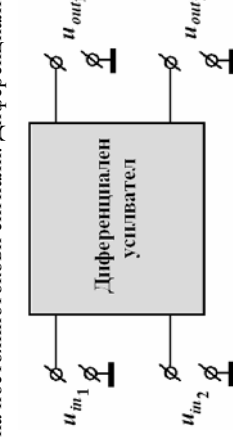
- 17.1 Диференциален усилвател – предназначение, схема и принцип на работа. Коефициент на усилване при противофазни и синфазни сигнали.
- 17.2 Операционен усилвател – предназначение, принципна схема. Коефициент на усилване при инвертиращ и неинвертиращ операционен усилвател. Общи правила.
- 17.3 Основни приложения на операционни усилватели (I част): компаратор, преобразувател “ток-напрежение” и “напрежение-ток”, повторител на напрежение; диференциален усилвател.
- 17.4 Основни приложения на операционни усилватели (II част): сумиращ усилвател; Функционални усилватели: логаритмичен и антилогаритмичен усилвател; Интегриращ и диференциращ усилвател. Активни филтри.

Лекция 17

17.1 Диференциален усилвател – предназначение, схема и принципи на работа. Коефициенти на усилване при противофазни и синфазни сигнали.

Диференциален усилвател

Диференциалният усилвател е уникално електронно устройство с голямо приложение в електрониката. На първо място той се използва като първо стъпало в операционните усилватели (вж. §17.2). Второ, той е усилвател на диференциални (противофазни сигнали) с подтискане на синфазните, т.е. на шума и следователно е усилвател с нисък шум. Трето, той е един от малкото усилватели със симетричен вход и изход. Накрая, това е усилвател на постояннотокови сигнали. Диференциалният усилвател може да се представи като осем-



полносник. Понеже усилва разлики в напрежение, неговият коефициент на усилване се дава със следния общ израз:

$$k_D = \frac{u_{out}}{u_{in}} = \frac{u_{out,2} - u_{out,1}}{u_{in,2} - u_{in,1}}$$

Така при усилване на противофазни сигнали $u_{in,1} = -u_{in,2}$ се получава коефициент на усилване с относително голяма стойност k_d

$$k_d = \frac{u_{out,2} - (-u_{out,2})}{u_{in,2} - (-u_{in,2})} = \frac{2u_{out,2}}{2u_{in,2}} = \frac{u_{out,2}}{u_{in,2}} \uparrow \uparrow$$

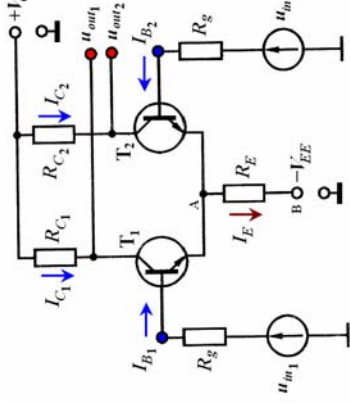
Обратно, когато на входовете му се подават синфазни сигнали с близки амплитуди $u_{in,1} \sim u_{in,2}$ (т.е. шум), коефициентът на усилване k_s е значително по малък:

$$k_s = \frac{u_{out,2} - u_{out,1}}{u_{in,2} - u_{in,1}} \downarrow \downarrow \approx 0$$

Схема на диференциален усилвател

Долу е показана една най-простата схема на диференциален усилвател с два транзистора при свързване общ емитер в пълна симетрия. Колекторите им напрежения се задават с две еднакви съпротивления $R_{C1} = R_{C2}$ от един източник V_{CC} , а емитерите им са общи и се захранват от един източник на отрицателно напрежение $-V_{EE}$. Необходимостта от последния ще стане ясна по-нататък.

Действие на схемата: При *отсъствие на входен сигнал* $u_{in,1} = u_{in,2} = 0$, на изхода се появяват сигнали, чиято разлика е нула идеалния случай на пълна симетрия, т.е. $u_{out,1} = u_{out,2} \sim 0$. При наличие на *противофазни сигнали* $u_{in,1} = -u_{in,2}$ се получава следното действие от всеки транзистор. Появата на $+u_{in,1}$ на базата на T_1 води до протичане на колекторен ток $+I_{C1}$ и поради инвертирането – до поява на изход 1 на напрежение $-u_{out,1}$. При напрежение $-u_{in,2}$ на ба-



$$k_d = \frac{u_{out1,2}}{u_{in1,2}} \cong \frac{R_{C1,2}}{r_E}$$

където r_E е ниското диференциално съпротивление на емитера. Важно е, че поради симетрията ток през съпротивлението R_E не тече ($I_E = I_{E1} = I_{E2} \sim 0$) и в схемата отсъства отрицателна обратна връзка по ток. Така k_d остава относително голям.

