

II. ИЗМЕРВАТЕЛНИ УСИЛВАТЕЛИ

Основното предназначение на усилвателите е усилването (увеличаването) на входната величина до необходимата стойност, следователно по същество, те представляват мащабни преобразуватели. Различаваме следните видове усилватели: на ток, мощност и напрежение, като последните имат най-голямо разпространение. Измервателен усилвател - това е усилвател, имащ нормирани метрологични характеристики и параметри. Най-важните характеристики и параметри на измервателните усилватели, подлежащи на нормиране са: *амплитудната характеристика АХ, амплитудно-честотната характеристика АЧХ, фазово-честотната характеристика ФЧХ, преходната характеристика ПХ, коефициентът на усилване (чувствителността), входното и изходното съпротивление и др.*, а така също и грешките на тези параметри и характеристики, от които най-често се използват: *адитивната грешка (грешката на нулата), мултипликативната грешка (грешката на коефициента на усилване) и честотната грешка (грешката на АЧХ)*. Съвременните измервателни усилватели се строят изключително на базата на операционни усилватели чрез въвеждане на подходящи обратни връзки.

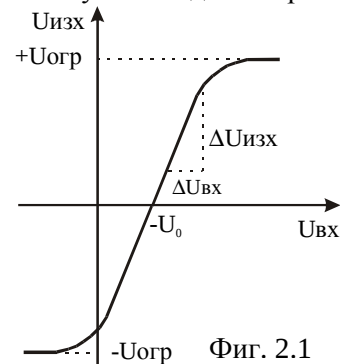
2.1. Основни метрологични параметри и характеристики на измервателните усилватели

Уравнението на преобразуване на усилвателя на напрежение има вида: $U_{изх} = k \cdot U_{вх}$, където k - коефициент на усилване на усилвателя. В идеалния случай k е постоянна величина, но на практика се оказва зависим както от външни влияещи фактори (температура, влажност, атмосферно налягане, радиация и др.), така и от параметрите на входния сигнал (амплитуда, честота, форма и др.). Освен това, в реалните усилватели, в уравнението на преобразуване се появява и постоянен член, причиняващ адитивна грешка на усилвателя (грешка на нулата или още дрейф на нулата). В съответствие с казаното до тук, реалното уравнение на преобразуване на усилвателя на напрежение има следния вид:

$$U_{изх} = k(U_{вх}, f_{вх}, t^0, t...)(U_{вх} + U_0) \quad (2.1)$$

където U_0 - адитивната грешка на усилвателя, приведена към входа му. Адитивната грешка се дължи на несъвършенството на градивните компоненти (транзистори, диоди, резистори) на

усилвателя и е функция от изменението на захранващите напрежения, на температурата на околната среда, на стареенето на елементите и на други външни и вътрешни флукуационни явления. Адитивна грешка е прието да се определя като напрежение, взето с обратен знак, което трябва да се подаде на входа на усилвателя, за да се получи изходно напрежение, равно на нула.



Фиг. 2.1

Амплитудната характеристика на идеалния усилвател е линейна функция на изходното напрежение от входното, а на реалния усилвател се различава от линейната, поради нелинейните характеристики на градивните активни елементи (транзистори или интегрални схеми), а при достатъчно големи входни сигнали - поради ограничението, определено от захранващото напрежение. На Фиг.2.1 е представена

амплитудна характеристика на реален усилвател, където:

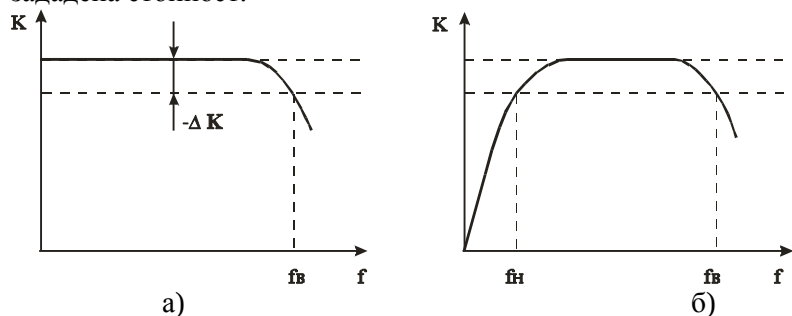
$-U_0$ - адитивната грешка;

$\pm U_{огр}$ - напрежението на ограничение на изходното напрежение на усилвателя, като $0.7U_{запр} < U_{огр} \leq U_{запр}$, в зависимост от типа на използвания операционен усилвател;

$k = \Delta U_{изх} / \Delta U_{вх}$ - коефициент на усилване на операционния усилвател.

