



АНАЛОГОВА СХЕМОТЕХНИКА ДЕМОНСТРАТОР КЪМ МОДУЛ 10

Цел

Целта на демонстратора е да се затвърдят теоретичните познания и да се подпомогне самоподготовката.

Операционни усилватели (ОУ) – 2

I. Дейности

Целта на упражнението е да затвърди теоретичните знания на студентите за операционните усилватели. Едновременно с това в процеса на работа студентите придобиват практически навици и умения да използват операционни усилватели, както и да изследват техните основни експлоатационни параметри.

II. Техническа окомплектовка

За провеждане на лабораторното занятие е необходима следната апаратура и допълнителни съоръжения:

- Лабораторен макет “Параметри на операционни усилватели”, позволяващ изследване на основните параметри на ОУ при усилване на постояннотокови и променливотокови сигнали;
- Източник на двуполлярно захранващо напрежение ($\pm 15V$);
- Генератор на синусоидален сигнал ($3Hz \div 3MHz$);
- Цифров волтметър ($\geq 4 \frac{1}{2}$ цифри);
- Електроннолъчев осцилоскоп (честотна лента $\geq 10MHz$, на ниво – 3dB).

III. Теоретична постановка

Операционните усилватели (ОУ) са интегрални постояннотокови усилватели с диференциален вход, с голям коефициент на усилване по напрежение, голямо входно и малко изходно съпротивление. Те работят винаги с външна обратна връзка. В зависимост от вида й ОУ се използват за моделиране на различни математически операции и за усилване и генериране на сигнали с различна форма.



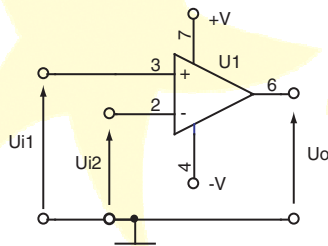
Съвременните ОУ представляват многостъпални постояннотокови усилватели, които са изградени по двустъпална или тристъпална структура.

Някои от основните параметри на ОУ се дефинират както при ДУ. Те са: диференциален коефициент на усилване без обратна връзка A_d ; коефициент на усилване на синфазни сигнали A_{CM} ; коефициент на дискриминация K_R (F); коефициент на потискане на синфазни сигнали $CMRR$; входно съпротивление за диференциален сигнал R_{id} ; входно съпротивление за синфазен сигнал R_{iCM} ; изходно съпротивление R_o .

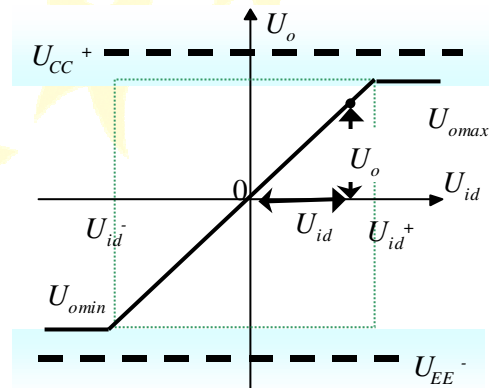
На фиг. 7.1 е показано символичното означение на ОУ със съответните инвертиращ (2) и неинвертиращ (3) вход, изход (6) и изводи (7) и (4) за постояннотоково захранване [14].

3.1. Предавателна характеристика

Статичната предавателна характеристика на ОУ изразява зависимостта на изходното напрежение U_o от изменението на входния диференциален сигнал $U_{id} = U_{i1} - U_{i2}$ при отворена верига на обратна връзка и празен ход в изхода. На фиг. 7.2 е показана предавателна характеристика на типичен



Фиг. 7.1



Фиг. 7.2

усилвател. В линейната област отношението на изходното напрежение U_o към предизвикващото го входно напрежение $U_{id} = U_{i1} - U_{i2}$

$$(7.1) \quad A_d = \frac{U_o}{U_{id}}$$

е диференциалният коефициент на усилване по напрежение (Open – Loop Voltage Gain) и обикновено има стойност $10^4 \div 10^6$ ($80 \div 120\text{dB}$). В зоните на насищане, където U_o е равно на U_{omax} или U_{omin} диференциалният коефициент на усилване е равен на нула.