Подтискане на синфазни сигнали в диференциалния усилвател

Ще продължим разглеждането на схемата под действие на синфазни сигнали с относително близки амплитуди $u_{in,1} \sim u_{in,2}$. Такова поведение имат шумовите сигнали, поради което ще считаме, че синфазните сигнали са шум. Сега за всеки от двата транзистора от наличното на близки сигнали на базите протичат практически еднакви колекторни токове $I_{C1,2}$ и неза-висимо от инвертирането на напрежението, на всеки от изходите се появяват две близки по стойност синфазни напрежения $u_{out1,2}$. В този случай през съпротивлението R_E вече протича относително силен ток I_E , който води до поява на дълбока ООВ по ток

$$I_E \cong \frac{V_{EE}}{R_E} \cong I_{C1} + I_{C2} = 2I_{C1,2} \uparrow \uparrow$$

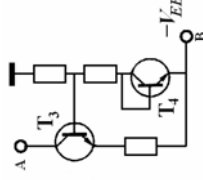
Поради силната ООВ, коефициентът на усилване k_s за синфазни сигнали рязко намалява:

$$k_s \cong \frac{R_{C1,2}}{R_g + r_E + 2(1 + \beta)R_E} \uparrow \uparrow \cong 0 \downarrow \downarrow$$

а коефициентът на подтискане на синфазни сигнали CMRR (Common-Mode Rejection Ratio) (мярка за качеството на диференциалния усилвател) се оказва висок.

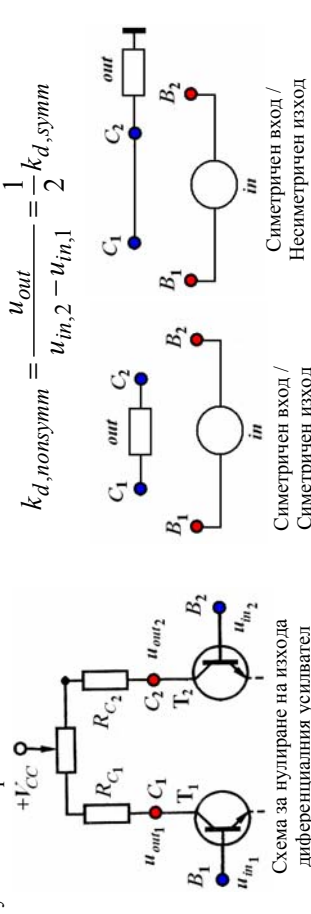
$$CMRR = \frac{k_d}{k_s} \cong 10^4 \uparrow$$

Тук известен проблем е фактът, че за да има силна ООВ и нисък коефициент k_s , е необходимо съпротивление R_E да е високо, както и напрежението V_{EE} . Този проблем може да бъде преодолян, ако вместо обикновено съпротивление $R_E \sim 100 \Omega$, между точките АВ на схемата на диференциалния усилвател се включва високо динамично съпротивление $r_d \sim k\Omega$ на транзистора T_3 на схемата вляво. Транзисторът T_4 , свързан тук като диод, използва за температурна стабилизация на схемата.



Свързване на входовете и изходите на диференциалния усилвател

Два важни практически проблема при диференциалния усилвател са показани тук. Първият е “нулирането” на изходното напрежение, при отсъствие на входни сигнали. Това става с потенциометъра на схемата долу. При даване “накъсо” на входовете B_1 и B_2 , потенциометърът се нагласява така, че между изходите да се измерва нулево изходно напрежение. При съвременните интегрални усилватели симетрията е по-добра и този проблем не е така силен. Другият проблем е начина на свързване на входовете и изходите. При симетрично подаване на сигнал на входовете B_1 и B_2 , на изхода сигнала може да се схема симетрично или несиметрично, но коефициентите на усилване са различни.



$$k_{d, \text{посумт}} = \frac{u_{out}}{u_{in,2} - u_{in,1}} \cong \frac{1}{2} k_{d, \text{symm}}$$

Симетричен вход / Симетричен изход

Симетричен вход / Несиметричен изход

Схема за нулиране на изхода диференциалния усилвател

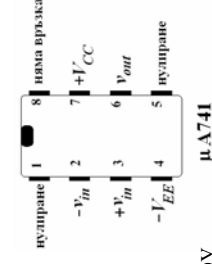
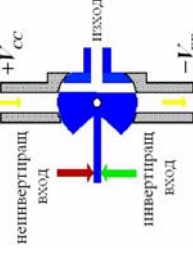
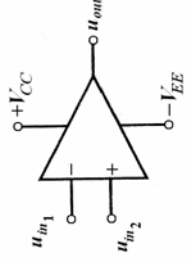
Лекция 17

17.2 Операционен усилвател – предназначение, принципна схема. Коефициенти на усилване при инвертиращ и неинвертиращ операционен усилвател.

Операционен усилвател

Операционният усилвател (ОУ, Operational Amplifier, Op-Amp) е едно от най-използваните в електрониката устройства и типична интегрална схема. ОУ има много приложения и изпълнява разнообразни *операции* върху входните аналогови сигнали в зависимост от използваната обратна връзка. Освен усилване на постояннотокови и променливотокови сигнали с голям коефициент на усилване, сравняване, преобразуване на сигнали и др., могат да се извършват и математически операции с тях – събиране, изваждане, умножение с число, диференциране, интегриране, логаритмуване и пр.

Како интегрална схема ОУ има два входа, един изход и се захранва с две противо-полярни dc напрежения. Главните свойства на ОУ са: огромен коефициент на усилване A_{β} без ООВ $\sim 10^6 - 10^8$, много високо входно съпротивление $R_{in} \sim 10^8 + 10^{12} \Omega$, много ниско изходно съпротивление $R_{out} \sim 15 + 150 \Omega$, изключително широка честотна лента – от dc до няколко-стотин МHz и голямо бързодействие.