Амплитудно-честотната характеристика (Фиг.2.2-а,-б) представлява зависимостта на коефициента на усилване от честотата на входния синусоиден сигнал. В усилвателите на променливо напрежение коефициентът на усилване в областта на ниските честоти намалява с намаляването на честотата (Фиг. 2.2-б). Това се обяснява с наличието на капацитивно - резистивни междустъпални връзки, проявяващи свойствата на неидеално диференциращо звено. В областта на високите честоти, както при усилвателите на постоянно (Фиг.2.2-а), така и на променливо (Фиг.2.2-б) напрежение, намаляването на коефициента на усилване k се обяснява с наличието на паразитни капацитети в усилвателните стъпала, образувачи неидеални интегриращи звена в правата верига на усилвателя. АЧХ на променливотоковите усилватели обикновено се характеризира с лента на пропускане (честотна лента), представляваща разликата между високата (f_v) и ниската (f_n) граници на честотния диапазон, в

който грешката на коефициента на усилване Δk не превишава зададена стойност.



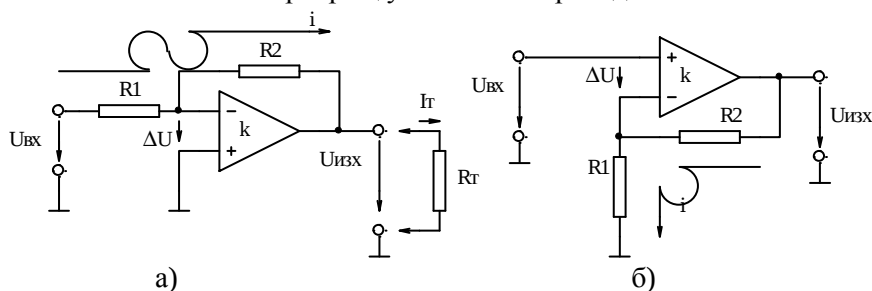
Фиг. 2.2

Фазочестотната характеристика $\Phi ЧХ$ представлява зависимостта на фазовата разлика между изходния и входния сигнал от честотата на последния.

Преходната характеристика $ПХ$ на усилвателя се характеризира най-често със скоростта на изменение ($\Delta U_{изх} / \Delta t$) на изходното напрежение, при подаване на входа му скокообразно изменящо се напрежение (параметър SR - виж Приложение 3).

2.2. Инвертиращ усилвател

Схемата на инвертиращ усилвател е приведена на Фиг. 2.3-а.



Фиг. 2.3

Полагайки за операционния усилвател OU : коефициентът на усилване равен на k и входното диференциално съпротивление $r_{ex.диф} = \infty$, то можем да съставим следната система от уравнения:

$$U_{изх} = -k \cdot \Delta U, \quad U_{ex} = i \cdot R_1 + \Delta U \quad \text{и} \quad \Delta U = i \cdot R_2 + U_{изх} \quad (2.2)$$

Решавайки уравнения (2.2) спрямо U_{ex} и ΔU получаваме:

$$U_{изх} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{k\beta}{1+k\beta} \cdot U_{ex} = K_{ИУ} \cdot U_{ex} \quad \text{и} \quad \Delta U = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{U_{ex}}{1+k\beta}, \quad (2.3)$$

където $K_{ИУ}$ - коефициент на усилване на инвертиращия усилвател:

$$K_{ИУ} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{k\beta}{1+k\beta} \xrightarrow{k\beta \rightarrow \infty} -\frac{R_2}{R_1}, \quad (2.4)$$

а $\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$ - коефициент на предаване на веригата за паралелна отрицателна обратна връзка по напрежение.

Коефициентът на усилване на инвертиращия усилвател се определя още и от входното му съпротивление $r_{ex.диф}$. (входно диференциално съпротивление), тъй като се включва в паралел с R_1 и по такъв начин участва в израза за коефициента на обратната връзка β . С отчитане на тези два параметъра, изразът за $k_{ИУ}$ ще има вида:

$$k_{ИУ}^* = -\frac{R_2}{R_1^*} \cdot \frac{k\beta^*}{1+k\beta^*}, \quad \text{за} \quad R_1^* = \frac{R_1 \cdot (r_{ex.диф} + R_3)}{R_1 + r_{ex.диф} + R_3} \quad \text{и} \quad \beta^* = R_1^* / (R_1 + R_2) \quad (2.5)$$

Влиянието на коефициента $M_{сф}$ (коефициент на подтискане на синфазния сигнал) за инвертиращия усилвател може да се пренебрегне, тъй като входното синфазно напрежение при него фактически е равно на нула: $e_- \approx e_+ = 0$.

Входното съпротивление на усилвателя от Фиг. 2.3-а се определя по формулата:

$$R_{ex} = \frac{\Delta U_{ex}}{\Delta I_{ex}} \approx \frac{U_{ex}}{i} = \frac{U_{ex}}{\frac{U_{ex} - \Delta U}{R_1}} = R_1 + \frac{R_2}{k+1} \xrightarrow{R_1 \gg R_2/(k+1)} \approx R_1. \quad (2.6)$$

Изходното съпротивление $R_{изх}$ на същия усилвател можем да определим, полагайки входното напрежение $U_X = const$ и задавайки изменение на товарното съпротивление: $R_T \pm \Delta R_T$ [5]:

$$R_{изх} = -\frac{dU_{изх}}{dI_T} = \frac{r_{изх}}{1+k\beta + \frac{r_{изх}}{R_1 + R_2}} \approx \frac{r_{изх}}{1+k\beta}, \quad (2.7)$$

където $r_{изх}$ - изходното съпротивление на операционния усилвател и при изпълнение на условията $k\beta \gg 1$ и $r_{изх} / (R_1 + R_2) \ll 1$.