Предавателната характеристика на ОУ рядко минава през нулата на координатната система. Това е свързано с параметъра *входно напрежение на несиметрия (Input Offset Voltage) U_{io}* . Възможно е да има отделни екземпляри усилватели, при които $A_d |U_{io}| > |U_{o\max}|$. Ако двата входа на такива усилватели се свържат към маса, в изхода се установява напрежение $U_{o\max}$ или $U_{o\min}$, т.е. усилвателят се намира в наситено състояние [14]. Следователно преди тестване на коефициента на усилване при отворена верига на обратната връзка е необходимо да се компенсира влиянието на изместването на нулата съгласно препоръките, дефинирани в каталожните данни.

3.2 Входни характеристики

Входните характеристики на ОУ изразяват зависимостта на входните токове от входното напрежение на неинвертиращия и инвертиращия вход и се дефинират при празен ход в изхода и без обратна връзка. Параметрите, които могат да бъдат определени от тази характеристика са следните:

- Входен поляризиращ ток (*Input Bias Current*) I_{iB} . Той представлява средната стойност на токовете на двата входа при нулево входно напрежение:

$$(7.2) \quad I_{iB} = \frac{I_{B1}^{+} + I_{B2}^{-}}{2};$$

- Входен ток на несиметрия (*Input Offset Current*) I_{io} . Той представлява разликата между токовете на двата входа при нулево входно напрежение:

$$(7.3) \quad I_{io} = I_{B1}^{+} - I_{B2}^{-};$$

- Входно съпротивление за диференциални сигнали (*Input Resistance*) R_{id} . Определя се като отношение на изменението на входното диференциално напрежение към изменението на входния ток:

$$(7.4) \quad R_{id} = \frac{dU_{id}}{dI_{iB}}.$$

3.3 Предавателна характеристика за синфазните сигнали

Тази предавателна характеристика изразява зависимостта на изходното напрежение от изменението на входния синфазен сигнал. Входното синфазно напрежение се подава при условие, че двата входа на ОУ се свързват нахъсо и в изхода се присъединява определен товар.

Параметрите, които могат да бъдат определени са:



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда”

- Коефициент на предаване на синфазните сигнали (*Common-Mode Voltage Gain*) A_{CM} . Той представлява отношението на промяната на изходното напрежение U_{oCM} към предизвикващата го промяна на

$$\text{синфазното входно напрежение } U_{iCM} = \frac{U_{i1} + U_{i2}}{2} :$$

$$(7.5) \quad A_{CM} = \frac{dU_{oCM}}{dU_{iCM}}$$

- Коефициент на дискриминация $K_R (F)$. Той представлява отношението на диференциалния коефициент на усилване по напрежение към коефициента на предаване за синфазните сигнали:

$$(7.6) \quad K_R = 20 \lg \frac{A_d}{A_{CM}}, \text{ dB.}$$

- Входно съпротивление за синфазни сигнали (*Common-Mode Input Resistance*) R_{iCM} . Определя се като отношение на промяната на входното синфазно напрежение към промяната на входния ток:

$$(7.7) \quad R_{iCM} = \frac{dU_{iCM}}{dI_{iB}}.$$

3.4. Амплитудно-честотна и фазово-честотна характеристика

На фиг. 7.3 са показани честотните характеристики на Бодe на типичен ОУ при отворена верига на обратна връзка. Определянето им се извършва като към входа на усилвателя се подава синусоидално диференциално напрежение в широк честотен обхват, а към изхода се присъединява определен товар. Предавателната функция в комплексен вид, АЧХ и ФЧХ на ОУ с два полюса f_{p1} и f_{p2} се описват със следните равенства:

$$(7.8a) \quad \dot{A}_d(f) = \frac{A_{d0}}{\left(1 + j \frac{f}{f_{p1}}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{p2}}\right)},$$

$$(7.8б) \quad \left| \dot{A}_d(f) \right| = \frac{A_{d0}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{p1}}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{p2}}\right)^2}} \text{ и}$$