Механична аналогия на работата на ОУ

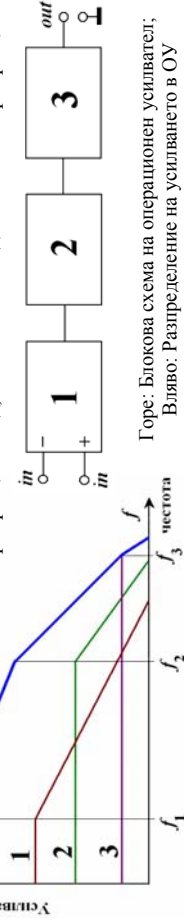
Схематично изображение

Операционни усилватели



Блок-схема на операционен усилвател

Операционният усилвател е сложно интегрално устройство с голям брой транзистори във вътрешната си схема, при това главно полеви в съвременните интегрални схеми. Тук ще представим само най-общата му блокова схема. ОУ се състои от 3 главни вътрешни части: **1. Входен диференциален усилвател**; **2. Схема на преместване на нивото** (усилвател по напрежение) и **3. Изходен емитерен (source) повторител**. Входният диференциален усилвател реализира подтискането на входни синфазни сигнали, голямо усилване за диференциални сигнали, два независими симетрични входа на ОУ и един несиметричен изход, температурна стабилност и пр. С втората схема, която представлява транзисторен делител на напрежение, се създават условия за нулев потенциал на изхода при нулев входен (нулиране) и допълнително усилване. Крайният усилвател е емитерен повторител, чрез който се намалява изходното съпротивление на ОУ и допълнително усилване. В резултат на това, общото усилване на ОУ се получава много високо (вж. графиката), входният импеданс - висок поради ДУ, изходният - нисък поради емитерния повторител. Освен това ОУ има два независими входа - инвертиращ и неинвертиращ: ако се подаде $+u_{in}$ на инвертиращия вход изхода се появява $-u_{out}$, а при $+u_{in}$ на неинвертиращия вход, на изхода се появява $+u_{out}$. Така лесно може да се реализира ООВ от изхода към инвертиращия вход, и ПОВ от изхода към неинвертиращия.



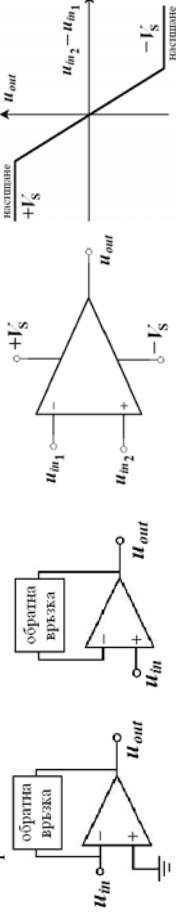
Гор: Блокова схема на операционен усилвател; Вляво: Разпределение на усилването в ОУ

Инвертиращ и неинвертиращ операционен усилвател

Операционният усилвател практически не се използва без отрицателна обратна връзка. Както отбелязахме, ОУ без обратна връзка (open-loop Op-amp) има изключително висок коефициент на усилване $A_{\beta} \sim 10^8$, но той е нестабилен. Високото усилване води до лесно насищане на изхода на ОУ (например $u_{out} = \pm V_s$) дори и при слаби входни сигнали (вж. илюстрацията долу). С други думи, на входовете на ОУ се трябва да се подават слаби сигнали, с други думи *разликата между тях може да се приеме за практическика нула*.

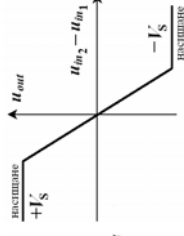
Следователно, една от целите на отрицателната обратна връзка ООВ е да превърне ОУ в усилвател с по-ниско ($A_{\beta} \sim 100-1000$), но достатъчно стабилно усилване, висок входен и нисък изходен импеданс. ООВ се прилага на инвертиращия вход, ако самата тя не внася фазови корекции. В зависимост от това на кой вход се подава входното напрежение, ОУ може да бъде инвертиращ или неинвертиращ (вж. схемите долу).

Другите важни негови свойства са много широка честотна лента, изключително голямо бързодействие на изхода, висока температурна стабилност и практическа независимост от вариациите на захранващото напрежение. Всички изброени свойства правят операционният усилвател ценно електронно устройство в висока универсалност и много приложения в електрониката.



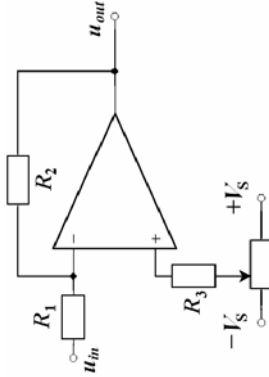
Инвертиращ и неинвертиращ ОУ

Силни входни сигнали в ОУ водят до насищане



“Нулиране” на изходното ниво при операционните усилватели

Схемата, показан долу, позволява да се нулира изходното ниво на операционния усилвател, когато на входа ми се подава нулев сигнал. Обяснете как става това. Определете стойността на съпротивлението R_3 , при което в схемата се постига пълен баланс?