2.3. Неинвертиращ измервателен усилвател

Схемата на неинвертиращ усилвател е приведена на Фиг. 2.3-б. Полагайки за операционния усилвател ОУ: коефициентът на усиление равен на k и $r_{ex.диф} = \infty$, то можем да съставим следната система от уравнения:

$$U_{изх} = k \cdot \Delta U, \quad U_{ex} = \Delta U + i \cdot R_1 \quad \text{и} \quad U_{изх} = i \cdot (R_1 + R_2) \quad (2.8)$$

Решавайки уравнения (2.8) спрямо $U_{изх}$ и ΔU получаваме:

$$U_{изх} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{k\beta}{1 + k\beta} \cdot U_{ex} = K_{HY} \cdot U_{ex} \quad \text{и} \quad \Delta U = \frac{U_{ex}}{1 + k\beta}, \quad (2.9)$$

където K_{HY} - коефициент на усиление на неинвертиращия усилвател:

$$K_{HY} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{k\beta}{1 + k\beta} \xrightarrow{k\beta \rightarrow \infty} 1 + \frac{R_2}{R_1}, \quad (2.10)$$

където $\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$ - коефициент на предаване на последователната отрицателна обратна връзка по напрежение.

Влиянието на $r_{ex.диф}$ върху коефициента на усиление на неинвертиращия усилвател се определя по аналогичен начин чрез промяна на коефициента β както беше показано при инвертиращия усилвател (формула 2.5)

За разлика от инвертиращия, при неинвертиращия усилвател синфазното напрежение е равно на входното, вследствие на което, коефициентът M_{cf} участва в израза за K_{HY} . С отчитане на M_{cf} , коефициентът на усиление на неинвертиращия усилвател се определя от следния израз [5]:

$$K_{HY} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{k\beta}{1 + k\beta} \left(\frac{1 + 0.5M_{cf}}{1 - 0.5M_{cf}} \right) \xrightarrow{k\beta \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \left(\frac{1 + 0.5M_{cf}}{1 - 0.5M_{cf}} \right) \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{M_{cf}}\right) \quad (2.11)$$

Входното съпротивление на неинвертиращ усилвател, отчитайки реалните параметри на операционния усилвател $r_{ex.диф}$ (входно диференциално съпротивление), $r_{ex.сф}$ (входно

синфазно съпротивление) и M_{cf} (коефициент на подтискане на синфазния сигнал), се определя по следната формула [5]:

$$R_{ex} = r_{ex.сф} \cdot R_e / (r_{ex.сф} + R_e), \quad \text{където:} \quad (2.12)$$

$$R_e = \frac{r_{ex.диф} \cdot (1 + k\beta) + R_1 R_2 / (R_1 + R_2)}{1 - k\beta / M_{cf}} \approx r_{ex.диф} \cdot (1 + k\beta), \quad (2.13)$$

при $M_{cf} \gg k\beta$ и $R_1 R_2 / (R_1 + R_2) \ll r_{ex}$.

Ако M_{cf} е сравним с $k\beta$, това може да доведе до увеличаване или намаляване на R_e , съответно на R_{ex} , в зависимост от големината и знака на M_{cf} .

Както се вижда от формулите (2.12) и (2.13), входното съпротивление на неинвертиращия усилвател може да бъде много голямо, като на практика се ограничава отгоре от стойността на $r_{сф}$ (при $R_e \rightarrow \infty$).

Исходното съпротивление на неинвертиращия усилвател се определя аналогично на инвертиращия - формула (2.7).

От изразите за ΔU - формули (2.3) и (2.9) следва едно важно и полезно за практиката свойство на измервателните усилватели, обхванати от отрицателни обратни връзки - *еквипотенциалност на входовете на ОУ*. Действително, ако положим $k\beta \rightarrow \infty$, то $\Delta U = 0$. Тъй като коефициентът на усиление k на съвременните операционни усилватели е достатъчно голям (от порядъка на 10^6 и повече), то условието $k\beta \rightarrow \infty$ ($\Delta U = 0$) в повечето случаи практически се изпълнява. Еквипотенциалността на входовете може да се използва за опростяване на анализа и на изчисленията на схемите с операционни усилватели. Така, например, ако приемем в схемата от Фиг. 2.3-а $\Delta U = 0$, лесно могат да се получат изведените за тази схема изрази:

$$i = U_{ex} / R_1, \quad U_{изх} = -i \cdot R_2 = -U_{ex} \cdot R_2 / R_1, \quad K_{HY} = -R_2 / R_1, \quad R_{ex} = R_1.$$

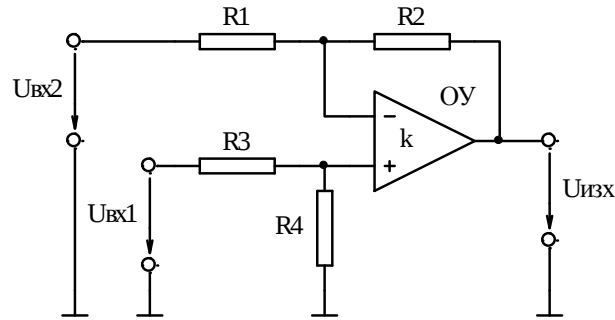
2.4. Диференциален усилвател

Схемата на елементарен диференциален усилвател, построен с един ОУ е показана на Фиг. 2.4.