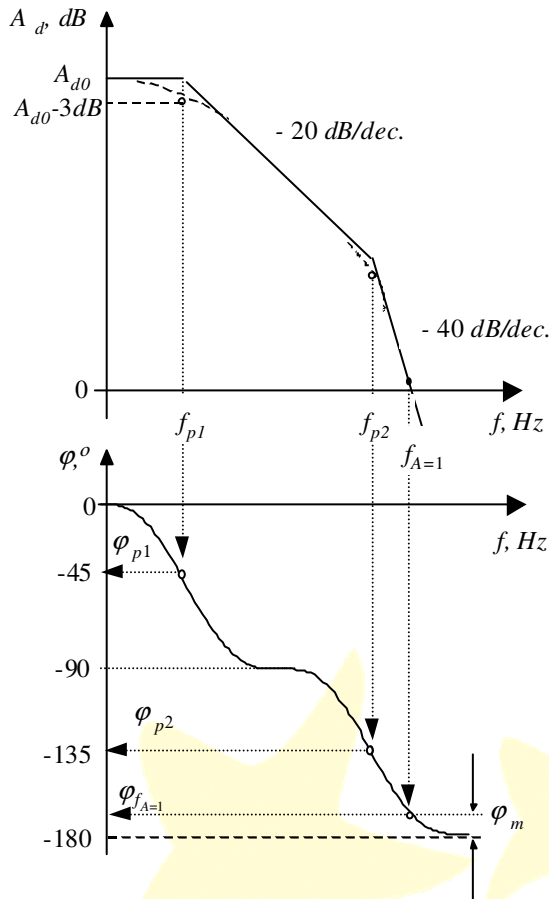
$$(7.8в) \quad \varphi = -\arctg\left(\frac{f}{f_{p1}}\right) - \arctg\left(\frac{f}{f_{p2}}\right).$$



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда”

Амплитудно-честотната характеристика (АЧХ) се дефинира като зависимостта на



Фиг. 7.3

- модула на коефициента на усилване за диференциалните сигнали без обратна връзка от честотата (7.8б). С тази характеристика са свързани следните параметри:
- Гранична честота на ОУ на ниво -3dB f_{p1} . Това е честотата на входния сигнал $f = f_{p1}$, за която коефициента на усилване намалява с 3dB и след което наклонът на АЧХ е -20dB/dec .
 - Гранична честота на втория полюс f_{p2} . Това е честотата на входния сигнал, над която наклонът на АЧХ е -40dB/dec .
 - Честота на единично усилване $f_{A=1}$. Това е честотата, при която коефициентът на усилване без обратна връзка е равен на единица (0dB);
 - Произведение усилване-честота $GBW = A_d f$. За честотния обхват $f_{p1} < f < f_{p2}$, т.е. в честотната област, обхващаща този участък, произведението на честотата по съответното усилване е постоянна величина.

Фазово-честотната характеристика (ФЧХ) се дефинира като зависимостта на фазата на коефициента на усилване за диференциалните сигнали без обратна връзка от честотата (7.8в). С тази характеристика (фиг. 7.3) са свързан запасът по фаза (*Phase Margin*) φ_m , равен на разликата между -180° и фазовото отместване, причинено от ОУ при честотата $f_{A=1}$, за която неговият коефициент на усилване без ОВ е равен на единица: $\varphi_m = \varphi_{f_{A=1}} - (-180^\circ)$.

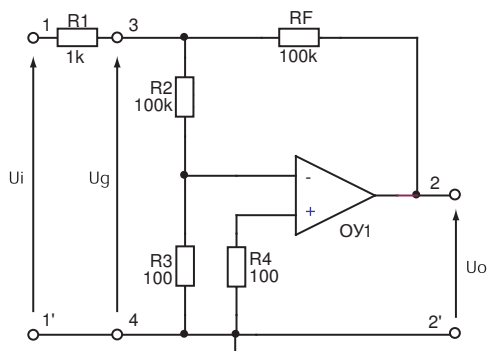


IV. Задачи за изпълнение

4.1. Да се разучи макетът и да се начертае схемата му.

4.2. Да се подаде номинално захранващо напрежение $U_{CC} = +15V$ и $U_{EE} = -15V$ към макета, като средната точка на захранващото устройство се свърже към общия проводник на макета, означен с GND .

4.3. Да се анализират каталожните данни за изследвания ОУ LM741 (*National Semiconductor*) (приложение П-4)



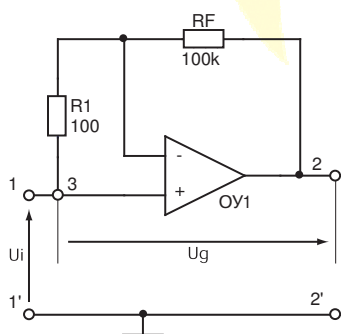
Фиг. 7.4

и да се отчетат минималните, типичните и максималните стойности за A_d , U_{io} , I_{iB} , I_{io} , K_R , R_{iCM} , R_{id} , f_{p1} , $f_{A=1}$ и Φ_m , както и условията за тяхното тестване, като да се нанесат в таблица 7.1.