Отговор:

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Параметър “Slew Rate” при операционните усилватели

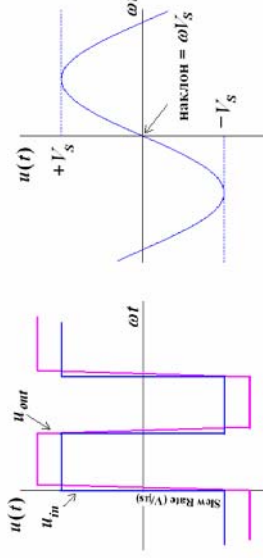
Много важен параметър при ОУ, който е свързан с тяхното бързодействие, е т. нар. “Slew Rate”. SR. По дефиниция величината SR представлява максималното ниво на изменение на изходния сигнал във времето във всяка точка на дадена схема за произволни входни сигнали, т.с.

$$SR = \max \left(\left| \frac{du_{out}(t)}{dt} \right| \right), \text{ V}/\mu\text{s}$$

Ако стойността на тази величина е малка, това води до поява на нелинейни ефекти в електронните усилватели (в частност и при ОУ). При синусоидални сигнали, за да няма ограничения във формата на изходния сигнал от ОУ, величината SR трябва да удовлетворява следното изискване:

$$SR \geq 2\pi f V_S$$

където f е честотата на сигнала, а V_S е максималното изходно напрежение в операционния усилвател. Величината SR обикновено се измерва във $\text{V}/\mu\text{s}$.



Дефиниция на величината “Slew Rate” SR

Лекция 17

17.3 Основни приложения на операционни усилватели (I част): компаратор на напрежение; преобразувател “ток-напрежение” и “напрежение-ток”; повторител на напрежение; диференциален усилвател.

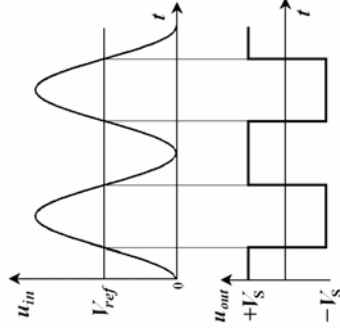
Компаратор (сравнител на напрежения)

Едно елементарно приложение на операционния усилвател е т. нар. компаратор (сравнител) на напрежения. В този режим ОУ работи без ООБ в наситен режим. Поради големия коефициент на усилване, изходният сигнал е винаги наситен

$$u_{out} = A_0(V_{ref} - u_{in}) = \pm V_S$$

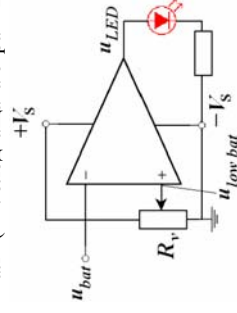
$$u_{in} < V_{ref} \Rightarrow u_{out} = +V_S$$

$$u_{in} > V_{ref} \Rightarrow u_{out} = -V_S$$



Компаратор на напрежение и неговото действие

Подобна схема може да се използва в много практически случаи като електронен ключ за индикация на определени цифрови сигнали (вж. следващата страница).



Елементарна схема за индикация на “слаба батерия” (low bat); обяснете действието

Регулируем компаратор

Това е вариант на компаратор с регулируемо ниво за сравнение V_{ref} . Долу са показани две различни състояния между сравнявани напрежения.

Обяснете самостоятелно действието на схемата с регулировката и графичните зависимости по-долу.

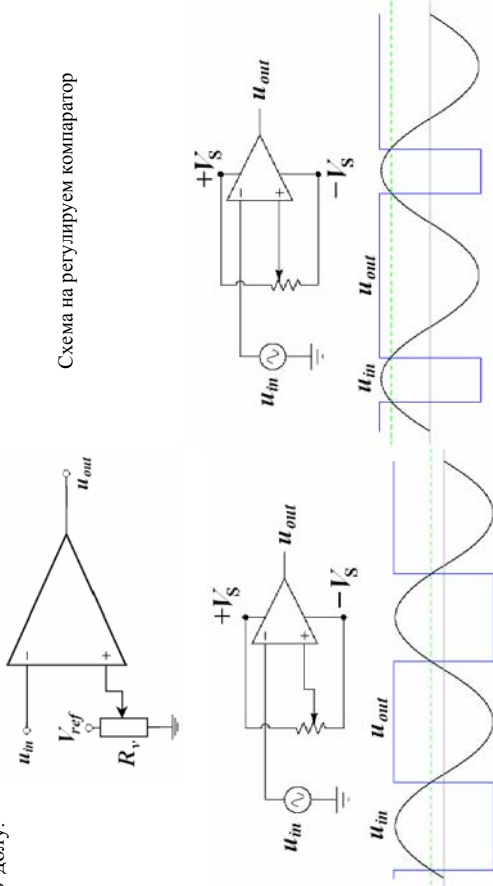


Схема на регулируем компаратор

Тригер на Шмидт

Показаната на предишната страница схема на компаратор на напрежение на основата на ОУ има съществен недостатък. Превключването на изхода в двете наситени състояния $\pm V_S$ става при точно определена стойност на референтното напрежение V_{ref} , т.е. без "хистерезис". Когато сигналът е шумов, превключването може да стане многократно в тесен времеви интервал и, следователно, става нестабилно (вж. фигурата горе). Проблемът може да се реши, ако изкуствено се въведе "хистерезис" при нивото на превключване V_{high} и V_{low} (вж. фигурата вдясно). Това става при т. нар. тригери на Шмидт – устройствата с две стабилни състояния, използвани в цифровата техника – при преобразуване на аналоговите сигнали в цифрови.