Исходното напрежение $U_{изх}$ на такъв усилвател може да се определи като сума от две независими съставлящи, една от които е

обусловена от U_{BX1} , а другата от U_{BX2} (принципа на суперпозицията за линейни вериги). Полагайки $k = \infty$ и $r_{ex.диф} = \infty$ ще получим:

$$U_{изх} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) U_{BX1} - \frac{R_2}{R_1} U_{BX2}, \quad (2.14)$$



Фиг. 2.4

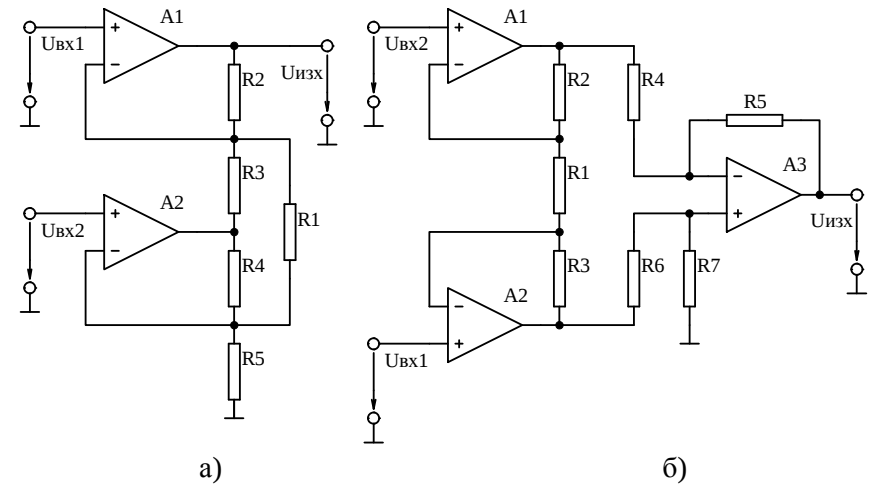
От (2.14) се вижда, че за да се изменя изходното напрежение пропорционално на разликата ($U_{BX1} - U_{BX2}$) е необходимо да се изпълни условието: $R_1/R_2 = R_3/R_4$, (2.15)

при което: $U_{изх} = \frac{R_2}{R_1} (U_{BX1} - U_{BX2})$. (2.16)

Диференциалният усилвател от Фиг. 2.4 има два основни недостатъка: ниско входно съпротивление и трудна регулировка на коефициента на усилване. Регулирането на усилването по тази схема е възможно чрез изменение на съпротивления едновременно на два резистора, например: R_2 и R_4 , запазвайки равенство (2.15). На Фиг. 2.5-а, б са дадени схемите на усъвършенствувани диференциални усилватели, наричани често “инструментални усилватели” [5]. Тези схеми обезпечават високо входно съпротивление и по двата входа, а регулирането на усилването се извършва с изменението само на един резистор.

За схемата от Фиг. 2.5-а, при $R_2/R_3 = R_5/R_4$, изходното напрежение се определя от формулата:

$$U_{изх} = (U_{BX1} - U_{BX2}) \left(\frac{R_2 + R_5}{R_1} + \frac{R_2}{R_3} + 1 \right) \quad (2.17)$$



Фиг. 2.5

В частния случай, ако $R_2 = R_3 = R_4 = R_5$, формула (2.17) придобива вида:

$$U_{изх} = 2(U_{BX1} - U_{BX2}) \cdot (1 + R_2/R_1) \quad (2.18)$$

Схемата от Фиг. 2.5-б осигурява значително по-голям коефициент на подтискане на синфазната съставна на входния сигнал. За този усилвател е необходимо да се изпълни условието: $R_7/R_6 = R_5/R_4$, при което за изходното му напрежение се получава:

$$U_{изх} = (U_{BX1} - U_{BX2}) \frac{R_5}{R_4} \left(\frac{R_2 + R_3}{R_1} + 1 \right) \quad (2.19)$$

От формули (2.17, 18 и 19) се вижда, че коефициентът на усилване може да се регулира с помощта само на един резистор: R_1 .