4.4. Да се измери коефициентът на усилване A_d на ОУ без обратна връзка. За тази цел ОУ се свързва по схемата на фиг. 7.4 (схема 1 на макета). От синусоидален

генератор се подава сигнал с честота 40Hz и с амплитуда, два пъти по-малка от тази, при която в изходния сигнал се появяват нелинейни изкривявания U_o ($U_o < U_{o,max,min}$). С цифров волтметър се измерват напреженията U_g между т. 3 и т. 4 и напрежението U_o между букси 2 и 2'. Коефициентът на усилване A_d се определя съгласно формулата

$$(7.9) \quad A_d = \frac{U_o}{U_{id}} = \frac{U_o}{U_g} \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right), \text{ където } U_{id} = \frac{U_g}{\left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right)}.$$



Фиг. 7.5

Получената стойност се умножава по 10, тъй като честотата $f_{p1} \approx 4Hz$, и при 40Hz усилването намалява с около 20dB (10 пъти). Коефициентът A_d се представя в децибели, нанася се в таблица 7.1 и се сравнява с каталожните данни.

4.5. Да се измери коефициентът на дискриминация K_R . Коефициентът K_R може да се измери, като се използва схемата от фиг. 7.5 (схема 2 на макета). За целта от синусоидален генератор се подава отново сигнал с честота 40Hz и с амплитуда, два пъти по-малка от тази, при която в изходния сигнал се появяват нелинейни изкривявания. С



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

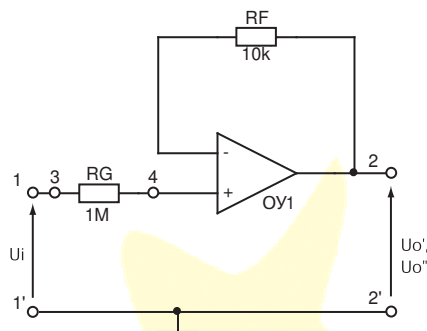
Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда“

цифров волтметър се отчита напрежението U_g между т. 2 и т. 3 и напрежението U_i между букси 1 и 1', а K_R се изчислява по формулата

$$(7.10) K_R = \frac{1 + \frac{R_F}{R_1}}{\frac{U_g}{U_i} - \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{1}{A_d}}$$

Получената в децибели стойност за K_R да се нанесе в таблица 7.1 и да се сравни с дадената в каталога за изследвания тип ОУ.

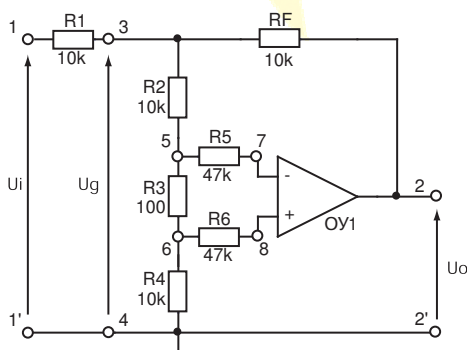
4.6. Да се измери входното съпротивление за синфазен сигнал R_{iCM} . За целта ОУ се свързва по схемата на фиг. 7.6 (схема 3 на макета). От генератор се подава сигнал с честота 40Hz и с амплитуда, два пъти по-малка от тази, при която в изходния сигнал се появяват нелинейни изкривявания.



Фиг. 7.6

С цифров волтметър се измерва изходното напрежение U_o' . След това букси 3 и 4 се свързват накъсо, при което се шунтира R_G и отново се измерва изходното напрежение U_o'' . Съпротивлението R_{iCM} се определя по формулата:

$$(7.11) R_{iCM} = \frac{R_G}{\frac{U_o''}{U_o'} - 1}$$



Фиг. 7.7

4.7. Да се измери входното съпротивление за диференциален сигнал R_{id} . За целта ОУ се свързва по схемата от фиг. 7.7 (схема 4 на макета). От синусоидален генератор се подава напрежение U_i с честота 40Hz и с амплитуда, при което на изхода се получава максимално неизкривено напрежение. С цифров волтметър се измерва изходното напрежение U_o' (между букси 2 и 2') и напрежението U_g (между букси 3 и 4).