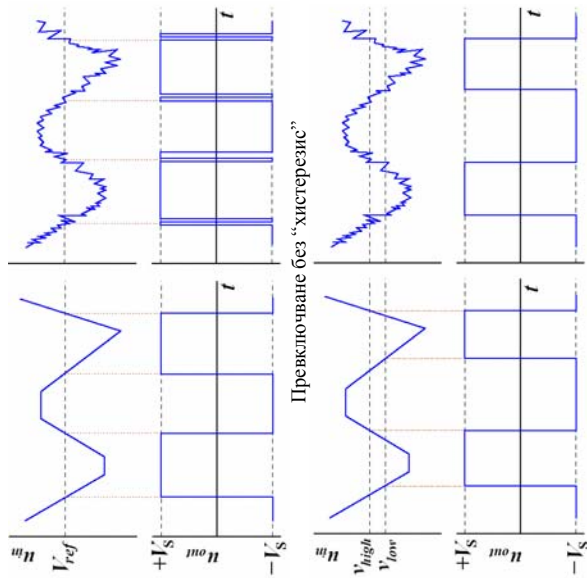


Схема на тригер на Шмидт с хистерезис на превключването

За да се получи "хистерезис" на превключването се въвежда положителна обратна връзка в ОУ (вж. схемата долу). Вдясно е дадената схемата на самата обратна връзка. Референтното ниво е V_r без обратна връзка, с обратната връзка се въвежда със съпротивлението R_f :

$$V_r = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{ref} \quad \alpha = \frac{R_1 R_2}{R_f (R_1 + R_2)}$$

Така могат да се получат изрази за двете референтни нива V_{high} и V_{low}

$$V_{high} = V_r \frac{1}{1 + \alpha} + V_S \frac{\alpha}{1 + \alpha} \approx V_r + V_S \alpha \quad (\alpha \ll 1)$$

$$V_{low} = V_r \frac{1}{1 + \alpha} - V_S \frac{\alpha}{1 + \alpha} \approx V_r - V_S \alpha \quad (\alpha \ll 1)$$

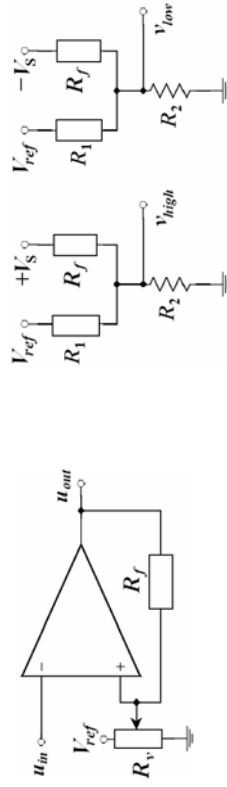


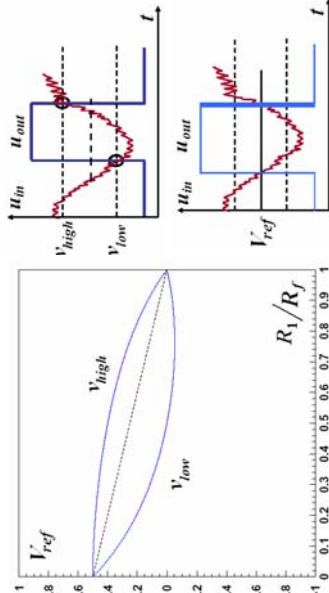
Схема на компаратор в ПОВ – тригер на Шмидт

Хистерезисът води до понижена чувствителност от входен шум

От информацията догук следва, че "хистерезисът" в тригера на Шмидт $+I_S$ прави схемата по-малко чувствителна от въздействието на входния шум. Ако шумовите вариации във входния сигнал са по-малки от разликата $|V_{high} - V_{low}|$, те практически не водят до паразитни превключвания и минимизират необходимостта от филтриране на шума. Тази разлика в референтните нива се поддържа с дълбочината на ПОВ (т. е. от параметъра α)

$$V_{high,low} = V_r \pm \alpha V_S \quad (\alpha \ll 1)$$

Така тригерът на Шмидт с хистерезис на превключване между две близки по напрежение нива въвежда някакъв тип "памет" в системата на преобразуване на аналогов сигнал в цифров. Ако входното напрежение има дадена стойност след намаляване -0.2 не – превключването на изхода става при V_{low} ако тази стойност е при нарастване – при V_{high} . Тази "памет" се оказва важна за правилният преход от аналогов към цифров сигнал.