2.5. Грешки на измервателните усилватели, построени с операционни усилватели

Източници на грешки в измервателните усилватели са параметрите на ОУ и елементите, включвани към него. Най-основните от тях са: коефициентът на усилване k , входните токове (i_+ , i_-), остатъчното напрежение e_o , входните съпротивления $r_{ex.диф.}$ и $r_{ex.сф.}$, изходното съпротивление $r_{изх}$ и коефициента на отслабване на синфазната съставна $M_{сф}$ а също така, неточността на съпротивленията във веригата на отрицателната обратна връзка. В

повечето случаи тези грешки могат да се коригират чрез регулировки на коефициента на усилване (отстраняване на мултипликативната грешка) и на началното ниво на входното напрежение (отстраняване на адитивната грешка) на усилвателя. Тогава грешката ще се определя само от изменението (нестабилността) на влияещите параметри.

Грешките на измервателните усилватели могат да се разделят на две групи: на мултипликативна и адитивна съставлящи. Общият подход за анализ на грешките на измервателните усилватели, както и на методите за тяхното намаляване е изложен в *параграфи 1.5, 1.6 и 1.7.2.*

2.5.1. Мултипликативна грешка

Мултипликативната грешка на измервателния усилвател представлява всъщност грешката на неговия коефициент на усилване. От формулите за коефициентите на усилване (2.4), (2.5), (2.10) и (2.11) се вижда, че *источници* на мултипликативна грешка са: точността и нестабилността на *резисторите* R_1 и R_2 , *определящи коефициента на усилване* от една страна и от друга – *неидеалните параметри на операционния усилвател* k , M_{cf} , $r_{ex.диф.}$ и $r_{ex.сф.}$ и тяхното изменение.

Пълните изрази за относителната мултипликативна грешка на измервателните усилватели във функция от влияещите параметри (k , M_{cf} , $r_{ex.диф.}$, $r_{ex.сф.}$) могат да бъдат получени от формулите за коефициентите на усилване (2.5) и (2.11) по метода на логаритмичния диференциал (*параграф 1.5*). Тези изрази, обаче, са твърди обемисти и неудобни за използване. Нещо повече, приведения анализ в *параграф 1.7.2* показва, че мултипликативната грешка на затворените структури се определя преди всичко от стабилността на коефициента на предаване на обратната верига β (от резисторите R_1 и R_2 в обратната връзка на операционните усилватели). Действително, полагайки $k = M_{cf} = r_{ex.диф.} = r_{ex.сф.} = \infty$ във формулите (2.5) и (2.11) и прилагайки метода на логаритмичния диференциал, получаваме за съставлящата на мултипликативната грешка, дължаща се на грешката на резисторите в обратната връзка:

$$\delta k_{HY}(\delta R_2, \delta R_1) = \delta R_2 - \delta R_1 \quad \text{и} \quad \delta k_{HY}(\delta R_2, \delta R_1) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot (\delta R_2 - \delta R_1) \quad (2.20)$$

От формулите (2.4), (2.10) и (2.20) се вижда, също така, че не е важна толкова стабилността на резисторите R_1 и R_2 колкото стабилността на тяхното отношение R_2/R_1 .

Съставлящата на мултипликативната грешка, дължаща се на изменението на коефициента на усилване k на ОУ може да се определи като допълнителна (към 2.20) грешка от формулите (2.5) и (2.11) по метода на логаритмичния диференциал, полагайки всички други параметри за идеални или константи:

$$\delta k_{HY}(\delta k) = \delta k_{HY}(\delta k) = \frac{\delta k}{1 + k\beta} \quad (2.21)$$

Тук следва да се отбележи, че формула (2.21) напълно съпада с формула (1.21), получена в *параграф 1.7.2* за съставлящата на сумарната мултипликативна грешка, дължаща се на грешката на коефициента k на предаване на правата верига.

Съставлящата на мултипликативната грешка, дължаща се на изменението на $r_{ex.диф.}$ на ОУ може да се определи като допълнителна (към 2.20) грешка от формула (2.5) по аналогичен начин:

$$\begin{aligned} \delta k_{HY}(\delta r_{ex.диф.}) &= \delta k_{HY}(\delta r_{ex.диф.}) = \\ &= \delta r_{ex.диф.} \cdot \frac{1}{1 + k\beta} \cdot \frac{R_3 + R_1 R_2 / (R_1 + R_2)}{R_3 + r_{ex.диф.} + R_1 R_2 / (R_1 + R_2)} \end{aligned} \quad (2.22)$$

За случая на неинвертиращ усилвател, съставлящата на мултипликативната грешка, дължаща се на изменението на M_{cf} на ОУ може да се определи като допълнителна (към 2.20) грешка от формула (2.11) по аналогичен начин:

$$\delta k_{HY}(\delta M_{cf}) = - \frac{\delta M_{cf}}{M_{cf}(1 + 1/M_{cf})} \approx - \frac{\delta M_{cf}}{M_{cf}} \quad (2.23)$$

2.5.2 Адитивна грешка

Источници на адитивна грешка в измервателните усилватели са паразитните параметри на ОУ, като: остатъчното напрежение e_o , входните токове i_+ , i_- и коефициентът на отслабване на синфазната съставна $M_{сф.}$, както и изменението $\Delta E_{закр.}$ на захранващото напрежение. В литература [5] е указано, че $M_{сф.}$ и $\Delta E_{закр.}$ могат да се представят чрез еквивалентно изменение на e_o :