Коефициентът на усилване A_d' се изчислява съгласно формулата



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда“

$$(7.12) A_d' = \frac{U_o'}{U_{id}'} = \frac{U_o'}{U_g'} \left(\frac{R_2 + R_3 + R_4}{R_3} \right), \text{ където } U_{id}' = U_g' \frac{R_3}{R_2 + R_3 + R_4}.$$

След това букси 5 и 7, 6 и 8 се свързват накъсо, при което се шунтират R_5 и R_6 , и отново се измерва изходното напрежение U_o (между букси 2 и 2') и напрежението U_g (между букси 3 и 4). Изчислява се коефициентът на усилване A_d съгласно формулата

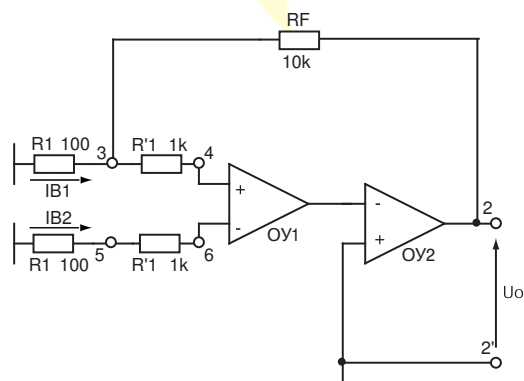
$$(7.13) A_d = \frac{U_o}{U_{id}} = \frac{U_o}{U_g} \left(\frac{R_2 + R_3 + R_4}{R_3} \right).$$

Тогава входното съпротивление за диференциален сигнал R_{id} се изчислява съгласно равенството

$$(7.14) R_{id} = (R_5 + R_6) \frac{A_d'}{A_d - A_d'}.$$

4.8. Да се измери входното напрежение на несиметрия U_{io} на ОУ. За целта ОУ се включва по схемата, показана на фиг. 7.8 (схема 5 на макета). Използуван е спомагателен ОУ (OP07 – Analog Devices), като двата ОУ са обхванати от обща отрицателна обратна връзка. Измерва се изходното напрежение $\Delta U_o (U_{io})$ между букси 2 и 2' с волтметър, като букси 3 и 4, както и 5 и 6 се свързват накъсо. При това условие напрежението U_{io} се определя по формулата

$$(7.15) U_{io} \approx \Delta U_o (U_{io}) \left(\frac{R_1}{R_1 + R_F} \right).$$



Фиг. 7.8

4.9. Да се измерят входните поляризиращи токове I_{B1}^+ и I_{B2}^- , и да се изчислят I_{iB} и I_{io} . За целта се използва схемата от фиг. 7.8 (схема 5 на макета). Свързват се накъсо само букси 5 и 6 (премахва се късото съединение между 3 и 4) и се отчита с волтметър изходното напрежение $\Delta U_o (I_{B1}^+)$ между букси 2 и 2'. При това за входния ток I_{B1}^+ се получава

(7.16a)

$$I_{B1}^+ = \frac{R_1}{R_1 + R_F} \cdot \frac{\Delta U_o (I_{B1}^+) - \Delta U_o (U_{io})}{R_1}.$$



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда“

Свързват се накъсо само букси 3 и 4 (премахва се късото съединение между 5 и 6) и се отчита с волтметър изходното напрежение $\Delta U_o(I_{B2}^-)$ между букси 2 и 2'. При това за входния ток I_{B2}^- се получава

$$(7.16б) \quad I_{B2}^- = \frac{R_1}{R_1 + R_F} \cdot \frac{\Delta U_o(I_{B2}^-) - \Delta U_o(U_{io})}{R_1'}$$

Съгласно уравнения (7.2) и (7.3) за входния поляризиращ ток I_{iB} се получава

$$(7.16в) \quad I_{iB} = \frac{I_{B1}^+ + I_{B2}^-}{2},$$

а за входния ток на несиметрия I_{io} -

$$(7.16г) \quad I_{io} = I_{B1}^+ - I_{B2}^-.$$

4.10. Попълнете таблица 7.1 с резултатите от измерванията и каталожните данни за изследвания ОУ.

Таблица 7.1

Параметър	Размерност	Условия за тестване	Каталожни данни			Измерена стойност
			Min	Тур.	Max	
A_d						
$\pm U_{omax,min}$						
f_{p1}						
$f_{A=1}$						
K_R						
R_{id}						
R_{iCM}						
U_{io}						
I_{iB}						
I_{io}						