Хистерезис в координати u_{in} – u_{out} и зависимост на нивата $V_{high,low}$ от нивото на обратната връзка

Повторител на напрежение

Друга важна схема с ОУ, чието действие ни е познато от други транзисторни схеми, е повторителят на напрежение. Вече ни е известно, че тази схема има важно практическо значение за реализация на устройства с високо входно и ниско изходно съпротивление без промяна на напрежението, с цел съгласуване на устройствата или с други думи – “изолиране” на устройствата от нежелано паразитно взаимодействие. Лесният начин, по който се постига това с ОУ, е впечатляващ. Оказва се, че е достатъчно да се добави само ООБ с нулево съпротивление $R_2 = 0$ и безкрайно-голямо съпротивление $R_1 = \infty$ (100%-о ООБ), а входното напрежение u_{in} да се подаде на не-инвертиращия вход, т.е.

$$A_{\beta}^+ = \frac{u_{out}}{u_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \cong 1 \quad \Rightarrow \quad u_{out} = u_{in}$$

Така входното съпротивление е $\sim R_1 = \infty$, а изходното съпротивление $\sim R_2 = 0$, които са идеални за устройството със свойствата на повторител на напрежение. Ще отбележим и друго важно обстоятелство. Понеже във веригата на ООБ не тече ток, добавянето на нулево съпротивление $R_2 \neq 0$ не влияе на действието на повторителя, но се предпочитва за стабилизиране на схемата и защита.

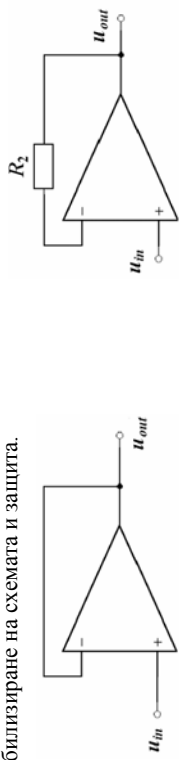
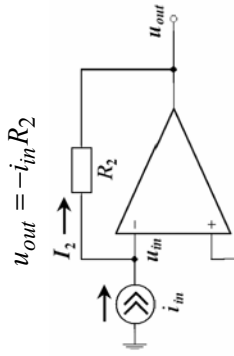


Схема за повторител на напрежение с нулево съпротивление $R_2 = 0$ и нулево съпротивление $R_2 \neq 0$

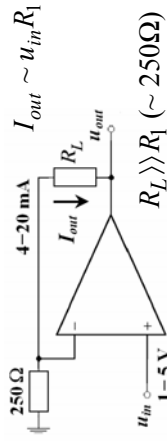
Преобразувател “ток-напрежение” и “напрежение-ток”

Операционният усилвател лесно може да се използва за преобразуватели (конвертори) “ток-напрежение” и обратно. Долу е показан първият тип преобразувател. На инвертиращия вход е включен генератор на ток i_{in} с нулев пад на напрежение. Тогава

$u_{in} = 0 = I_2 R_2 + u_{out}$
 Понеже $u_{in} = 0$, токът I_2 през постоянното съпротивление R_2 е $I_2 = i_{in}$. Така изходното напрежение u_{out} е пропорционално на входния ток i_{in} , регулирано чрез подбор на съпротивлението R_2 , т.е.



Преобразувател “ток-напрежение”



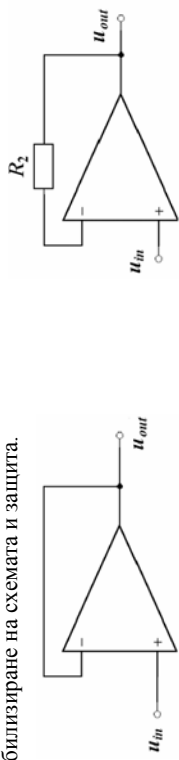
Преобразувател “напрежение-ток”

Диференциален усилвател

При много приложения в електрониката сигналите се разпространяват по дълги кабели, след което трябва да се обработят в приемника. Така те придобиват шумова съставка: $u_S + u_n$. Много добра идея е да се използва симетрична кабелна линия, например усукана двойка или др., в която се разпространяват два сигнала $u_{in1} = u_S + u_n$ и $u_{in2} = -u_S + u_n$. Тези два сигнала могат да се подадат на входовете на диференциален усилвател, който ще усили разликата в сигналите $u_{in1} - u_{in2} = 2u_S + u_n - u_n$ и така ще подтисне шума. Диференциален усилвател може да се реализира с ОУ, но ако се използва ООБ (вж. схемата долу вляво). Ако се използва пълна симетрия и дори $A_{\beta}^+ = 1$, може да се реализира пълна аналогия с обикновен диференциален усилвател. Проблем е ниското входно съпротивление, но той се решава (вж.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad \Rightarrow \quad u_{out} = -\frac{R_2}{R_1}(u_{in1} - u_{in2}) \quad R_1 = R_2 \quad \Rightarrow \quad u_{out} = (u_{in2} - u_{in1})$$

Диференциален усилвател в по-високо входно съпротивление (Защо?). Двата ОУ на входа са повторители на напрежение.



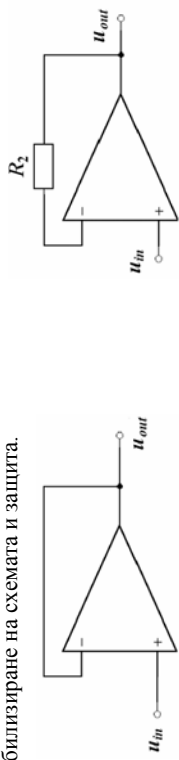
Диференциален усилвател

Диференциален усилвател

Диференциален усилвател

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad \Rightarrow \quad u_{out} = -\frac{R_2}{R_1}(u_{in1} - u_{in2}) \quad R_1 = R_2 \quad \Rightarrow \quad u_{out} = (u_{in2} - u_{in1})$$

Диференциален усилвател



Диференциален усилвател

Лекция 15

17.4 Основни приложения на операционни усилватели (II част): сумиращ усилвател; функционални усилватели - логаритмичен и анти-логаритмичен усилвател; Интегриращ и диференциращ усилвател. Активни филтри.