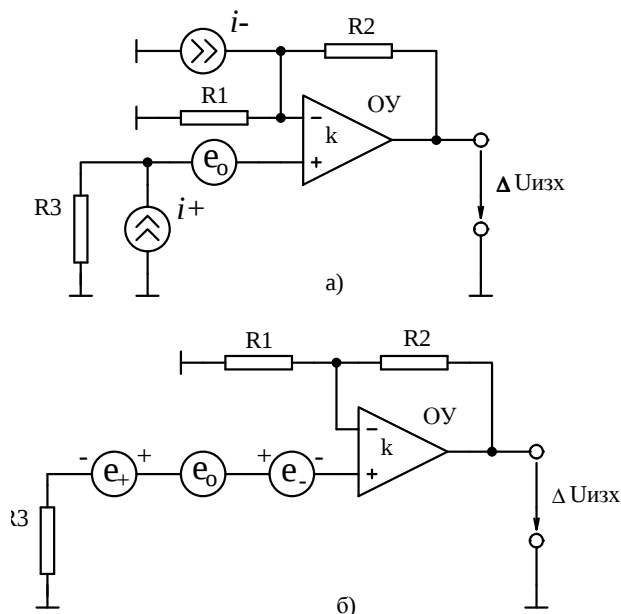
$$\Delta e_o(M_{сф.}) = U_{ex.сф.} / M_{сф.} \quad \text{и} \quad \Delta e_o(\Delta E_{закр.}) = k_{закр.} \cdot \Delta E_{закр.}, \quad (2.24)$$

където $U_{\text{вх. сф}}$ – входно синфазно напрежение и $k_{\text{запр}}$ – коефициент на предаване към входа на изменението на захранващото напрежение. Следователно, за анализа на адитивните грешки е достатъчно да се отчете влиянието на остатъчното напрежение e_o и входните токове i_+ , i_- .

За определяне на адитивната грешка на измервателните усилватели от Фиг.2.3, “заземяваме” входовете им (осъществяваме $U_{\text{вх}} = 0$) и извеждаме източниците на остатъчно напрежение e_o и входни токове i_+ и i_- извън структурата на ОУ, както е показано на Фиг.2.6-а.

Преобразуваме източниците на ток в еквивалентни източници на напрежение и групираме всички източници към неинвертиращия вход на усилвателя, при което се получава окончателната еквивалентна схема - Фиг.2.6-б, от която, за абсолютната адитивна грешка, приведена към входа $\Delta U_{\text{вх.0}}$ ще имаме:

$$\Delta U_{\text{вх.0}} = e_o + R_3 \cdot i_+ - \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} i_- \quad (2.25)$$



Фиг.2.6

Тъй като входните токове са приблизително равни, от израза (2.25) следва, че за намаляване на адитивната грешка е целесъобразно да се изпълни следното условие:

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \quad (2.26)$$

при което за $\Delta U_{\text{вх.0}}$ получаваме:

$$\Delta U_{\text{вх.0}} = e_o + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \Delta i_{\text{вх}}, \quad (2.27)$$

където $\Delta i_{\text{вх}} = i_+ - i_-$ - разликата от входните токове.

Съответно, за абсолютната адитивна грешка, приведена към изхода $\Delta U_{\text{изх.0}}$ ще имаме (при $k = \infty$):

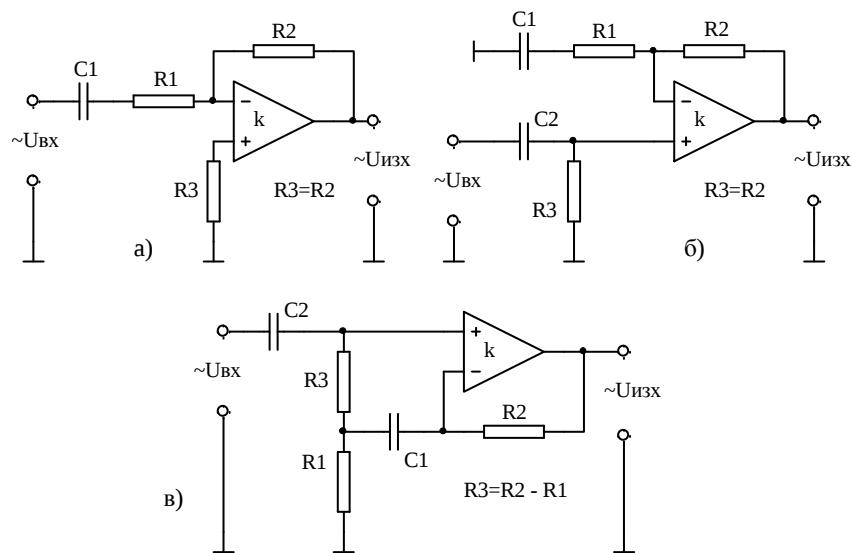
$$\Delta U_{\text{изх.0}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(e_o + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \Delta i_{\text{вх}}\right) \quad (2.28)$$

Ако е извършена компенсация на остатъчното напрежение e_o , то в горните формули e_o следва да се замени с изменението Δe_o , вследствие на влияещия фактор, например - с температурното изменение $TKe_o (\mu V/^\circ C)$.