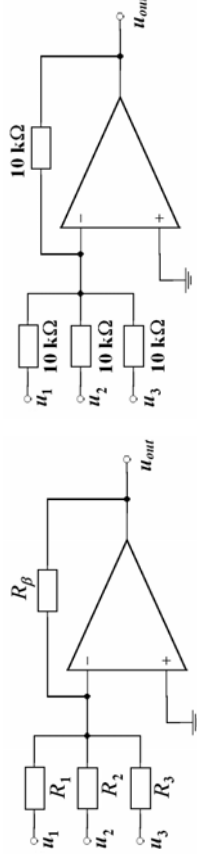
Сумиращ усилвател (с теглови коефициент или директно)

С помощта на ОУ лесно може да се съставят схеми на различни видове суматори. Показаният на схемата е суматор на три входни сигнала с различни теглови коефициенти, разделени от коефициента на усиление за всеки клон на веригата. За да получим израз за изходното напрежение използваме второто правило за ОУ, според което инвертиращият вход може да се разглежда като "виртуална земя", ако неинвертиращият се заземим реално. Така можем да определим токовете през всяко съпротивление на входа и изходното напрежение (напомниме, че ток през ОУ не тече съгласно първото правило)

$$i_{1,2,3} = u_{1,2,3} / R_{1,2,3} \Rightarrow u_{out} = 0 - (i_1 + i_2 + i_3)R\beta$$

Следователно, изходният сигнал е сума от входните, всеки умножен с число)

$$u_{out} = -\left(\frac{R\beta}{R_1}u_1 + \frac{R\beta}{R_2}u_2 + \frac{R\beta}{R_3}u_3 \right) \Rightarrow u_{out} = -R\beta(u_1 + u_2 + u_3)$$



Суматор с теглови коефициент

Обикновен суматор (adder) с усиление = 1 (обяснете как се получава този ефект)

Осредняващ усилвател. Сумиращо-изваждащ усилвател

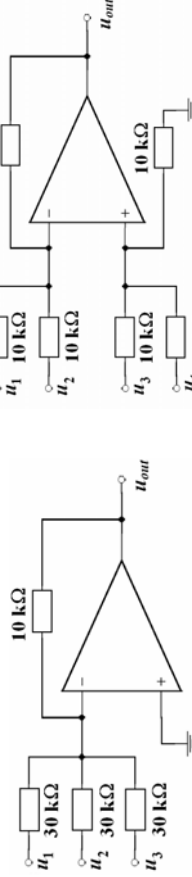
Тук са представени още две схеми на суматори с различни функции. Първата схема представлява устройство, което осреднява входните сигнали (осредняващ усилвател). Обяснете действието ѝ.

$$u_{out} = -\frac{R\beta}{R_1}(u_1 + u_2 + u_3) = -\frac{u_1 + u_2 + u_3}{3}$$

Второто устройство за сумиране и изваждане на сигнали. Сигналите, които се сумират, се подават на неинвертиращия вход, а сигналите, които се изваждат – на инвертиращия

$$u_{out} = -u_1 - u_2 + u_3 + u_4$$

Следва да се отбележи, че изходното съпротивление не може да надхвърля границите на интервала между отрицателното и положителното запазващо напрежение, т. е. $|u_{out}| < V_S$. Това ограничава и интервала на аритметичните действия със сигналите.



Осредняващ суматор

Сумиране и изваждане на сигнали

Функционални схеми. Пример – логаритмичен усилвател

С помощта на различни схеми на функционални обрат-ни връзки в ОУ могат да се конструират различни специфични усилватели. Нека схемата на ООВ е такава, че изходното напрежение е някаква произволна функция на тока $u_{out} = f(i)$. Понеже токът през елемент на ООВ е същият като изходния ток (инвертиращият вход в виртуална земя), то

$$u_{out}(t) = -f(i) = -f\left(\frac{u_{in}}{R_{in}}\right)$$

Пример: Логаритмичен усилвател.

В схемата на ООВ е свързан диод с нелинейна връзка между тока и напрежението. Понеже токът през диода D е равен на тока през съпротивлението $i_D = i_D$ следва

$$i_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{u_{out}}{kT/q}\right) - 1 \right] = i_D = \frac{u_{in}}{R_1}$$

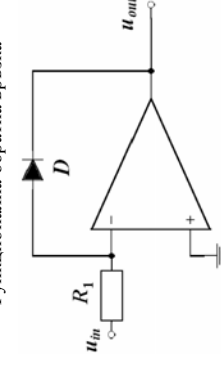
Като се преобразува този израз, следва

$$u_{out} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{u_{in}}{R_1 I_0}\right)$$

или

$$u_{out}(t) \sim \ln(u_{in})$$

Функционална обратна връзка



Логаритмичен усилвател

Функционални схеми. Пример – анти-логаритмичен усилвател

Вторият пример се отнася до схема на анти-логаритмичен усилвател. Сега диод с нелинейна връзка между тока и напрежението е поставен във входната верига.

$$i_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{u_{out}}{kT/q}\right) - 1 \right]$$

От друга страна

$$u_{in} = I_2 R_2 = -i_D R_2$$

или

$$-\frac{u_{out}}{R_2} = I_0 \exp\left(\frac{u_{in}}{kT/q}\right)$$

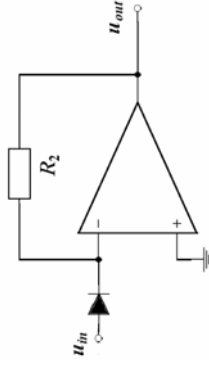
Следователно, изходното напрежение в този случай е

$$u_{out} = I_0 R_2 \exp\left(\frac{u_{in}}{kT/q}\right)$$

или

$$u_{out}(t) \sim e^{u_{in}}$$

Анти-логаритмичен усилвател



Диференциране и интегриране на сигнали

Обратната връзка в операционния усилвател може да се реализира и с комплексни елементи – кондензатори и индуктивности. На фигурата вдясно е показан ОУ с ООБ с импеданси Z_{in} и Z_f . Като използваме правилото за “виртуалното заземяване” на инвертиращия вход, следва:

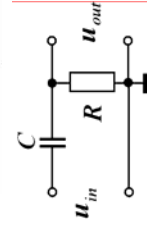
$$i_{in}(\omega) = \frac{u_{in}}{Z_{in}(\omega)} \quad u_{out}(\omega) = 0 - \frac{Z_f(\omega)}{Z_{in}(\omega)} u_{in}(\omega)$$

Така със замяна на комплексните импеданси с различни компоненти могат да се реализират различни активни устройства, влияещи на спектъра на входния сигнал: диференциатори, интегратори, активни филтри и др. Долу само припомняме:



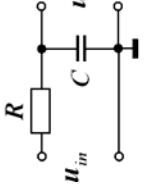
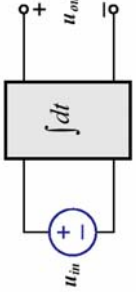
Условие за добро диференциране

$$\omega RC \ll 1$$



Условие за добро интегриране

$$\omega RC \gg 1$$

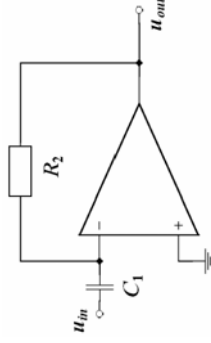


Диференциращ и интегриращ усилвател

Долу са показани две схеми на диференциращ и интегриращ усилвател с RC елементи. Те изпълняват същата роля както при съответните пасивни вериги, ладени на предишната страница. Опитайте се с правилото за “виртуалното заземяване” на инвертиращия вход да обясните действието на всяка една от схемите, като използвате и изразите. Направете отделна схема на обратната връзка на всяко устройство и сравнете със съответната пасивна схема. Отново посочете условията за добро диференциране и интегриране.

$$i_{in} = C \frac{du_{in}}{dt} = i_{out} = -\frac{1}{R} u_{out}$$

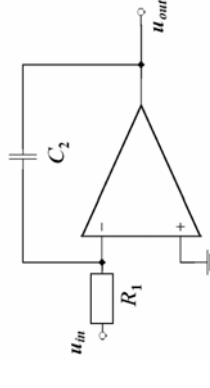
$$\Rightarrow u_{out} = -RC \frac{du_{in}}{dt}$$



Диференциращ усилвател

$$i_{in} = -\frac{u_{in}}{R} = i_{out} = -C \frac{du_{in}}{dt}$$

$$\Rightarrow u_{out} = -\frac{1}{RC} \int du_{in} dt$$



Интегриращ усилвател

Активни филтри

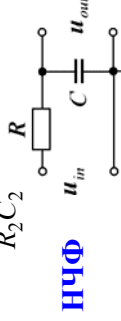
Накрая, с помощта на ОУ могат да се конструират и активни филтри. Долу са показани две схеми на ниско-честотен НЧФ и високочестотен филтър ВЧФ в пасивно и активно изпълнение. Сравнете двойките схеми и отново с помощта на правилото за “виртуалното заземяване” на инвертиращия вход обяснете действието на схемите, като използвате и изразите. Каква разлика забелязвате в усилването.

$$A_{\beta}(\omega) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + j\omega/\omega_{RC}} \quad \text{Усилване}$$

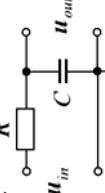
$$\omega_{RC} = \frac{1}{R_2 C_2}$$

Критична честота

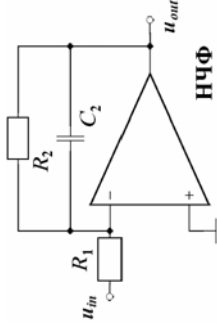
$$\omega_{RC} = \frac{1}{R_1 C_1}$$



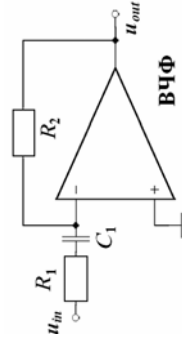
НЧФ



ВЧФ



НЧФ



ВЧФ