Съставлящите на адитивната грешка, дължащи се на изменението на захранващото напрежение или на изменението на $M_{\text{сф}}$ (има смисъл само за неинвертиращия усилвател) могат да се определят по формули (2.27) и (2.28), като в тях e_o се замени с $\Delta e_o(M_{\text{сф}})$ или $\Delta e_o(\Delta E_{\text{запр}})$ от формули (2.24).

2.6. Особенности на усилвателите на переменное напряжение.

В случаите, когато трябва да се усилва само променливата съставна на сигнала, на входа на усилвателя се включва разделителен кондензатор (кондензаторът C_1 от Фиг.2.7-а). В неинвертиращите усилватели от Фиг.2.7-б,в, освен кондензатор на входа (C_2) се включва и още един разделителен кондензатор (C_1), последователно с резистора R_1 , с което се снижава до единица коефициентът на усилване на остатъчното напрежение на ОУ и по такъв начин се стабилизира режима на усилвателя по постоянен ток.



Фиг. 2.7

Типичната АЧХ на усилвател за променливо напрежение е показана на Фиг.2.2-б. За инвертиращия усилвател (Фиг.2.7-а), комплексният коефициент на усиление в областта на ниските честоти в случая на идеален ОУ може да се определи по формулата:

$$\dot{k}_{иу} = -\frac{R_2}{Z_1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{j\omega\tau_1}{1 + j\omega\tau_1}, \quad (2.29)$$

където $\tau_1 = R_1 \cdot C_1$. Съответно, АЧХ в областта на ниските честоти се описва със съотношението: $|\dot{k}_{иу}| = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\omega\tau_1}{\sqrt{1 + \omega^2\tau_1^2}}$ (2.30)

В областта на честотите над долната гранична честота f_n (Фиг.2.2-б), която се явява работна област на усилвателя, честотната грешка от разделителния кондензатор може да се определи по формулата:

$$\delta k_{иу}(\omega) = \frac{|\dot{k}_{иу}| - R_2/R_1}{R_2/R_1} \approx -\frac{1}{2\omega^2\tau_1^2}, \text{ където } \omega\tau_1 \gg 1 \quad (2.31)$$

Аналогично може да се покаже, че за неинвертиращия усилвател (Фиг.2.7-б) честотната грешка от разделителните кондензатори в областта на средните честоти ще е равна:

$$\delta k_{иу}(\omega) = \frac{|\dot{k}_{иу}| - (1 + R_2/R_1)}{1 + R_2/R_1} \approx -\frac{1}{2\omega^2} \left(\frac{1}{\tau_1^2} + \frac{1}{\tau_2^2} \right), \quad (2.32)$$

където $\tau_2 = R_3 \cdot C_2$. Тук следва да се отбележи, че резисторът R_3 е необходим за да се затвори веригата за входния ток i_+ на ОУ. Ако R_3 отсъства, входният ток i_+ ще зареди кондензатора C_2 до захранващото напрежение и изхода на ОУ ще влезе в ограничение.

Недостатък на схемата от Фиг.2.7-б е ниското входно съпротивление, равно на R_3 . За да се повиши входното съпротивление и да се понижи честотната грешка на неинвертиращия усилвател, резисторът R_3 се включва така, както е показано на Фиг.2.7-в [5]. В този случай, към R_3 е приложено не цялото входно напрежение, а само малка част от него, равна на сумата от диференциалното входно напрежение на ОУ ($e_+ - e_- \approx U_{вх}/k\beta$) и напрежението на кондензатора C_1 ($\dot{U}_{C1} \approx U_{вх}/j\omega C_1 R_1$) или:

$$|\dot{U}_{R3}| \approx U_{вх} \sqrt{\frac{1}{(k\beta)^2} + \frac{1}{(\omega R_1 C_1)^2}} \quad (2.33)$$

Вследствие на това, еквивалентните стойности на R_3 и τ_2 във формула (2.32) са значително по-големи от фактическите им стойности, благодарение на което се увеличава значително входното съпротивление на усилвателя, а второто събираемо в същата формула значително намалява.

При приблизителни изчисления на честотната грешка на усилвателя в областта на високите честоти (честотната област над f_z - Фиг.2.2-б), дължаща се на инерционността на ОУ, последният се моделира с инерционно звено от първи ред:

$$\dot{k} = \frac{k}{1 + j\omega\tau_y}, \quad (2.34)$$

Времеkonстантата на усилвателя τ_y може ориентировъчно да се определи, изхождайки от единичната честота f_l на усиление на избрания ОУ:

$$|\dot{k}(f_1)| = 1 = \frac{k}{\sqrt{1 + \omega_1^2 \cdot \tau_y^2}} \approx \frac{k}{2\pi \cdot f_1 \cdot \tau_y} \Rightarrow \tau_y \approx \frac{k}{2\pi f_1} \quad (2.35)$$

Комплексният коефициент на усилване $\dot{k}_{OB}$ на ОУ с отрицателна обратна връзка ООВ ще се определи (параграф 1.7.2):

$$\dot{k}_{OB} = \frac{\dot{k}}{1 + k\beta} = \frac{k}{1 + k\beta} \cdot \frac{1}{1 + j\omega\tau_y/(1 + k\beta)} = \frac{k}{1 + k\beta} \cdot \frac{1}{1 + j\omega\tau_E} \quad (2.36)$$

От (2.36) се вижда, че еквивалентната времеконстанта $\tau_E = \tau_y/(1 + k\beta)$ на усилвателя с ООВ е $(1 + k\beta)$ пъти по-малка от времеконстантата на използвания ОУ.

Знаейки f_1 и τ_y , може да се определи честотната грешка в областта на високите честоти, предизвикана от инерционността на ОУ:

$$\delta k(\omega) = \frac{|\dot{k}_{OB}| - k_{OB}}{k_{OB}} \approx -\frac{1}{2} \left(\frac{\omega\tau_y}{1 + k\beta} \right)^2 \approx -\frac{1}{2\beta^2} \left(\frac{f}{f_1} \right)^2 \quad (2.37)$$

Следва да се има предвид, обаче, че представянето на ОУ като инерционно ниво от първи ред – формула (2.34) за повечето типове операционни усилватели е твърде неточно и формула (2.37) следва да се използва само за ориентировъчни изчисления. По-прецизен анализ на динамичната грешка в областта на високите честоти е възможен само, ако се разполага с точния динамичен модел на конкретния ОУ.

Мультипликативните съставлящи на грешката на усилвателите на променливо напрежение, определящи се от нестабилността на k , R_1 , R_2 , $r_{ex, \text{диф}}$ и $r_{ex, \text{сф}}$, се изчисляват по аналогичните формули за усилвателите на постоянно напрежение.

Аддитивната грешка на усилвателя на променливо напрежение зависи само от вътрешните и индуктираните шумове. Остатъчното напрежение в такива усилватели практически не внася грешки, тъй като то се предава на изхода с единично усилване и освен това, товарът на усилвателите на променливо напрежение често се свързва чрез разделителен кондензатор.

2.7. Задачи за лабораторно упражнение

Лабораторното упражнение по тази тема е свързано със запознаване със схемотехниката на измервателните усилватели, както и с изследването на метрологичните им параметри и характеристики, на базата на Фиг. 2.3, Фиг. 2.4 и Фиг. 2.7.

2.7.1. Да се разучи схемата на лабораторната постановка и се нанесат върху принципната ѝ схема стойностите, типа и толеранса на елементите. На базата на каталожни данни за операционния усилвател и на номиналните стойности на елементите да се изчислят основните параметри и характеристики на неинвертиращ постояннотоков усилвател.

2.7.2. Експериментално да се определят адитивната грешка, коефициентът на усилване, мултипликативната грешка и изходното съпротивление на неинвертиращ постояннотоков усилвател и получените резултати се сравнят с теоретично изчисленияте.

2.7.3. Да се снее амплитудно-честотната характеристика на инвертиращ променливотоков усилвател. Да се построи същата в логаритмичен мащаб за честотата и да се определят горната и долната граница на честотата, при които усилването спада с 10%. Получените резултати да се сравнят с теоретично изчисленияте.

2.7.4. Да се определи експериментално входното съпротивление на неинвертиращ променливотоков усилвател с високо входно съпротивление (Фиг. 2.7-в) и се сравни с теоретично изчисленото.

Забележка: Входното съпротивление може да се определи по следната методика. Първоначално се задава от генератора входно напрежение U_{ex1} в границите на линейната област на амплитудната характеристика и равномерната част на амплитудно-честотната характеристика и се измерва изходното напрежение $U_{изх1}$. След това, на входа на усилвателя се включва последователно съпротивление R_0 със стойност от порядъка на очакваната стойност на входното съпротивление и с генератора се задава ново входно напрежение U_{ex2} , при което изходното напрежение на усилвателя да стане равно на $U_{изх1}$. Входното съпротивление се изчислява по формулата: $R_{ex} = R_0 \cdot U_{ex1}/(U_{ex2} - U_{ex1})$.

2.8. Контролни въпроси

2.8.1. *Кои са основните метрологични параметри и характеристики на измервателните усилватели?*

2.8.2. *Кои са източниците на адитивна и мултипликативна грешка на статичната амплитудна характеристика на различните видове измервателни усилватели.*

2.8.3. *Кои са причините за неравномерност на амплитудно-честотната характеристика на усилвателите.*

2.8.4. *Кои са източниците за нелинейност на характеристиката на преобразуване на усилвателите.*

2.8.5. *Да се предложи, използвайки формула (2.7), методика за определяне на изходното съпротивление на измервателния усилвател.*

2.8.6. *Да се изведе формулата на експериментално определяне на входното съпротивление на усилвателите - задача 2.7.4.*